

ISSN 2658-3135 (Print)
ISSN 2782-408X (Online)

ЖИВОТНОВОДСТВО И КОРМОПРОИЗВОДСТВО

Теоретический и научно-практический журнал

ANIMAL HUSBANDRY AND FODDER PRODUCTION

Theoretical and scientific-practical journal

Том 107 | № 4 | 2024



Оренбург



**Федеральный научный центр
биологических систем и агротехнологий
Российской академии наук**

**Federal Research Centre
of Biological Systems and Agrotechnologies
of the Russian Academy of Sciences**



ЖИВОТНОВОДСТВО И КОРМОПРОИЗВОДСТВО
(до января 2018 года «Вестник мясного скотоводства»)

Теоретический и научно-практический журнал

Основан в 1931 году

Том 107 № 4 2024

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, доктора наук

ANIMAL HUSBANDRY AND FODDER PRODUCTION
(until January 2018 «Herald of Beef Cattle Breeding»)

Theoretical and scientific-practical journal

Founded in 1931

Vol. 107 No. 4 2024

The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications, where basic scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, Doctor of Sciences

Животноводство и кормопроизводство
(до января 2018 года «Вестник мясного скотоводства»)

Рецензируемый теоретический и научно-практический журнал, в котором рассматриваются вопросы, охватывающие все области генетики и селекции, физиологии, размножения, питания и кормления сельскохозяйственных животных.

Миссия журнала – формирование научно-информационной среды и распространение информации о научных разработках и исследованиях в области ветеринарии и зоотехнии, агрономии, физиологии животных, экономики и управления народным хозяйством, проводимых учёными и специалистами НИИ и вузов России, стран СНГ и дальнего зарубежья.

В журнале публикуются результаты научных исследований и их внедрения в сфере АПК по следующим темам: инновационное направление сельскохозяйственной науки; нанотехнологии и биоэлементология в животноводстве и кормопроизводстве; разведение, селекция, генетика сельскохозяйственных животных; физиология животных; технология производства и качество продукции животноводства; теория и практика кормления сельскохозяйственных животных; кормопроизводство и корма; общее земледелие и растениеводство; экономика и организация сельского хозяйства.

Главный редактор: Лебедев Святослав Валерьевич, д-р биол. наук, член-корреспондент РАН

Члены редакционного совета:

Х.А. Амерханов, д-р с.-х. наук, академик РАН, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия)

Г.И. Бельков, д-р с.-х. наук, член-корреспондент РАН, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

Г.К. Дускаев, д-р биол. наук, профессор РАН, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

Ф.Г. Каюмов, д-р с.-х. наук, профессор, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

С.А. Мирошников, д-р биол. наук, член-корреспондент РАН, Оренбургский государственный университет (г. Оренбург, Россия);

Ф. Муселин, д-р вет. медицины, Банатский университет сельскохозяйственных наук и ветеринарной медицины «Король Мишель I Румынии» из Тимишоара (Тимишоара, Румыния);

С.В. Нотова, д-р мед. наук, профессор, Оренбургский государственный университет (г. Оренбург, Россия);

Е.А. Сизова, д-р биол. наук, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия)

Члены редакционной коллегии:

Ф.С. Амиршоев, д-р биол. наук, член-корреспондент Таджикской сельскохозяйственной академии наук, Таджикская академия сельскохозяйственных наук (Республика Таджикистан, г. Душанбе);

И.Н. Бесалиев, д-р с.-х. наук, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

Н. П. Герасимов, д-р биол. наук, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

И.Ф. Горлов, д-р с.-х. наук, академик РАН, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции (г. Волгоград, Россия);

А.М. Гулюкин, д-р ветеринар. наук, член-корреспондент РАН, Федеральный научный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К.И. Скрябина и Я.Р. Коваленко Российской академии наук (г. Москва, Россия);

К.М. Джуламанов, д-р с.-х. наук, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

И.М. Дунин, д-р с.-х. наук, академик РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела (Московская область, п. Лесные Поляны, Россия);

С.А. Макаренко, д-р с.-х. наук, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург, Россия);

А.А. Мушинский, д-р с.-х. наук, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

Е.Г. Насамбаев, д-р с.-х. наук, профессор, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир-хана (Республика Казахстан, г. Уральск);

М.Н. Романов, канд. биол. наук, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика

Л.К. Эрнста (Московская область, п. Дубровицы, Россия)

А.Н. Фролов, д-р биол. наук, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия);

А.В. Харламов, д-р с.-х. наук, профессор, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург, Россия)

ISSN 2658-3135 (Print), ISSN 2782-408X (Online)

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Выписка из реестра зарегистрированных СМИ ПИ № ФС77-72507 от 20.03.2018 г.) – печатное издание

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»

Редактор – З.Г. Долгополова, Технический редактор – Е.Г. Хусаинова,

Компьютерная вёрстка – Е.Г. Хусаинова, Перевод – Ю.Р. Коростелева, Н.П. Герасимов

Компьютерный набор осуществлён с помощью текстового процессора Microsoft Word 2013 for Windows.

Формат бумаги 60х84/8. Бумага типографская. Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Подписано в печать 16.12.2024 г. Дата выхода в свет 31.12.2024 г. Усл. печ. л. 41,27. Тираж 500 экз. Заказ № 23

Периодичность 4 раза в год. Цена свободная

Редакция, издатель, типография – ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН,

Адрес: 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-70, 30-81-76

e-mail редакции: ntup_vniims@rambler.ru

Сайт журнала: <http://gk.fncbst.ru/>

Animal Husbandry and Fodder Production
(until January 2018 «Herald of Beef Cattle Breeding»)

A peer-reviewed theoretical, research and practical journal that addresses issues covering all areas of genetics and selection, physiology, reproduction, nutrition and feeding of farm animals.

The mission of the journal is the formation of a scientific and information environment and the dissemination of information about scientific developments and research in veterinary medicine and animal science, agronomy, animal physiology, economics and management of national economy performed by scientists and specialists from research institutes and universities of Russia, CIS countries and far abroad.

The journal publishes the results of researches and their implementation in the agricultural sector on the following subjects: innovative agricultural science; nanotechnology and bioelementology in animal husbandry and fodder production; breeding, selection, genetics of farm animals; physiology of animals; production technology and quality of livestock products; theory and practice of farm animals feeding; fodder production and fodders; general agriculture and crop production; economics and organization of agriculture.

Editor-in-chief: **SV Lebedev**, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences

Editorial council:

KhA Amerkhanov, Dr. Sci. (Agriculture), Academician of Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia);

GI Belkov, Dr. Sci. (Agriculture), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

GK Duskaev, Dr. Sci. (Biology), Professor of Russian Academy of Sciences, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

FG Kayumov, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

SA Miroshnikov, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Orenburg State University (Orenburg, Russia)

F Muselin, Dr. Sci. (Veterinary), Banat's University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine «King Michel I of Romania» from Timisoara (Timisoara, Romania);

SV Notova, Dr. Sci. (Medicine), Professor, Orenburg State University (Orenburg, Russia)

EA Sizova, Dr. Sci. (Biology), Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)

Editorial staff:

FS Amirshoev, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Tajik Agricultural Academy of Sciences, Tajikistan Academy of Agricultural Sciences (Republic of Tajikistan, Dushanbe);

IN Besaliev, Dr. Sci. (Agriculture), Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

NP Gerasimov, Dr. Sci. (Biology), Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

IF Gorlov, Dr. Sci. (Agriculture), Academician of Russian Academy of Sciences, Povolzhsky Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products (Volgograd, Russia);

AM Gyulyukin, Dr. Sci. (Veterinary), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center - All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary Medicine named after K.I. Scriabin and Ya.R. Kovalenko of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).

KM Dzhulamanov, Dr. Sci. (Agriculture), Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

IM Dunin, Dr. Sci. (Agriculture), Academician of Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Breeding Work (Moscow region, Village Forest Glades, Russia);

SA Makarenko, Dr. Sci. (Agriculture), Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia);

AA Mushinsky, Dr. Sci. (Agriculture), Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

EG Nasambayev, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Zhangir khan West Kazakhstan Agrarian-Technical University (Republic of Kazakhstan, Uralsk);

MN Romanov, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst (Moscow region, Dubrovitsy, Russia)

AN Frolov, Dr. Sci. (Biology), Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia);

AV Kharlamov, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)

ISSN 2658-3135 (Print), ISSN 2782-408X (Online)

Registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Extract from the catalogue of registered media series PI No. FS77-72507 from 20 March 2018) – print edition
Founder – Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences”

Editor – ZG Dolgoplova Technical Editor – EG Khusainova Computer layout – EG Khusainova

Translator – YuR Korostelyova, NP Gerasimov

Computer typing was carried out using a text processor Microsoft Word 2013 for Windows. Paper size is 60x84/8.

Paper is typographical. Offset printing. Font is Times New Roman.

Signed to the press on 16.12.2024. Date of publication 31.12.2024. Conditional printed sheets 41.27 Circulation 500 samples. Order № 23

Issued 4 times per year. The price is free.

Editorial office, publisher, typography – FSBSI FRC BST RAS

Address: 460000, Orenburg, 9 Yanvarya str., 29, Phone: 8(3532)30-81-70, 30-81-76, editorial office:

e-mail: ntiip_vniims@rambler.ru

Web site: <http://gk.fncbst.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

- Мирошникова Е.П., Аринжанова М.С., Аринжанов А.Е., Мирошников С.А.*
Использование препарата наночастиц SiO₂ в кормлении карпа 10

БИОЭЛЕМЕНТОЛОГИЯ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

- Фролов А.Н., Завьялов О.А.* **Влияние сезона года на элементный статус и продуктивные качества бычков** 31

РАЗВЕДЕНИЕ, СЕЛЕКЦИЯ, ГЕНЕТИКА

- Коновалова Е.Н., Евстафьева Л.В., Сафонова С.С., Романенкова О.С., Гладырь Е.А.*
Химический состав и гистологическая структура длиннейшей мышцы спины крупного рогатого скота абердин-ангусской породы в зависимости от генотипа 41

- Камалдинов Е.В., Петров А.Ф., Нарожных К.Н., Пальчиков П.Н.* **Оценка качества генеалогических данных в племенных предприятиях Западной Сибири** 53

- Позовникова М.В., Тулинова О.В., Васильева О.К., Щербаков Ю.С.* **Идентификация и анализ значимых локусов генома, ассоциированных с устойчивостью к маститу у айрширских коров методом GWAS** 68

- Чеченихина О.С., Менищikov Н.Н., Степанов А.В., Смирнова Е.С., Синько В.Н., Шиловцев А.В.* **Влияние линейной принадлежности на показатели молочной продуктивности коров голштинской породы различных уровней стрессустойчивости** 83

- Ветох А.Н., Волкова Н.А., Ларионова П.В., Джагаев А.Ю., Абдельманова А.С., Зиновьева Н.А.* **Полногеномные ассоциативные исследования показателей цвета мяса у кур F2 ресурсной популяции** 94

- Бардуков Н.В., Никипелова А.К., Отрадных П.И., Никипелов В.И., Белоус А.А.*
Определение достоверности происхождения сибирского осетра на основе результатов микросателлитного анализа и коэффициентов генетического сходства 106

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА, КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ И ЭКОНОМИКА
В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

- Боголюбова Н.В., Колесник Н.С., Лахонин П.Д., Елаткин Н.П., Николаев А.А.*
Взаимосвязь некоторых показателей состава и качества мяса бычков абердин-ангусской породы 120

- Лебедев С.В., Бельков Г.И., Костюк Р.В., Герасимов Н.П.* **Производственный потенциал отрасли мясного скотоводства в России** 133

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОРМЛЕНИЯ

- Сложенкина М.И., Горлов И.Ф., Антипова Т.А., Кудряшова О.В., Воронцова Е.С., Брехова С.А., Дурдыев А.К., Сложенкина А.А.* **Влияние новой пребиотической кормовой добавки на основе крахмального полисахарида на молочную продуктивность и качественные показатели получаемой продукции** 144

<i>Остренко К.С., Луговой М.М., Некрасов Р.В. Сравнительная оценка влияния холина хлорида и жидкого бетаина на интенсивность роста, биохимические и экономические показатели у телят молочного периода</i>	156
<i>Нуржанов Б.С., Логачев К.Г., Дускаев Г.К. Эффективность комбикормов с скорректированной минеральной питательностью по различным нормативам NRC и NASEM на молочную продуктивность коров</i>	169
<i>Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Folescu M, Muselin F. Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals</i>	177
<i>Гойлян Д.В., Кристина Р.Т., Дома А.О., Думитреску Е., Фолеску М., Муселин Ф. Содержание микроэлементов в молоке дойных коров, получавших глицин-хелатные минеральные добавки</i>	184
<i>Ширнина Н.М., Кононец В.В. Кавитированные концентраты, как стимулирующий фактор продуктивности дойных коров</i>	192
<i>Головин А.В. Эффективность использования растительных белковых концентратов при оптимизации протеинового питания молочных коров</i>	206
<i>Петруша Ю.К. Влияние фитобиотиков в составе рациона на зоотехнические и биохимические показатели цыплят-бройлеров</i>	218
<i>Сенченко М.А., Горнич Е.А., Ткачева И.С., Чугреев М.К., Мельникова Л.Э. Разработка полнорационного комбикорма с заданными свойствами для зайцеобразных на основе апипродукции и его апробация</i>	227

ФИЗИОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ

<i>Рязанов В.А., Колпаков В.И., Тарасова Е.И., Ручай А.Н. Кишечный микробиом и функциональный прогноз метаболических путей, связанных с накоплением жировой и мышечной ткани у мясного скота</i>	242
<i>Иолчиев Б.С., Шмидт А.В., Луконина О.Н., Мороз Т.А., Маисталер Д.В., Комбарова Н.А., Ушакова С.Н., Приданова И.Е. Дисперсия хроматина сперматозоидов быков-производителей в зависимости от возраста</i>	255
<i>Яушева Е.В., Сизова Е.А. Таксономическое разнообразие микробиоты толстого кишечника коров при различном уровне эссенциальных элементов в организме животных</i>	266
<i>Сингина Г.Н., Чинаров Р.Ю., Шедова Е.Н., Луканина В.А., Жукова А.С. Результаты выделения ооцитов и получения IVP эмбрионов у тёлочек истобенской породы в зависимости от режима проведения ОРУ</i>	283

КОРМОПРОИЗВОДСТВО И КОРМА

<i>Камова А.И., Степанова Т.В., Орлова А.Г. Продуктивность люцерны изменчивой в зависимости от инокуляции <i>Sinorhizobium meliloti</i> в условиях Республики Карелия</i>	295

<i>Шаабан М.</i> Гидролизированные белки: доступность, биоактивность, безопасность, применение при производстве кормов (обзор)	309

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

<i>Бесалиев И.Н., Мироненко С.И.</i> Урожайность и качество зерна яровой твёрдой пшеницы в условиях Оренбургского Предуралья	324

<i>Подласова Е.Ю., Новикова А.А.</i> Анализ содержания хлорофилла в листьях ярового ячменя с использованием гиперспектральной визуализации и спектрофотометрии	337

Памяти Тишкова Николая Ивановича	347

Список статей, опубликованных в 2024 году	348

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY IN ANIMAL HUSBANDRY AND FODDER PRODUCTION

- Miroshnikova EP, Arinzhanova MS, Arinzhanov AE, Miroshnikov SA. Use of SiO₂ nanoparticles preparation in carp feeding* 10

BIOELEMENTOLOGY IN ANIMAL HUSBANDRY AND CROP PRODUCTION

- Frolov AN, Zavyalov OA. The influence of season on the elemental status and productive qualities of bulls* 31

BREEDING, SELECTION, GENETICS

- Konovalova EN, Evstafeva LV, Safonova SS, Romanenkova OS, Gladyr EA. Chemical composition and histological structure of the longest muscle of the back of Aberdeen-Angus cattle depending on genotype* 41

- Kamaldinov EV, Petrov AF, Narozhnykh KN, Palchikov PN. Assessment of the quality of genealogical data in breeding enterprises of Western Siberia* 53

- Pozovnikova MV, Tulinova OV, Vasileva OK, Shcherbakov YuS. Identification and GWAS analysis of significant genomic loci associated with mastitis resistance in Ayrshire cows* 68

- Chechenikhina OS, Menshchikov NN, Stepanov AV, Smirnova ES, Sinko VN, Shilovtsev AV. The influence of line on indicators of dairy productivity of the Holstein cows with various levels of stress resistance* 83

- Vetokh AN, Volkova NA, Larionova PV, Dzhagaev AY, Abdelmanova AS, Zinovieva NA. Genome-wide association studies of meat color indicators in young F2 chickens resource population* 94

- Bardukov NV, Nikipelova AK, Otradnov PI, Nikipelov VI, Belous AA. Determining the reliability of the origin of Siberian sturgeon based on the results of microsatellite analysis and genetic similarity coefficients* 106

PRODUCTION TECHNOLOGY, QUALITY AND ECONOMY IN ANIMAL HUSBANDRY

- Bogolyubova NV, Kolesnik NS, Lakhonin PD, Elatkin NP, Nikolaev AA. The relationship of some indicators of composition and quality of meat of the Angus bulls* 120

- Lebedev SV, Belkov GI, Kostyuk RV, Gerasimov NP. Production potential of the beef cattle breeding industry in Russia* 133

THEORY AND PRACTICE OF FEEDING

- Slozhenkina MI, Gorlov IF, Antipova TA, Kudryashova OV, Vorontsova ES, Brekhova SA, Durdyev AK, Slozhenkina AA. Effect of a new prebiotic feed additive based on starch polysaccharide on dairy productivity and quality parameters of the obtained products* 144

<i>Ostrenko KS, Lugovoy MM, Nekrasov RV. Comparative assessment of the effect of choline chloride and liquid betaine on growth intensity, biochemical and economic indicators in calves in milking period</i>	156
<i>Nurzhanov BS, Logachev KG, Duskaev GK. Efficiency of compound feeds with adjusted mineral nutrition according to various NRC and NASEM standards on milk productivity of cows</i>	169
<i>Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Folescu M, Muselin F. Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals</i>	177
<i>Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Folescu M, Muselin F. Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals (in Russ.).</i>	184
<i>Shirnina NM, Kononets VV. Cavitated concentrates as a stimulating factor for the productivity of dairy cows</i>	192
<i>Golovin AV. Efficiency of plant protein concentrates in optimizing protein nutrition of dairy cows</i>	206
<i>Petrusha YK. The effect of phytobiotics in the diet on the zootechnical and biochemical parameters of broiler chickens</i>	218
<i>Senchenko MA, Gornich EA, Tkacheva IS, Chugreev NK, Melnikova LE. Development and approbation of a full-ration apicultural products based concentrated feed for the lagomorphs</i>	227

PHYSIOLOGY OF ANIMALS

<i>Ryazanov VA, Kolpakov VI, Tarasova EI, Ruchay AN. Gut microbiome and functional prediction of metabolic pathways associated with fat and muscle tissue accumulation in beef cattle</i>	242
<i>Iolchiev BS, Schmidt AV, Lukonina ON, Moroz TA, Mashtaler DV, Kombarova NA, Ushakova SN, Pridanova IE. Chromatin dispersion of spermatozoa of stud bulls depending on age</i>	255
<i>Yausheva EV, Sizova EA. Taxonomic diversity of the large intestine microbiota of cows with different levels of essential elements in the body</i>	266
<i>Singina GN, Chinarov RYu, Shedova EN, Lukanina VA, Zhukova AS. Results of oocyte isolation and obtaining IVP embryos from heifers of Istoben breed depending on OPU regimen</i>	283

FODDER PRODUCTION AND FODDERS

<i>Kamova AI, Stepanova TV, Orlova AG. Productivity of alfalfa depending on inoculation of <i>Sinorhizobium meliloti</i> in conditions of the Republic of Karelia</i>	295

<i>Shaaban M.</i> Hydrolyzed proteins: availability, bioactivity, safety, applications in feed production (review)	309
GEOPONICS AND CROP PRODUCTION	
<i>Besaliev IN, Mironenko SI.</i> Yield and grain quality of spring durum wheat in the conditions of the Orenburg Cis-Urals	324
<i>Podlasova EYu, Novikova AA.</i> Analysis of chlorophyll content in spring barley leaves using hyperspectral imaging and spectrophotometry	337
In memory Tishkov Nikolai Ivanovich	347
List of articles published in the Journal in 2024	248

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 639.3.043

doi:10.33284/2658-3135-107-4-10

Использование препарата наночастиц SiO₂ в кормлении карпа

Елена Петровна Мирошникова¹, Мария Сергеевна Аринжанова², Азамат Ерсайнович Аринжанов³,
Сергей Александрович Мирошников⁴

^{1,3,4}Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

²Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>

²marymiroshnikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1898-9307>

³arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

⁴rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0000-0003-1173-1952>

Аннотация. Выполнена серия исследований на модели карпа по оценке биологических свойств и продуктивного действия препарата наночастиц (nanometers particles (NPS)) диоксида кремния (SiO₂). Использован препарат NPS SiO₂, полученный методом плазмохимического синтеза ($d=126,5\pm 9,7$ нм, Z-потенциал – $29\pm 0,1$ мВ). Препарат NPS SiO₂ характеризовался отсутствием токсичности в диапазоне от $1,5\cdot 10^{-5}$ до $5\cdot 10^{-1}$ г/л (модель биосенсора *Escherichia coli* K12 TG1). Изучено действие NPS SiO₂ в трёх дозировках (100, 200, 300 мг/кг корма) на продуктивность и обмен веществ в организме карпа. Установлена оптимальная дозировка NPS SiO₂, составившая 200 мг/кг. При включении NPS SiO₂ в полнорационный комбикорм с содержанием сырого протеина 23 % установлен факт повышения интенсивности роста карпа на величину 10,2-14,1 %. При этом зафиксировано увеличение содержания общего белка в сыворотке крови рыб, и рост содержания ряда аминокислот в печени карпа. Во втором эксперименте изучена продуктивность и обмен минеральных веществ у карпа при совместном скармливании NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, митеонин, аргинин).

Ключевые слова: карп, кормление, наночастицы, кремнезем, химические элементы, аминокислоты

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект № 075-15-2024-550.

Для цитирования. Использование препарата наночастиц SiO₂ в кормлении карпа / Е.П. Мирошникова, М.С. Аринжанова, А.Е. Аринжанов, С.А. Мирошников // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 10-30. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-10>

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

Original article

Use of SiO₂ nanoparticles preparation in carp feeding

Elena P Miroshnikova¹, Maria S Arinzhanova², Azamat E Arinzhanov³, Sergey A Miroshnikov⁴

^{1,3,4}Orenburg State University, Orenburg, Russia

²Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>

²marymiroshnikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1898-9307>

³arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

⁴rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0000-0003-1173-1952>

Abstract. A series of studies were performed to evaluate the biological properties and productive action of a silicon dioxide nanoparticle preparation (NPS SiO₂) on a carp model. The NPS SiO₂ prepara-

tion obtained by plasma-chemical synthesis was used ($d=126.5\pm 9.7$ nm, Z-potential - 29 ± 0.1 mV). The NPS SiO_2 preparation was characterized by the absence of toxicity in the range from $1.5\cdot 10^{-5}$ to $5\cdot 10^{-1}$ g/l (*Escherichia coli* K12 TG1 biosensor model). The effect of NPS SiO_2 in three dosages (100, 200, 300 mg/kg of feed) on the productivity and metabolism in the carp body was studied. The optimal dosage of NPS SiO_2 was established, amounting to 200 mg/kg. When including NPS SiO_2 in a complete feed with a crude protein content of 23%, the fact of increasing the intensity of carp growth by 10.2 - 14.1% was established. At the same time, an increase in the content of total protein in the blood serum of fish and an increase in the content of a number of amino acids in the liver of carp were established. In the second experiment, the productivity and metabolism of mineral substances in carp were studied with joint feeding of NPS SiO_2 and amino acids (lysine, mytheonine, arginine).

Keywords: carp, feeding, nanoparticles, silica, chemical elements, amino acids

Acknowledgments: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, project No. 075-15-2024-550.

For citation: Miroshnikova EP, Arinzhanova MS, Arinzhanov AE, Miroshnikov SA. Use of SiO_2 nanoparticles preparation in carp feeding. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):10-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-10>

Введение.

Кремний (Si) – металлоид с атомной массой 28, является важным микроэлементом для организма человека, животных и растений. Термины «кремний» и «кремнезём» относятся к материалам природного или антропогенного происхождения, состоящим из диоксида кремния (SiO_2), который встречается в двух основных формах – кристаллической и аморфной. Частицы кремния существуют в природе в больших количествах, и признано, что на протяжении всей человеческой эволюции они были компонентами рациона питания (Jurkić LM et al., 2013; Мусабаева Л.Л. и Сизова Е.А., 2022).

Интерес к кремнию в последние годы растёт всё больше и связан с его важностью для организма (Arthur-Ataam J et al., 2019; Камирова А.М. и др., 2024; Мусабаева Л.Л. и др., 2024). В 1970 году впервые на цыплятах и крысах было установлено, что Si необходим для нормального роста и развития, а дефицит Si может привести к дефектам в костной и соединительной тканях и нарушению минерального баланса (Martin KR, 2007; Jugdaohsingh R et al., 2008). В частности, у цыплят с недостатком кремния в рационе отмечались деформации черепа, а также более короткие, тонкие и гибкие кости конечностей, которые легко ломались. У крыс также наблюдались выпадение шерсти и потеря мышечного тонуса (Nieves JW et al., 1998; Francis RM et al., 2006).

Следует отметить, что впервые биологическая роль кремния была установлена Carlisle EM (1970, 1972) в исследованиях по оценке действия этого элемента на процесс минерализации костей. В последующем эти знания были дополнены данными о действии кремнесодержащих кормовых добавок на прочность и плотность костей цыплят-бройлеров и перепелов (Merkley JW and Miller ER, 1983; Sahin K et al., 2006). Биологическое действие кремния характеризуется снижением количества остеокластов, нивелированием резорбции и потери костной массы (Rodella LF et al., 2014). Кроме того, высказано предположение, что кремний участвует в формировании костей посредством синтеза и/или стабилизации коллагена. Было обнаружено, что высокие уровни Si прочно связаны с соединительными тканями и их компонентами, а именно гликоаминогликанами, полисахаридами и мукополисахаридами (Jugdaohsingh R et al., 2007).

В организме рыб функции кремния изучены ещё далеко не в полной мере. Известно о путях поступления и круговорота кремния в организме рыб, в литературе есть указания на токсичность этого элемента (Lall SP and Kaushik SJ, 2021). Описан механизм действия кремния на опорно-двигательную систему радужной форели (Küçükbay FZ et al., 2008).

Наукой накоплен значительный багаж знаний о биодоступности кремния из различных источников, в том числе минеральных и органических соединений. В последние годы вышли в свет работы о биодоступности этого элемента из нанодисперсий (NPS) кремния. Так, наибольшее рас-

пространение на практике получил препарат NPS кремния E551, который широко применяется в различных отраслях пищевой промышленности и сельского хозяйства для сохранения качества продукта, защиты от слеживания. Детальные исследования качественных характеристик E551 подтвердили его биологическую инертность или малотоксичность (Van der Zande M et al., 2014; US Food and Drug Administration, 2018).

Как следует из анализа литературных данных, наноматериалы в силу своих уникальных свойств найдут широкое применение в аквакультуре и животноводстве. Исследования показывают, что применение NPS в кормлении повышает продуктивность и иммунный статус животных (Pieszka M et al., 2019). Несмотря на огромный потенциал NPS кремния в аквакультуре, исследования по его использованию в качестве кормовых добавок проводились только на тилапии (Bashar A et al., 2021; Alandiyjany MN et al., 2022).

Цель исследования.

Изучить биологическое и продуктивное воздействие NPS SiO₂ на модели карпа (*Cyprinus carpio*).

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Годовики карпа (*Cyprinus carpio*).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все экспериментальные методы и методики были одобрены Комитетом по этике Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН.

Схема эксперимента. Экспериментальные исследования проведены в условиях аквариумного стенда (6 аквариумов по 300 литров), оборудованного системой жизнеобеспечения. В рамках первого эксперимента методом пар-аналогов были сформированы четыре группы годовиков карпа (n=30; m=15-25 г). Карпов кормили полнорационным комбикормами с содержанием 23 % сырого протеина. В рацион рыбы I, II и III опытных групп дополнительно вводили препарат наночастиц SiO₂, в дозировке 100; 200 и 300 мг/кг корма соответственно. В исследовании использовали NPS SiO₂, синтезированные методом плазмохимического синтеза (d=126,5±9,7 нм, Z-потенциал – 29±0,1 мВ). Водные лиозолы NPS SiO₂ подвергали ультразвуковой обработке частотой 35 кГц (мощность – 300 (450) Вт, амплитуда колебаний – 10 мкм) в течение 30 мин с последующим напылением на комбикорм.

Для проведения II эксперимента методом пар-аналогов из годовиков карпа (n=25; m=45-55 г) были сформированы 4 группы. Карпов кормили полноценным комбинированным кормом, идентичным по составу корму, использованному в I эксперименте. Карпы I опытной группы дополнительно получали NPS SiO₂ (200 мг/кг); II – аминокислоты (аргинин (25 г/кг)+лизин (21 г/кг)+метионин (10 г/кг)); III – NPS SiO₂ (200 мг/кг) и аминокислоты (аргинин (25 г/кг)+лизин (21 г/кг)+метионин (10 г/кг)).

Продолжительность каждого эксперимента составила 56 суток.

Контроль над интенсивностью роста рыбы в период исследований осуществлялся путём еженедельного индивидуального взвешивания утром, до кормления (±1 г) и определения линейно-массовых показателей.

Оборудование и технические средства. Аминокислотный состав биосубстратов рыбы, гематологические показатели крови оценивались в ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<https://цкп-бст.рф/>) по стандартным методикам с помощью капиллярного электрофореза «Капель-105 М», анализатора CS-T240 («Dirui Industrial Co., Ltd.», Китай), анализатора URIT-2900 Vet Plus, («URIT Medial

Electronic Co.», Китай) с использованием коммерческих биохимических наборов для ветеринарии («Randox Laboratories Ltd», Великобритания).

Анализ элементного состава мышечной ткани проведён в лаборатории АНО «Центр биотической медицины» (г. Москва) (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22ПЯ05) методом атомно-эмиссионной и масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (Optima 2000 V, Elan 9000, «PerkinElmer» США).

Биологическая экспертиза NPS SiO₂ проводилась по Deryabin DG et al. (2012) на модели биосенсора *Escherichia coli K12 TG1*, на микропланшетном ридере TECAN Infinite F200 (Tecan Austria GmbH, Австрия).

Статистическая обработка. Данные выражены в виде средних значений $\pm$ стандартной ошибки среднего ($M \pm m$). Статистический анализ проводился с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» («Microsoft», США) с применением «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Значимость групповых различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента при $P \leq 0,05$, который считался значимым.

Результаты исследования.

В ходе исследований на модели биосенсора *Escherichia coli K12 TG1* установлено, что препарат NPS SiO₂ не проявлял токсического действия в диапазоне от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-1}$ г/л. При этом относительные значения биолюминесценции колебались в диапазоне допустимых нетоксичных показателей – в пределах от 82,4 до 104,8 %.

Введение препарата наночастиц кремнезёма в рацион карпов оказывает влияние на их продуктивность, что выражалось повышением живой массы рыбы при окончании эксперимента на 10,2 % ($P \leq 0,05$) в I, на 14,1 % ($P \leq 0,05$) – во II и на 11 % ($P \leq 0,05$) – в III опытных группах (рис. 1).

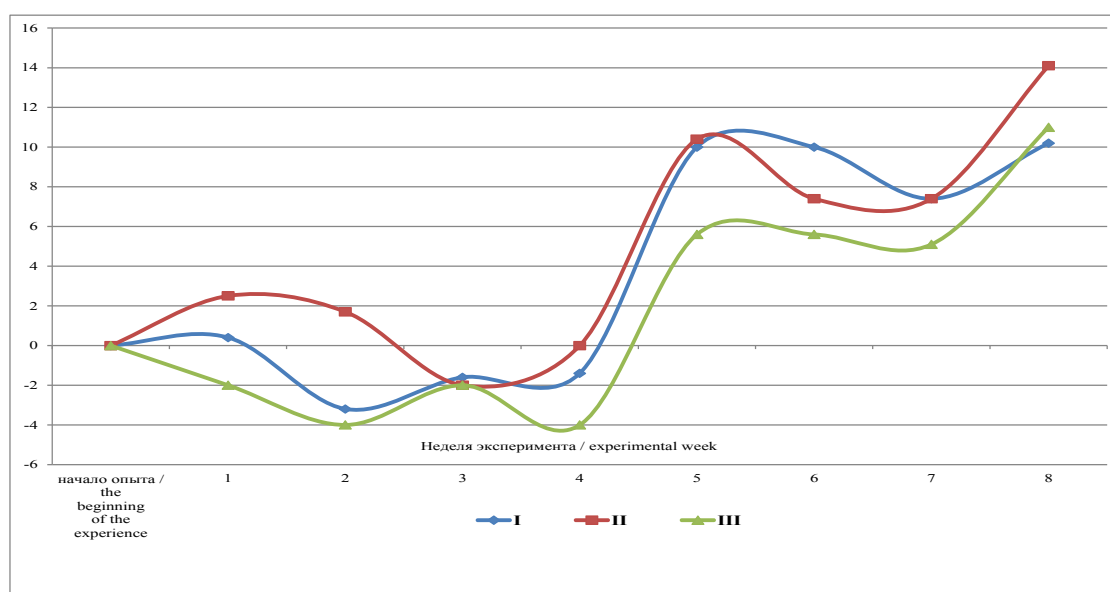


Рисунок 1. Разница по живой массе рыб опытных групп по сравнению с контрольной, % (I эксперимент)

Figure 1. Difference in live weight of fish of experimental groups compared to control group, % (I experiment)

Применение NPS SiO₂ сопровождалось изменениями уровня лимфоцитов с $83,3 \pm 3,0$ в контроле до $99,8 \pm 5,3$ ($P \leq 0,05$) в I опытной группе; $111,9 \pm 10,2$ ($P \leq 0,05$) – во II и $95,7 \pm 9,5$ ($P \leq 0,05$) – в III опытных группах; моноциты: $2,1 \pm 0,06$; $2,2 \pm 0,2$; $3,4 \pm 0,4$ ($P \leq 0,05$); $2,7 \pm 0,35$ ($P \leq 0,05$) соответственно.

В ходе исследований был установлен рост концентрации гемоглобина в крови карпов при применении NPS SiO₂ с 95±3,0 г/л в контроле до 102±3,5 (P≤0,05) в I опытной группе; 119±4,7 (P≤0,01) – во II и 113±2,8 (P≤0,05) – в III опытных группах.

Скармливание препарата наночастиц кремнезёма сопровождалось достоверным повышением содержания общего белка в сыворотке крови карпов I опытной группы на 6,89; II – на 5,44; III – на 4,13 г/л.

В печени подопытной рыбы нами отмечались достоверные изменения в содержании большинства аминокислот (табл. 1).

Таблица 1. Концентрация аминокислот в печени подопытных карпов, % (I эксперимент)

Table 1. Concentration of amino acids in the liver of experimental carps, % (I experiment)

Аминокислота / Amino acid	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
Аргинин / Arginine	1,00 ± 0,01	0,98 ± 0,006	0,88 ± 0,006	1,04 ± 0,02
Гистидин / Histidine	0,81 ± 0,03*	0,78 ± 0,03*	0,69 ± 0,02	0,71 ± 0,02
Глицин / Glycine	2,12 ± 0,06*	2,16 ± 0,07*	1,99 ± 0,05	1,96 ± 0,05
Лейцин + изолейцин / Leucine + Isoleucine	4,88 ± 0,3*	4,93 ± 0,3*	4,52 ± 0,2	4,28 ± 0,1
Лизин / Lysine	0,93 ± 0,01	1,00 ± 0,02	0,87 ± 0,01	0,89 ± 0,01
Валин / Valine	2,34 ± 0,04*	2,40 ± 0,05**	2,22 ± 0,03	2,13 ± 0,03
Тирозин / Tyrosine	1,19 ± 0,02***	1,22 ± 0,03***	1,09 ± 0,04	1,03 ± 0,01
Метионин / Methionine	1,04 ± 0,04**	1,03 ± 0,03**	0,97 ± 0,01*	0,88 ± 0,01
Пролин / Proline	1,69 ± 0,02*	1,67 ± 0,01*	1,65 ± 0,01*	1,56 ± 0,01
Фенилаланин / Phenylalanine	1,54 ± 0,03**	1,57 ± 0,04**	1,42 ± 0,03	1,35 ± 0,03

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – P≤0,05; ** – P≤0,01; *** – P≤0,001

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – P≤0.05; ** – P≤0.01; *** – P≤0.001

Введение NPS SiO₂ в рацион оказало влияние на содержание химических элементов в филе карпов (табл. 2).

Таблица 2. Содержание макроэлементов в филе карпов, мкг/г (I эксперимент)

Table 2. Macronutrient content in carp fillets, mcg/g (I experiment)

Элемент / Element	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
Ca	285 ± 29*	297 ± 20*	428 ± 53***	209 ± 21
K	4849 ± 485	4991 ± 500	4708 ± 468	5565 ± 556
Na	521 ± 52	589 ± 57	442 ± 46*	574 ± 55
Mg	160 ± 16	171 ± 17	172 ± 18	185 ± 18
P	1661 ± 165*	1895 ± 190	2273 ± 221	2139 ± 214

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – P≤0,05; *** – P≤0,001

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – P≤0.05; *** – P≤0.001

В филе карпов I опытной группы констатировали достоверное повышение содержание кальция на 36,4 %, что имело место на фоне снижения пула фосфора на 22,4 % относительно контроля. В филе карпов III опытной группы зафиксировано повышение содержания кальция в 2 раза. Действующий фактор оказал непосредственное влияние и на обмен жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов (табл. 3).

Таблица 3. Концентрация жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов в филе подопытных карпов, мкг/г (I эксперимент)
Table 3. Concentration of vital and conditionally vital chemical trace elements in fillets of experimental carps, mcg/g (I experiment)

Элемент / Element	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
Si	1,4 ± 0,14	1,53 ± 0,11*	1,55 ± 0,12*	1,32 ± 0,13
Se	0,13 ± 0,006*	0,13 ± 0,005*	0,15 ± 0,018	0,16 ± 0,009
Zn	12,1 ± 0,22**	13,01 ± 0,05*	13,22 ± 0,43	13,82 ± 0,10
Cu	0,94 ± 0,12	1,08 ± 0,11	0,95 ± 0,11	1,15 ± 0,11
Fe	6,01 ± 0,6*	4,98 ± 0,5	4,7 ± 0,5	4,55 ± 0,46
Co	0,002 ± 0,0003	0,002 ± 0,0004	0,002 ± 0,0004	0,002 ± 0,0005
Mn	0,31 ± 0,037*	0,25 ± 0,030	0,39 ± 0,047**	0,22 ± 0,026
I	0,05 ± 0,007**	0,05 ± 0,006**	0,06 ± 0,008	0,07 ± 0,001
B	0,76 ± 0,091	0,82 ± 0,098	0,77 ± 0,092	0,67 ± 0,08
V	0,003 ± 0,0006	0,003 ± 0,0005	0,005 ± 0,001*	0,003 ± 0,0005

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$

Как следует из полученных результатов в филе карпов I опытной группы отмечалось достоверное повышение содержание марганца на 40,9 % и железа – на 32,1 %. При этом в этой группе происходило трудно объяснимое уменьшение концентрации йода, селена и цинка на 28,6; 18,8 и 9,16 % соответственно. Аналогичное снижение пулов этих элементов в филе карпов II опытной группы составило 28,6; 18,8 и 2,3 %.

Анализ содержания токсических элементов в филе не выявил негативного воздействия действующего фактора на рыб (табл. 4).

Таблица 4. Концентрация токсических элементов в филе подопытных карпов, мкг/г (I эксперимент)

Table 4. Concentration of toxic elements in fillets of experimental carps, mcg/g (I experiment)

Элемент / Element	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
As	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,002
Al	1,7 ± 0,17	2,33 ± 0,24	1,39 ± 0,14	1,56 ± 0,16
Sn	0,008 ± 0,0017	0,005 ± 0,0009	0,005 ± 0,0008	0,005 ± 0,0001
Sr	0,71 ± 0,085	0,54 ± 0,065	1,38 ± 0,33*	0,73 ± 0,088
Cd	0,002 ± 0,0004	0,001 ± 0,0002	0,003 ± 0,0006*	0,001 ± 0,0003
Hg	0,05 ± 0,007	0,04 ± 0,006	0,04 ± 0,005	0,03 ± 0,004
Pb	0,02 ± 0,003	0,01 ± 0,002*	0,007 ± 0,0014**	0,03 ± 0,006

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$

В ходе второго эксперимента наибольшая живая масса карпа, на 13,7 % ($P \leq 0,05$) превышающая уровень контроля, установлена при скормливании препарата наночастиц кремнезёма в дозе 200 мг/кг корма (рис. 2).

Живая масса при совместном использовании комплекса аминокислот и NPS SiO₂ только на 6,6 % ($P \leq 0,05$) превзошла контроль.

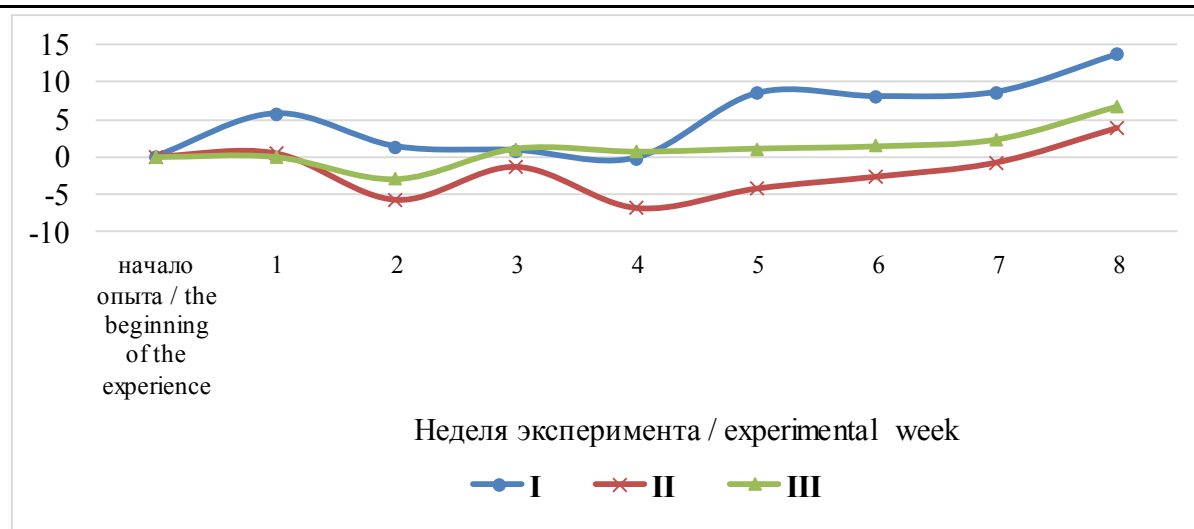


Рисунок 2. Разница по живой массе рыб опытных групп по сравнению с контрольной, % (II эксперимент)
Figure 2. Difference in live weight of fish of experimental groups compared to control group, % (II experiment)

Скармливание наночастиц кремнезёма сопровождалось повышением концентрации гемоглобина в крови карпов I, II и III опытных групп на 26,5 ($P \leq 0,001$), 20,9 ($P \leq 0,001$) и 12,7 % ($P \leq 0,01$) соответственно.

В ходе исследований нами констатировано повышение концентрации общего белка в сыворотке крови карпов опытных групп на 19,4 % ($P \leq 0,01$) в I; 4,0 – во II и 6,8 % – в III опытных группах.

Анализ аминокислотного состава печени подопытных карпов во II эксперименте в целом подтвердил выявленный в I эксперименте факт повышения уровня незаменимых и заменимых аминокислот (табл. 5).

Таблица 5. Концентрация аминокислот в печени подопытных карпов (II эксперимент), %
Table 5. Concentration of amino acids in the liver of experimental carps (II experiment), %

Аминокислота / <i>Amino acid</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная / <i>experimental</i>			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
Аргинин / <i>Arginine</i>	1,02 ± 0,01	1,48 ± 0,03***	1,25 ± 0,03***	1,01 ± 0,01
Гистидин / <i>Histidine</i>	0,81 ± 0,04*	0,73 ± 0,03	0,82 ± 0,04*	0,69 ± 0,02
Глицин / <i>Glycine</i>	2,19 ± 0,06*	2,23 ± 0,08*	2,25 ± 0,09*	1,93 ± 0,04
Лейцин + изолейцин / <i>Leucine + Isoleucine</i>	4,96 ± 0,28*	4,67 ± 0,33	4,98 ± 0,42*	4,25 ± 0,12
Лизин / <i>Lysine</i>	0,98 ± 0,02	1,23 ± 0,03***	1,15 ± 0,02***	0,87 ± 0,02
Метионин / <i>Methionine</i>	1,05 ± 0,03**	1,03 ± 0,03**	1,06 ± 0,04**	0,86 ± 0,02
Валин / <i>Valine</i>	2,45 ± 0,04**	2,50 ± 0,05**	2,44 ± 0,04**	2,11 ± 0,05
Тирозин / <i>Tyrosine</i>	1,73 ± 0,05*	1,14 ± 0,02***	1,22 ± 0,04***	1,01 ± 0,01
Треонин / <i>Threonine</i>	1,26 ± 0,04***	1,88 ± 0,06**	1,91 ± 0,07**	1,61 ± 0,05
Фенилаланин / <i>Phenylalanine</i>	1,59 ± 0,05**	1,44 ± 0,04	1,60 ± 0,05**	1,34 ± 0,04
Пролин / <i>Proline</i>	1,71 ± 0,05*	1,83 ± 0,04**	1,86 ± 0,06**	1,55 ± 0,04

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$

В мышечной ткани рыб опытных групп установлено повышение содержания кальция на 42,2 % ($P \leq 0,01$) во II опытной и снижение концентрации натрия на 25,3 % ($P \leq 0,05$) – в III опытной группах (табл. 6).

Таблица 6. Концентрация макроэлементов в филе подопытных карпов, мкг/г (II эксперимент)
Table 6. Concentration of macronutrients in fillets of experimental carps, mcg/g (II experiment)

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная / <i>experimental</i>			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
Ca	200 ± 26	293 ± 40**	213 ± 22	206 ± 19
K	4897 ± 489	4446 ± 445	4871 ± 469	5559 ± 548
Na	578 ± 52	501 ± 53	429 ± 44*	574 ± 51
Mg	174 ± 16	168 ± 17	171 ± 18	179 ± 19
P	1911 ± 193	1983 ± 196	2115 ± 212	2143 ± 221

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$ Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$

В ходе оценки концентрации жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов в филе карпов выявлен факт достоверного повышения содержания кремния в биосубстрате рыбы I и III опытных групп (табл. 7).

Таблица 7. Концентрация жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов в филе подопытных карпов, мкг/г (II эксперимент)
Table 7. Concentration of vital and conditionally vital chemical trace elements in fillets of experimental carps, mcg/g (II experiment)

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная / <i>experimental</i>			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
Si	1,54 ± 0,14*	1,2 ± 0,13	1,53 ± 0,12*	1,29 ± 0,11
Se	0,13 ± 0,003*	0,13 ± 0,008*	0,12 ± 0,011*	0,15 ± 0,004
Zn	12,74 ± 0,09*	12,7 ± 0,18*	12,5 ± 0,25*	13,25 ± 0,11
Cu	1,13 ± 0,11	0,85 ± 0,10*	1,21 ± 0,12	1,17 ± 0,12
Fe	4,92 ± 0,47	3,49 ± 0,4*	3,78 ± 0,35	4,61 ± 0,43
Co	0,002 ± 0,0004	0,001 ± 0,0003	0,002 ± 0,0004	0,002 ± 0,0005
Cr	0,03 ± 0,006	0,03 ± 0,005	0,06 ± 0,009*	0,03 ± 0,005
Mn	0,23 ± 0,030	0,30 ± 0,036*	0,26 ± 0,031	0,21 ± 0,023
I	0,05 ± 0,005*	0,04 ± 0,007*	0,05 ± 0,009*	0,06 ± 0,002
B	0,78 ± 0,096	0,64 ± 0,076	0,76 ± 0,091	0,71 ± 0,08
Li	0,02 ± 0,0035	0,02 ± 0,0025	0,03 ± 0,0037	0,02 ± 0,0038
Ni	0,04 ± 0,006	0,05 ± 0,008*	0,04 ± 0,006	0,03 ± 0,004
V	0,004 ± 0,0006	0,004 ± 0,0008	0,003 ± 0,0005	0,003 ± 0,0005

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$ Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0.05$

В филе карпов II опытной группы нами отмечалось достоверное снижение содержание меди и железа, тогда как отмечался рост марганца и никеля.

В филе карпов I, II и III опытных групп отмечалось достоверное ($P \leq 0,05$) снижение концентрации цинка на 3,8; 4,2; 5,7 %, селена – на 13,3; 13,3; 20 % и йода – на 16,7; 33,3; 16,7 % соответственно.

Достоверные различия между группами были выявлены нами и по уровню токсических элементов (табл. 8).

Таблица 8. Концентрация токсических элементов в филе подопытных карпов, мкг/г
(II эксперимент)

Table 8. Concentration of toxic elements in fillets of experimental carps, mcg/g (II experiment)

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
As	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,002
Al	2,17 ± 0,34	1,02 ± 0,11	2,22 ± 0,21*	1,6 ± 0,16
Sn	0,005 ± 0,0008	0,004 ± 0,0007	0,004 ± 0,0008	0,004 ± 0,0001
Sr	0,51 ± 0,068*	1,47 ± 0,15*	0,71 ± 0,086	0,75 ± 0,096
Pb	0,01 ± 0,001**	0,02 ± 0,002	0,03 ± 0,004	0,03 ± 0,005
Cd	0,001 ± 0,0003	0,0006 ± 0,00019	0,001 ± 0,0003	0,001 ± 0,0002
Hg	0,04 ± 0,009	0,03 ± 0,007	0,03 ± 0,008	0,04 ± 0,004

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: ** – $P \leq 0,05$; * – $P \leq 0,01$ Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$

Во мышечной ткани карпов I опытной группы обнаружено достоверное снижение стронция на 32 % ($P \leq 0,05$) и свинца – на 66,7 % ($P \leq 0,01$) относительно контроля.

Обсуждение полученных результатов.

При планировании исследований мы исходили из того, что кремнийсодержащие NPS одобрены для использования в пищевой и фармацевтической промышленности (Knight D et al., 2015; Karavolos M and Holban A, 2016; da Silva AB et al., 2020). Очевидно, что это открывает новые перспективы для применения NPS SiO₂ в рыбоводстве. Между тем представление о биологической роли кремния в организме – далеко не полное (Götz W et al., 2019), что сдерживает практику применения кремния и его соединений в аквакультуре. В литературе есть данные, указывающие на эффективность NPS SiO₂ при выращивании нильской тилпии (Alandiyjany MN et al., 2022). Однако механизмы действия кремнийсодержащих наночастиц на организм рыбы и водные экосистемы пока не ясны, что не позволяет в полной мере оценить их влияние на гидросферу. По некоторым оценкам объёмы выбросов в окружающую среду техногенного кремния, содержащего NPS, составляют 83 300 метрических тонн, из которых, очевидно, не менее 2 100 попадают в водные системы (Keller AA et al., 2013).

В первом эксперименте при выращивании карпа на рационах с содержанием сырого протеина 23 % скармливание NPS SiO₂ сопровождалось повышением интенсивности роста рыбы на 10,2-14,1 %.

Анализируя полученные результаты можно прийти к выводу, что продуктивное действие NPS SiO₂ на организм рыбы определяется целым рядом факторов, в числе которых действие на процессы переваривания корма и пищеварительную систему; синтез и обмен белка; обмен химических элементов (снижение пула токсических элементов и нивелирование эффектов «нагруженного метаболизма»).

Действие NPS SiO₂ на организм рыбы реализуется с изменением метаболитов плазмы крови. В исследованиях на крысах (Landsiedel R et al., 2022) показаны изменения значений 18 из 231 оцениваемых метаболитов крови на фоне применения NPS SiO₂. Это может быть связано с влиянием NPS SiO₂ на усвоение целого ряда веществ, в том числе железа, цинка, глюкозы и липидов, описанным другими авторами (Guo Z et al., 2018).

В наших исследованиях мы констатировали факт достоверного увеличения содержания общего белка в сыворотке крови карпов на 4,13-6,89 г/л. Ранее стимулирующее действие добавок кремния на белковый обмен и синтез коллагена было отмечено в ряде работ (Reffitt DM et al., 2003;

Nakhon S et al., 2019). Анализ экспрессии генов показал, что NPS SiO₂ изменяют уровни экспрессии транспортных белков, что сопряжено с обменом аминокислот (Guo Z et al., 2018).

Как следует из полученных результатов, препарат NPS SiO₂ оказывает значительное влияние на белковый обмен, что, в том числе, выражалось увеличением содержания в печени опытной рыбы отдельных аминокислот, метионина и пролина.

Механизм этого явления связан со стимулированием кремнием роста костной и хрящевой тканей (Pietak AM et al., 2007), пролиферации остеобластов и уселением экспрессии гена коллагена I типа (Shie MY et al., 2011), что сопровождается активизацией синтеза остеобластами белков со значительным содержанием пролина (Shen L et al., 2021). Поглощение и встраивание пролина в белок увеличивается во время дифференцировки остеобластов. Аналогичные результаты по связи активного роста костной и хрящевой тканей с потребностью в пролине показаны в других исследованиях (Shen L et al., 2022).

Факт повышения концентрации метионина в печени рыбы можно объяснить данными о роли метионина как «метаболита роста», иерархически организующего и изменяющего клеточный метаболизм (Walvekar AS et al., 2018).

Механизм, лежащий в основе наблюдаемых биологических эффектов кремния, вероятно, может быть объяснён и его взаимодействием с другими элементами. В наших исследованиях введение NPS SiO₂ в рацион карпов сопровождалось повышением концентрации кремния в мышечной ткани рыбы на 15,9-17,4 % ($P \leq 0,05$), кальция – на 15,9-36,4 % ($P \leq 0,05$). Ранее аналогичные результаты получены Najda J с коллегами (1993).

Определённый интерес представляют данные, выявленные нами при оценке действия кремния на обмен токсических химических элементов в организме карпа. В данном случае отмечается очевидный антагонизм кремния по отношению к обмену стронция и свинца, что выражалось снижением обменных пулов этих элементов на 26 % ($P \leq 0,05$) и 66,7 % ($P \leq 0,01$) соответственно при дозировке NPS SiO₂ 200 мг/кг. Ранее сходные результаты были получены в исследованиях других учёных (Liu J et al., 2015; Naeem A et al., 2018). Опираясь на эти факты и с учётом результатов ранее проведённых исследований о зависимости продуктивности животных от пулов токсических элементов в организме (Kalashnikov V et al., 2018; Miroshnikov S et al., 2019), можно предположить, что в наших исследованиях одним из факторов повышения продуктивности в опытных группах при даче NPS SiO₂ стало нивелирование пагубного действия токсических элементов на обмен веществ и энергии. Это явление ранее нами описано как «нагруженный метаболизм» (Miroshnikov S et al., 2021).

В наших исследованиях установлен факт трудно объяснимого снижения содержания в мышечной ткани карпа цинка, селена и йода на 9,16 % ($P \leq 0,01$), 18,8 % ($P \leq 0,05$) и 28,6 % ($P \leq 0,01$) уже при минимальной дозировке NPS SiO₂ (100 мг/кг) в I опытной группе.

Очевидно, что механизмы биологического действия NPS SiO₂ на организм карпа определяются наноструктурной природой препарата диоксида кремния. Ранее было показано что NPS проходят между эпителиальными клетками пищеварительного тракта посредством параклеточного транспорта, а также путём эндоцитоза бокаловидными и М-клетками (Halamoda-Kenzaoui B et al., 2017). После попадания в клетки NPS могут покидать лизосомальный или эндосомальный компартмент и попадать в цитозоль (Vita AA et al., 2019).

Дальнейшая судьба и влияние NPS SiO₂ на морфофункциональные особенности кишечника животных остаются до конца не ясными. Очевидно, что нетоксические препараты NPS SiO₂ не оказывают влияния на кишечник (Kim YR et al., 2014; Yoshida T et al., 2014).

Наночастицы, проходя кишечный барьер, оказывают многостороннее действие на организм рыбы. Одним из таких действий в наших исследованиях стало повышение концентрации гемоглобина в крови карпов при применении NPS SiO₂ на 7,4 % ($P \leq 0,05$) в I опытной группе; на 25,3 % – во II ($P \leq 0,01$) и на 18,9 % ($P \leq 0,01$) – в III опытных группах. Ранее установлено, что взаимодействие гемоглобина с наночастицами кремния сопровождается повышением сродства гемоглобина к кис-

лороду (Devineau S et al., 2017), что было обусловлено изменениями в структуре гемоглобина (Devineau S et al., 2018).

NPS SiO₂ фагоцитируются макрофагами, что запускает воспалительные реакции (Kusaka T et al., 2014). Эти токсические эффекты, особенно в дыхательных путях, могут вызывать воспаление (Han H et al., 2016). Однако для NPS SiO₂ в качестве пищевой добавки не было оценено никаких признаков токсичности (Younes M et al., 2018).

Мы в своих исследованиях констатировали факт увеличения количества лимфоцитов при скормливаниях рыбе NPS SiO₂ на 14,9-34,3 %; моноцитов – на 4,7-61,9 %, в зависимости от дозировки. Аналогичные результаты при оценке действия кремния получены другими авторами (Seaborn CD et al., 2002).

NPS SiO₂ напрямую связываются с комплексом Т-клеточных рецепторов и активируют Т-клетки иммунной системы и их последующую передачу сигналов (Vis B et al., 2018; Vis B et al., 2020).

Как следует из ранее проведённых нами исследований, цепь взаимодействия «NPS-макрофаги» запускает целый каскад биохимических реакций, которые на модели кур сопровождаются изменениями в обмене белка с активизацией синтеза аргинина (Miroshnikov SA et al., 2015). Очевидно, что данный процесс объясняется активизацией синтеза NO с последующей стимуляцией синтеза аргинина (Huang CC et al., 2008). В связи аргинин опосредовано способен стимулировать рост животных через активизацию белкового обмена и перестройку метаболизма (McKnight JR et al., 2010).

Учитывая это и опираясь на более ранние наши исследования по комплексному применению препаратов наночастиц металлов и аминокислот (лизин, метионин, аргинин) (Miroshnikov SA et al., 2017); NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, метионин, аргинин) (Мирошников С.А. и др., 2020; Мустафин Р.З. и Мустафина А.С., 2021; Mustafina AS et al., 2021), нами был запланирован и проведён второй эксперимент по комплексному применению NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, метионин, аргинин) при выращивании карпа.

Как следует из полученных данных, дополнительное введение аминокислот не позволило повысить эффективность NPS SiO₂. Таким образом, введение NPS SiO₂ сопровождалось увеличением живой массы карпов на 13,7 % ($P \leq 0,05$), тогда как при комплексном применении NPS SiO₂ и аминокислот – только на 6,6 % ($P \leq 0,05$). Относительно низкое продуктивное действие совместного применения NPS SiO₂ и аминокислот было сопряжено с относительно низким (29,23-30,02 г/л) содержанием общего белка в сыворотке крови карпа против 33,54 г/л в I опытной группе. Анализ аминокислотного состава печени подопытных карпов во II эксперименте в целом подтвердил результаты I опыта.

Установленное снижение содержания меди и железа в мышечной ткани рыб II опытной группы связано с антиоксидантными свойствами используемых аминокислот, способных хелатировать ионы железа и меди, образуя комплексные соединения, которые легко выводятся из организма через почки и печень (Mitchell GV and Jenkins MY et al., 1983; Wu P et al., 2017; Wang Q et al., 2021). Медь и железо в мышечной ткани рыб необходимы для поддержания целостности клеток и защиты от свободных радикалов (Wu M et al., 2018; Li X et al., 2021).

Скармливание NPS SiO₂ сопровождалось повышением концентрации гемоглобина в крови карпа с $97,6 \pm 5,7$ г/л в контрольной группе до $123,5 \pm 10,1$ г/л ($P \leq 0,001$) в I опытной, $117 \pm 9,3$ ($P \leq 0,001$) – во II и $108 \pm 9,5$ ($P \leq 0,01$) – в III опытных группах.

Во II эксперименте подтверждён факт снижения содержания в мышечной ткани карпа цинка, селена и йода при скармливании NPS SiO₂. Очевидно, обмен кремния и этих микроэлементов связан между собой.

Заключение.

Препарат NPS SiO₂, полученный методом плазмохимического синтеза ($d=126,5 \pm 9,7$ нм, Z-потенциал – $29 \pm 0,1$ мВ), с отсутствием токсичности в диапазоне от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-1}$ г/л при включении в полнорационный комбикорм с содержанием сырого протеина 23 % характеризуется ростостимулирующим действием на организм карпа. Ростостимулирующий эффект NPS SiO₂ сопряжён с

изменением течения белкового обмена – увеличением содержания общего белка в сыворотке крови и ростом содержания аминокислот в печени карпа. Сочетанное применение в кормлении карпа добавок NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, митеонин, аргинин) не позволяет повысить ростостимулирующее действие NPS SiO₂.

Список источников

1. Мирошников С.А., Мустафина А.С., Губайдуллина И.З. Оценка действия ультрадисперсного оксида кремния на организм цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 1. С. 20-32. [Miroshnikov SA, Mustafina AS, Gubaidullina IZ. Evaluation of action of ultrafine silicon oxide on the body of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(1):20-32. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-1-20
2. Мусабаева Л.Л., Сизова Е.А. Эффективность применения в кормлении цыплят-бройлеров кремнийсодержащей добавки «Silaccess» // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 1. С. 82-91. [Musabayeva LL, Sizova EA. The effectiveness of silicon-containing additive "Silaccess" in feeding broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):82-91. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-82
3. Мусабаева Л.Л., Сизова Е.А., Нечитайло К.С. Сравнительная оценка влияния кормовой добавки Silaccess на основе льняного жмыха и цеолита на переваримость и морфологические показатели крови цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107. № 1. С. 118-127. [Musabaeva LL, Sizova EA, Nechitailo KS. Comparative assessment of the effect of the feed additive Silaccess based on flaxseed cake and zeolite on digestibility and morphological parameters of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2024;107(1):118-127. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-118
4. Мустафин Р.З., Мустафина А.С. Определение рациональной дозы диоксида кремния в кормлении цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 1. С. 8-19. [Mustafin RZ, Mustafina AS. Determination of the rational dose of silicon dioxide in the feeding of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(1):8-19. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-104-1-8
5. Органоминеральный комплекс на основе ультрадисперсных кремнийсодержащих частиц, как модулятор микробиома желудочно-кишечного тракта крупного рогатого скота / А.М. Камирова, Е.А. Сизова, А.П. Иванищева, Д.Е. Шошин, Е.В. Яушева // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 2. С. 13-26. [Kamirova AM, Sizova EA, Ivanishcheva AP, Shoshin DE, Yausheva EV. The organic mineral complex based on ultrafine silicon-containing particles as a microbiome modulator of gastrointestinal tract of cattle. Animal Husbandry and Fodder Production. 2024;107(2):13-26. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-2-13
6. Alandiyjany MN, Kishawy ATY, Abdelfattah-Hassan A, Eldoumani H, Elazab ST, El-Mandrawy SAM, Saleh AA, ElSawy NA, Attia YA, Arisha AH, Ibrahim D. Nano-silica and magnetized-silica mitigated lead toxicity: Their efficacy on bioaccumulation risk, performance, and apoptotic targeted genes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquat Toxicol. 2022;242:106054. doi: 10.1016/j.aquatox.2021.106054
7. Arthur-Ataam J, Bideaux P, Charrabi A, Sicard P, Fromy B, Liu K, Eddahibi S, Pasqualin C, Jouy N, Richard S, Virsolvy A. Dietary supplementation with silicon-enriched spirulina improves arterial remodeling and function in hypertensive rats. Nutrients. 2019;11(11):2574. doi: 10.3390/nu11112574
8. Bashar A, Hasan NA, Haque MM, Rohani MF and Hossain MS. Effects of dietary silica nanoparticle on growth performance, protein digestibility, hematology, digestive morphology, and muscle composition of Nile tilapia, *Oreochromis Niloticus*. Front Mar Sci. 2021;8:706179. doi: 10.3389/fmars.2021.706179

9. Carlisle EM. Silicon: a possible factor in bone calcification. *Science*. 1970;167(3916):279-280. doi: 10.1126/science.167.3916.279
10. Carlisle EM. Silicon: an essential element for the chick. *Science*. 1972;178(4061):619-621. doi: 10.1126/science.178.4061.619
11. da Silva AB, Minitier M, Thom W, Hewitt RE, Wills J, Jugdaohsingh R, Powell JJ. Gastrointestinal absorption and toxicity of nanoparticles and microparticles: Myth, reality and pitfalls explored through titanium dioxide. *Curr Opin Toxicol*. 2020;19:112-120. doi: 10.1016/j.cotox.2020.02.007
12. Deryabin DG, Aleshina ES, Efremova LV. Application of the inhibition of bacterial bioluminescence test for assessment of toxicity of carbon-based nanomaterials. *Microbiology*. 2012;81(4):492-497. doi: 10.1134/S0026261712040042
13. Devineau S, Kiger L, Galacteros F, Baudin-Creuza V, Marden M, Renault JP, Pin S. Manipulating hemoglobin oxygenation using silica nanoparticles: a novel prospect for artificial oxygen carriers. *Blood Adv*. 2018;2(2):90-94. doi: 10.1182/bloodadvances.2017012153
14. Devineau S, Zargarian L, Renault JP, Pin S. Structure and function of adsorbed hemoglobin on silica nanoparticles: relationship between the adsorption process and the oxygen binding properties. *Langmuir*. 2017;33(13):3241-3252. doi: 10.1021/acs.langmuir.6b04281
15. Francis RM, Anderson FH, Patel S, Sahota O, van Staa TP. Calcium and vitamin D in the prevention of osteoporotic fractures. *QJM: An International Journal of Medicine*. 2006;99(6):355-363. doi: 10.1093/qjmed/hcl031
16. Götz W, Tobiasch E, Witzleben S, Schulze M. Effects of silicon compounds on biomineralization, osteogenesis, and hard tissue formation. *Pharmaceutics*. 2019;11(3):117. doi: 10.3390/pharmaceutics11030117
17. Guo Z, Martucci NJ, Liu Y, Yoo E, Tako E, Mahler GJ. Silicon dioxide nanoparticle exposure affects small intestine function in an in vitro model. *Nanotoxicology*. 2018;12(5):485-508. doi: 10.1080/17435390.2018.1463407
18. Halamoda-Kenzaoui B, Ceridono M, Urbán P, Bogni A, Ponti J, Gioria S, Kinsner-Ovaskainen A. The agglomeration state of nanoparticles can influence the mechanism of their cellular internalisation. *J Nanobiotechnology*. 2017;15(1):48. doi: 10.1186/s12951-017-0281-6
19. Han H, Park YH, Park HJ, Lee K, Um K, Park JW, Lee JH. Toxic and adjuvant effects of silica nanoparticles on ovalbumin-induced allergic airway inflammation in mice. *Respir Res*. 2016;17(1):60. doi: 10.1186/s12931-016-0376-x
20. Huang CC, Tsai SC, Lin WT. Potential ergogenic effects of L-arginine against oxidative and inflammatory stress induced by acute exercise in aging rats. *Exp Gerontol*. 2008;43(6):571-577. doi: 10.1016/j.exger.2008.03.002
21. Jugdaohsingh R, Calomme MR, Robinson K, Nielsen F, Anderson SH, D'Haese P, Geusens P, Loveridge N, Thompson RP, Powell JJ. Increased longitudinal growth in rats on a silicon-depleted diet. *Bone*. 2008;43(3):596-606. doi: 10.1016/j.bone.2008.04.014
22. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):99-110.
23. Jurkić LM, Cepanec I, Pavelić SK, Pavelić K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy. *Nutr Metab (Lond)*. 2013;10(1):2. doi: 10.1186/1743-7075-10-2
24. Kalashnikov V, Zajcev A, Atroshchenko M, Miroshnikov S, Frolov A, Zav'yalov O, Kalinkova L, Kalashnikova T. The content of essential and toxic elements in the hair of the mane of the trotter horses depending on their speed. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(22):21961-21967. doi: 10.1007/s11356-018-2334-2
25. Karavolos M, Holban A. Nanosized drug delivery systems in gastrointestinal targeting: interactions with microbiota. *Pharmaceutics (Basel)*. 2016;9(4):62. doi: 10.3390/ph9040062
26. Keller AA, McFerran S, Lazareva A, Suh S. Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *J Nanopart Res*. 2013;15(6):1692. doi: 10.1007/s11051-013-1692-4

27. Kim YR, Lee SY, Lee EJ, Park SH, Seong NW, Seo HS, Shin SS, Kim SJ, Meang EH, Park MK, Kim MS, Kim CS, Kim SK, Son SW, Seo YR, Kang BH, Han BS, An SS, Lee BJ, Kim MK. Toxicity of colloidal silica nanoparticles administered orally for 90 days in rats. *Int J Nanomedicine*. 2014;9(Suppl 2):67-78. doi: 10.2147/IJN.S57925
28. Knight D, Ehrlich R, Fielding K, Jeffery H, Grant A, Churchyard G. Trends in silicosis prevalence and the healthy worker effect among gold miners in South Africa: a prevalence study with follow up of employment status. *BMC Public Health*. 2015;15:1258. doi: 10.1186/s12889-015-2566-8
29. Küçükbay FZ, Yazlak H, Sahin N, Akdemir F, Orhan C, Juturu V, Sahin K. Effects of dietary arginine silicate inositol complex on mineral status in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Nutrition*. 2008;14(3):257-262. doi: 10.1111/j.1365-2095.2007.00526.x
30. Kusaka T, Nakayama M, Nakamura K, Ishimiya M, Furusawa E, Ogasawara K. Effect of silica particle size on macrophage inflammatory responses. *PLoS One*. 2014;9(3):e92634. doi: 10.1371/journal.pone.0092634
31. Lall SP, Kaushik SJ. Nutrition and metabolism of minerals in fish. *Animals (Basel)*. 2021;11(9):2711. doi: 10.3390/ani11092711
32. Landsiedel R, Hahn D, Ossig R, Ritz S, Sauer L, Buesen R, Rehm S, Wohlleben W, Groeters S, Strauss V, Sperber S, Wami H, Dobrindt U, Prior K, Harmsen D, van Ravenzwaay B, Schneckeburger J. Gut microbiome and plasma metabolome changes in rats after oral gavage of nanoparticles: sensitive indicators of possible adverse health effects. *Part Fibre Toxicol*. 2022;19(1):21. doi: 10.1186/s12989-022-00459-w
33. Li X, Han T, Zheng S, Wu G. Nutrition and functions of amino acids in aquatic crustaceans. In: Wu G, editor. *Amino Acids in Nutrition and Health. Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer, Cham. 2021;1285:169-198. doi: 10.1007/978-3-030-54462-1_9
34. Liu J, Cai H, Mei C, et al. Effects of nano-silicon and common silicon on lead uptake and translocation in two rice cultivars. *Front Environ Sci Eng*. 2015;9:905-911. doi: 10.1007/s11783-015-0786-x
35. Martin KR. The chemistry of silica and its potential health benefits. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):94-7.
36. McKnight JR, Satterfield MC, Jobgen WS, Smith SB, Spencer TE, Meininger CJ, McNeal CJ, Wu G. Beneficial effects of L-arginine on reducing obesity: potential mechanisms and important implications for human health. *Amino Acids*. 2010;39(2):349-357. doi: 10.1007/s00726-010-0598-z
37. Merkley JW, Miller ER. The effect of sodium fluoride and sodium silicate on growth and bone strength of broilers. *Poult Sci*. 1983;62(5):798-804. doi: 10.3382/ps.0620798
38. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
39. Miroshnikov S, Zavyalov O, Frolov A, Sleptsov I, Sirazetdinov F, Poherukhin M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2019;26(18):18554-18564. doi: 10.1007/s11356-019-05163-5
40. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Miroshnikova EP, Levahin VI. Comparative assessment of effect of cooper nano and microparticles in chicken. *Oriental Journal of Chemistry*. 2015;31(4):2327-2336. doi: 10.13005/ojc/310461
41. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Kosyan DB, Donnik IM. Research of opportunities for using iron nanoparticles and amino acids in poultry nutrition. *International Journal of GEOMATE*. 2017;13(40):124-131. doi: 10.21660/2017.40.99216
42. Mitchell GV, Jenkins MY. Effect of excess L-lysine on rat growth and on plasma and tissue concentrations of copper, iron and zinc. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*. 1983;29(6):709-715. doi: 10.3177/jnsv.29.709

43. Mustafina AS, Sizova EA, Kholodilina TN, Mustafin RZ, Klimova TA. Live weight and digestibility of feed nutrients when using amino acids and silicon in the diet of broilers. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;848(1):012064. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012064
44. Naeem A, Saifullah, Zia-Ur-Rehman M, Akhtar T, Zia MH, Aslam M. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes. Environ Pollut. 2018;242(Pt A):126-135. doi: 10.1016/j.envpol.2018.06.069
45. Najda J, Gmiński J, Drózd M, Danch A. The action of excessive, inorganic silicon (Si) on the mineral metabolism of calcium (Ca) and magnesium (Mg). Biol Trace Elem Res. 1993;37(2-3):107-114. doi: 10.1007/BF02783786
46. Nakhon S, Numthum S, Charoensook R, Tartrakoon W, Incharoen P, Incharoen T. Growth performance, meat quality, and bone-breaking strength in broilers fed dietary rice hull silicon. Anim Nutr. 2019;5(2):152-155. doi: 10.1016/j.aninu.2018.11.003
47. Nieves JW, Komar L, Cosman F, Lindsay R. (Review Article) Calcium potentiates the effects of estrogen and calcitonin on bone mass: review and analysis. Journal of Clinical Nutrition. 1998;67:18-24.
48. Pieszka M, Bederska-Łojewska D, Szczurek P, Pieszka M. The membrane interactions of nano-silica and its potential application in animal nutrition. Animals (Basel). 2019;9(12):1041. doi: 10.3390/ani9121041
49. Pietak AM, Reid JW, Scott MJ, Sayer M. Silicon substitution in the calcium phosphate bioceramics. Biomaterials. 2007;28(28):4023-4032. doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.05.003
50. Reffitt DM, Ogston N, Jugdaohsingh R, Cheung HF, Evans BA, Thompson RP, Powell JJ, Hampson GN. Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells in vitro. Bone. 2003;32(2):127-135. doi: 10.1016/s8756-3282(02)00950-x
51. Rodella LF, Bonazza V, Labanca M, Lonati C, Rezzani R. A review of the effects of dietary silicon intake on bone homeostasis and regeneration. J Nutr Health Aging. 2014;18(9):820-826. doi: 10.1007/s12603-014-0555-8
52. Sahin K, Onderci M, Sahin N, Balci, TA, Gursu MF, Juturu V, Kucuk O. Dietary arginine silicate inositol complex improves bone mineralization in quail. Poult Sci. 2006;85(3):486-492. doi:10.1093/ps/85.3.486
53. Seaborn CD, Briske-Anderson M, Nielsen FH. An interaction between dietary silicon and arginine affects immune function indicated by con-A-induced DNA synthesis of rat splenic T-lymphocytes. Biol Trace Elem Res. 2002;87(1-3):133-142. doi: 10.1385/BTER:87:1-3:133
54. Shen L, Karner CM. Radiolabeled amino acid uptake assays in primary bone cells and bone explants. In: Hilton MJ, editor. Skeletal development and repair. Methods in Molecular Biology. Humana, New York, NY. 2021;2230:449-456. doi: 10.1007/978-1-0716-1028-2_28
55. Shen L, Yu Y, Zhou Y, Pruett-Miller SM, Zhang GF, Karner CM. SLC38A2 provides proline to fulfill unique synthetic demands arising during osteoblast differentiation and bone formation. Elife. 2022;11:e76963. doi: 10.7554/eLife.76963
56. Shie MY, Ding SJ, Chang HC. The role of silicon in osteoblast-like cell proliferation and apoptosis. Acta Biomater. 2011;7(6):2604-2614. doi: 10.1016/j.actbio.2011.02.023
57. US Food and Drug Administration. GRAS Substances (SCOGS) Database-Select Committee on GRAS Substances (SCOGS) Opinion: Silicates: Silicates. 2018;13.
58. van der Zande M, Vandebriel RJ, Groot MJ, Kramer E, Herrera Rivera ZE, Rasmussen K, Ossenkoppele JS, Tromp P, Gremmer ER, Peters RJ, Hendriksen PJ, Marvin HJ, Hoogenboom RL, Peijnenburg AA, Bouwmeester H. Sub-chronic toxicity study in rats orally exposed to nanostructured silica. Part Fibre Toxicol. 2014;11:8. doi: 10.1186/1743-8977-11-8
59. Vis B, Hewitt RE, Faria N, Bastos C, Chappell H, Pele L, Jugdaohsingh R, Kinrade SD, Powell JJ. Non-functionalized ultrasmall silica nanoparticles directly and size-selectively activate t cells. ACS Nano. 2018;12(11):10843-10854. doi: 10.1021/acsnano.8b03363

60. Vis B, Hewitt RE, Monie TP, Fairbairn C, Turner SD, Kinrade SD, Powell JJ. Ultrasmall silica nanoparticles directly ligate the T cell receptor complex. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2020;117(1):285-291. doi: 10.1073/pnas.1911360117
61. Vita AA, Royse EA, Pullen NA. Nanoparticles and danger signals: Oral delivery vehicles as potential disruptors of intestinal barrier homeostasis. *J Leukoc Biol*. 2019;106(1):95-103. doi: 10.1002/JLB.3MIR1118-414RR
62. Walvekar AS, Srinivasan R, Gupta R, Laxman S. Methionine coordinates a hierarchically organized anabolic program enabling proliferation. *Mol Biol Cell*. 2018;29(26):3063-3200. doi: 10.1091/mbc.E18-08-0515
63. Wang Q, Xu Z, Ai Q. Arginine metabolism and its functions in growth, nutrient utilization, and immunonutrition of fish. *Anim Nutr*. 2021;7(3):716-727. doi: 10.1016/j.aninu.2021.03.006
64. Wu M, Wu X, Lu S, Gao Y, Yao W, Li X, Dong Y, Jin Z. Dietary arginine affects growth, gut morphology, oxidation resistance and immunity of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) juveniles. *Br J Nutr*. 2018;120(3):269-282. doi: 10.1017/S0007114518001022
65. Wu P, Tang L, Jiang W, Hu K, Liu Y, Jiang J, Kuang S, Tang L, Tang W, Zhang Y, Zhou X, Feng L. The relationship between dietary methionine and growth, digestion, absorption, and antioxidant status in intestinal and hepatopancreatic tissues of sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *J Anim Sci Biotechnol*. 2017;8:63. doi: 10.1186/s40104-017-0194-0
66. Yoshida T, Yoshioka Y, Takahashi H, Misato K, Mori T, Hirai T, Nagano K, Abe Y, Mukai Y, Kamada H, Tsunoda S, Nabeshi H, Yoshikawa T, Higashisaka K, Tsutsumi Y. Intestinal absorption and biological effects of orally administered amorphous silica particles. *Nanoscale Res Lett*. 2014;9(1):532. doi: 10.1186/1556-276X-9-532
67. Younes M, Aggett P, Aguilar F, Crebelli R, Dusemund B, Filipič M, Frutos MJ, Galtier P, Gott D, Gundert-Remy U, Kuhnle GG, Leblanc J-C, Lillegaard IT, Moldeus P, Mortensen A, Oskarsson A, Stankovic I, Waalkens-Berendsen I, Woutersen RA, Wright M, Boon P, Chrysafidis D, Gürtler R, Mosesso P, Parent-Massin D, Tobbäck P, Kovalkovicova N, Rincon AM, Tard A and Lambré C. Re-evaluation of silicon dioxide (E 551) as a food additive. *EFSA Journal*. 2018;16(1):e5088. doi: 10.2903/j.efsa.2018.5088

References

1. Miroshnikov SA, Mustafina AS, Gubaidullina IZ. Evaluation of action of ultrafine silicon oxide on the body of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(1):20-32. doi: 10.33284/2658-3135-103-1-20
2. Musabayeva LL, Sizova EA. The effectiveness of silicon-containing additive "Silaccess" in feeding broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(1):82-91. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-82
3. Musabaeva LL, Sizova EA, Nechitailo KS. Comparative assessment of the effect of the feed additive Silaccess based on flaxseed cake and zeolite on digestibility and morphological parameters of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(1):118-127. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-118
4. Mustafin RZ, Mustafina AS. Determination of the rational dose of silicon dioxide in the feeding of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(1):8-19. doi: 10.33284/2658-3135-104-1-8
5. Kamirova AM, Sizova EA, Ivanishcheva AP, Shoshin DE, Yausheva EV. The organic mineral complex based on ultrafine silicon-containing particles as a microbiome modulator of gastrointestinal tract of cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(2):13-26. doi: 10.33284/2658-3135-107-2-13

6. Alandiyjany MN, Kishawy ATY, Abdelfattah-Hassan A, Eldoumani H, Elazab ST, El-Mandrawy SAM, Saleh AA, ElSawy NA, Attia YA, Arisha AH, Ibrahim D. Nano-silica and magnetized-silica mitigated lead toxicity: Their efficacy on bioaccumulation risk, performance, and apoptotic targeted genes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquat Toxicol.* 2022;242:106054. doi: 10.1016/j.aquatox.2021.106054
7. Arthur-Ataam J, Bideaux P, Charrabi A, Sicard P, Fromy B, Liu K, Eddahibi S, Pasqualin C, Jouy N, Richard S, Virsolvy A. Dietary supplementation with silicon-enriched spirulina improves arterial remodeling and function in hypertensive rats. *Nutrients.* 2019;11(11):2574. doi: 10.3390/nu1112574
8. Bashar A, Hasan NA, Haque MM, Rohani MF and Hossain MS. Effects of dietary silica nanoparticle on growth performance, protein digestibility, hematology, digestive morphology, and muscle composition of Nile tilapia, *Oreochromis Niloticus*. *Front Mar Sci.* 2021;8:706179. doi: 10.3389/fmars.2021.706179
9. Carlisle EM. Silicon: a possible factor in bone calcification. *Science.* 1970;167(3916):279-280. doi: 10.1126/science.167.3916.279
10. Carlisle EM. Silicon: an essential element for the chick. *Science.* 1972;178(4061):619-621. doi: 10.1126/science.178.4061.619
11. da Silva AB, Minter M, Thom W, Hewitt RE, Wills J, Jugdaohsingh R, Powell JJ. Gastrointestinal absorption and toxicity of nanoparticles and microparticles: Myth, reality and pitfalls explored through titanium dioxide. *Curr Opin Toxicol.* 2020;19:112-120. doi: 10.1016/j.cotox.2020.02.007
12. Deryabin DG, Aleshina ES, Efremova LV. Application of the inhibition of bacterial bioluminescence test for assessment of toxicity of carbon-based nanomaterials. *Microbiology.* 2012;81(4):492-497. doi: 10.1134/S0026261712040042
13. Devineau S, Kiger L, Galacteros F, Baudin-Creuzat V, Marden M, Renault JP, Pin S. Manipulating hemoglobin oxygenation using silica nanoparticles: a novel prospect for artificial oxygen carriers. *Blood Adv.* 2018;2(2):90-94. doi: 10.1182/bloodadvances.2017012153
14. Devineau S, Zargarian L, Renault JP, Pin S. Structure and function of adsorbed hemoglobin on silica nanoparticles: relationship between the adsorption process and the oxygen binding properties. *Langmuir.* 2017;33(13):3241-3252. doi: 10.1021/acs.langmuir.6b04281
15. Francis RM, Anderson FH, Patel S, Sahota O, van Staa TP. Calcium and vitamin D in the prevention of osteoporotic fractures. *QJM: An International Journal of Medicine.* 2006;99(6):355-363. doi: 10.1093/qjmed/hcl031
16. Götz W, Tobiasch E, Witzleben S, Schulze M. Effects of silicon compounds on biomineralization, osteogenesis, and hard tissue formation. *Pharmaceutics.* 2019;11(3):117. doi: 10.3390/pharmaceutics11030117
17. Guo Z, Martucci NJ, Liu Y, Yoo E, Tako E, Mahler GJ. Silicon dioxide nanoparticle exposure affects small intestine function in an in vitro model. *Nanotoxicology.* 2018;12(5):485-508. doi: 10.1080/17435390.2018.1463407
18. Halamoda-Kenzaoui B, Ceridono M, Urbán P, Bogni A, Ponti J, Gioria S, Kinsner-Ovaskainen A. The agglomeration state of nanoparticles can influence the mechanism of their cellular internalisation. *J Nanobiotechnology.* 2017;15(1):48. doi: 10.1186/s12951-017-0281-6
19. Han H, Park YH, Park HJ, Lee K, Um K, Park JW, Lee JH. Toxic and adjuvant effects of silica nanoparticles on ovalbumin-induced allergic airway inflammation in mice. *Respir Res.* 2016;17(1):60. doi: 10.1186/s12931-016-0376-x
20. Huang CC, Tsai SC, Lin WT. Potential ergogenic effects of L-arginine against oxidative and inflammatory stress induced by acute exercise in aging rats. *Exp Gerontol.* 2008;43(6):571-577. doi: 10.1016/j.exger.2008.03.002
21. Jugdaohsingh R, Calomme MR, Robinson K, Nielsen F, Anderson SH, D'Haese P, Geusens P, Loveridge N, Thompson RP, Powell JJ. Increased longitudinal growth in rats on a silicon-depleted diet. *Bone.* 2008;43(3):596-606. doi: 10.1016/j.bone.2008.04.014

22. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):99-110.
23. Jurkić LM, Ceganec I, Pavelić SK, Pavelić K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy. *Nutr Metab (Lond)*. 2013;10(1):2. doi: 10.1186/1743-7075-10-2
24. Kalashnikov V, Zajcev A, Atroshchenko M, Miroshnikov S, Frolov A, Zav'yalov O, Kalinkova L, Kalashnikova T. The content of essential and toxic elements in the hair of the mane of the trotter horses depending on their speed. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(22):21961-21967. doi: 10.1007/s11356-018-2334-2
25. Karavolos M, Holban A. Nanosized drug delivery systems in gastrointestinal targeting: interactions with microbiota. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2016;9(4):62. doi: 10.3390/ph9040062
26. Keller AA, McFerran S, Lazareva A, Suh S. Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *J Nanopart Res*. 2013;15(6):1692. doi: 10.1007/s11051-013-1692-4
27. Kim YR, Lee SY, Lee EJ, Park SH, Seong NW, Seo HS, Shin SS, Kim SJ, Meang EH, Park MK, Kim MS, Kim CS, Kim SK, Son SW, Seo YR, Kang BH, Han BS, An SS, Lee BJ, Kim MK. Toxicity of colloidal silica nanoparticles administered orally for 90 days in rats. *Int J Nanomedicine*. 2014;9(Suppl 2):67-78. doi: 10.2147/IJN.S57925
28. Knight D, Ehrlich R, Fielding K, Jeffery H, Grant A, Churchyard G. Trends in silicosis prevalence and the healthy worker effect among gold miners in South Africa: a prevalence study with follow up of employment status. *BMC Public Health*. 2015;15:1258. doi: 10.1186/s12889-015-2566-8
29. Küçükbay FZ, Yazlak H, Sahin N, Akdemir F, Orhan C, Juturu V, Sahin K. Effects of dietary arginine silicate inositol complex on mineral status in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Nutrition*. 2008;14(3):257-262. doi: 10.1111/j.1365-2095.2007.00526.x
30. Kusaka T, Nakayama M, Nakamura K, Ishimiya M, Furusawa E, Ogasawara K. Effect of silica particle size on macrophage inflammatory responses. *PLoS One*. 2014;9(3):e92634. doi: 10.1371/journal.pone.0092634
31. Lall SP, Kaushik SJ. Nutrition and metabolism of minerals in fish. *Animals (Basel)*. 2021;11(9):2711. doi: 10.3390/ani11092711
32. Landsiedel R, Hahn D, Ossig R, Ritz S, Sauer L, Buesen R, Rehm S, Wohlleben W, Groeters S, Strauss V, Sperber S, Wami H, Dobrindt U, Prior K, Harmsen D, van Ravenzwaay B, Schneckeburger J. Gut microbiome and plasma metabolome changes in rats after oral gavage of nanoparticles: sensitive indicators of possible adverse health effects. Part Fibre Toxicol. 2022;19(1):21. doi: 10.1186/s12989-022-00459-w
33. Li X, Han T, Zheng S, Wu G. Nutrition and functions of amino acids in aquatic crustaceans. In: Wu G, editor. *Amino Acids in Nutrition and Health. Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer, Cham. 2021;1285:169-198. doi: 10.1007/978-3-030-54462-1_9
34. Liu J, Cai H, Mei C, et al. Effects of nano-silicon and common silicon on lead uptake and translocation in two rice cultivars. *Front Environ Sci Eng*. 2015;9:905-911. doi: 10.1007/s11783-015-0786-x
35. Martin KR. The chemistry of silica and its potential health benefits. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):94-7.
36. McKnight JR, Satterfield MC, Jobgen WS, Smith SB, Spencer TE, Meininger CJ, McNeal CJ, Wu G. Beneficial effects of L-arginine on reducing obesity: potential mechanisms and important implications for human health. *Amino Acids*. 2010;39(2):349-357. doi: 10.1007/s00726-010-0598-z
37. Merkle JW, Miller ER. The effect of sodium fluoride and sodium silicate on growth and bone strength of broilers. *Poult Sci*. 1983;62(5):798-804. doi: 10.3382/ps.0620798
38. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6

39. Miroshnikov S, Zavyalov O, Frolov A, Sleptsov I, Sirazetdinov F, Poberukhin M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019;26(18):18554-18564. doi: 10.1007/s11356-019-05163-5
40. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Miroshnikova EP, Levahin VI. Comparative assessment of effect of cooper nano and microparticles in chicken. *Oriental Journal of Chemistry.* 2015;31(4):2327-2336. doi: 10.13005/ojc/310461
41. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Kosyan DB, Donnik IM. Research of opportunities for using iron nanoparticles and amino acids in poultry nutrition. *International Journal of GEOMATE.* 2017;13(40):124-131. doi: 10.21660/2017.40.99216
42. Mitchell GV, Jenkins MY. Effect of excess L-lysine on rat growth and on plasma and tissue concentrations of copper, iron and zinc. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo).* 1983;29(6):709-715. doi: 10.3177/jnsv.29.709
43. Mustafina AS, Sizova EA, Kholodilina TN, Mustafin RZ, Klimova TA. Live weight and digestibility of feed nutrients when using amino acids and silicon in the diet of broilers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;848(1):012064. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012064
44. Naeem A, Saifullah, Zia-Ur-Rehman M, Akhtar T, Zia MH, Aslam M. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes. *Environ Pollut.* 2018;242(Pt A):126-135. doi: 10.1016/j.envpol.2018.06.069
45. Najda J, Gmiński J, Drózd M, Danch A. The action of excessive, inorganic silicon (Si) on the mineral metabolism of calcium (Ca) and magnesium (Mg). *Biol Trace Elem Res.* 1993;37(2-3):107-114. doi: 10.1007/BF02783786
46. Nakhon S, Numthuam S, Charoensook R, Tartrakoon W, Incharoen P, Incharoen T. Growth performance, meat quality, and bone-breaking strength in broilers fed dietary rice hull silicon. *Anim Nutr.* 2019;5(2):152-155. doi: 10.1016/j.aninu.2018.11.003
47. Nieves JW, Komar L, Cosman F, Lindsay R. (Review Article) Calcium potentiates the effects of estrogen and calcitonin on bone mass: review and analysis. *Journal of Clinical Nutrition.* 1998;67:18-24.
48. Pieszka M, Bederska-Łojewska D, Szczurek P, Pieszka M. The membrane interactions of nano-silica and its potential application in animal nutrition. *Animals (Basel).* 2019;9(12):1041. doi: 10.3390/ani9121041
49. Pietak AM, Reid JW, Scott MJ, Sayer M. Silicon substitution in the calcium phosphate bioceramics. *Biomaterials.* 2007;28(28):4023-4032. doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.05.003
50. Reffitt DM, Ogston N, Jugdaohsingh R, Cheung HF, Evans BA, Thompson RP, Powell JJ, Hampson GN. Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells in vitro. *Bone.* 2003;32(2):127-135. doi: 10.1016/s8756-3282(02)00950-x
51. Rodella LF, Bonazza V, Labanca M, Lonati C, Rezzani R. A review of the effects of dietary silicon intake on bone homeostasis and regeneration. *J Nutr Health Aging.* 2014;18(9):820-826. doi: 10.1007/s12603-014-0555-8
52. Sahin K, Onderci M, Sahin N, Balci, TA, Gursu MF, Juturu V, Kucuk O. Dietary arginine silicate inositol complex improves bone mineralization in quail. *Poult Sci.* 2006;85(3):486-492. doi:10.1093/ps/85.3.486
53. Seaborn CD, Briske-Anderson M, Nielsen FH. An interaction between dietary silicon and arginine affects immune function indicated by con-A-induced DNA synthesis of rat splenic T-lymphocytes. *Biol Trace Elem Res.* 2002;87(1-3):133-142. doi: 10.1385/BTER:87:1-3:133
54. Shen L, Karner CM. Radiolabeled amino acid uptake assays in primary bone cells and bone explants. In: Hilton MJ, editor. *Skeletal development and repair. Methods in Molecular Biology.* Humana, New York, NY. 2021;2230:449-456. doi: 10.1007/978-1-0716-1028-2_28
55. Shen L, Yu Y, Zhou Y, Pruett-Miller SM, Zhang GF, Karner CM. SLC38A2 provides proline to fulfill unique synthetic demands arising during osteoblast differentiation and bone formation. *Elife.* 2022;11:e76963. doi: 10.7554/eLife.76963

56. Shie MY, Ding SJ, Chang HC. The role of silicon in osteoblast-like cell proliferation and apoptosis. *Acta Biomater.* 2011;7(6):2604-2614. doi: 10.1016/j.actbio.2011.02.023
57. US Food and Drug Administration. GRAS Substances (SCOGS) Database-Select Committee on GRAS Substances (SCOGS) Opinion: Silicates: Silicates. 2018;13.
58. van der Zande M, Vandebriel RJ, Groot MJ, Kramer E, Herrera Rivera ZE, Rasmussen K, Ossenkoppele JS, Tromp P, Gremmer ER, Peters RJ, Hendriksen PJ, Marvin HJ, Hoogenboom RL, Peijnenburg AA, Bouwmeester H. Sub-chronic toxicity study in rats orally exposed to nanostructured silica. *Part Fibre Toxicol.* 2014;11:8. doi: 10.1186/1743-8977-11-8
59. Vis B, Hewitt RE, Faria N, Bastos C, Chappell H, Pele L, Jugdaohsingh R, Kinrade SD, Powell JJ. Non-functionalized ultrasmall silica nanoparticles directly and size-selectively activate t cells. *ACS Nano.* 2018;12(11):10843-10854. doi: 10.1021/acsnano.8b03363
60. Vis B, Hewitt RE, Monie TP, Fairbairn C, Turner SD, Kinrade SD, Powell JJ. Ultrasmall silica nanoparticles directly ligate the T cell receptor complex. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2020;117(1):285-291. doi: 10.1073/pnas.1911360117
61. Vita AA, Royse EA, Pullen NA. Nanoparticles and danger signals: Oral delivery vehicles as potential disruptors of intestinal barrier homeostasis. *J Leukoc Biol.* 2019;106(1):95-103. doi: 10.1002/JLB.3MIR1118-414RR
62. Walvekar AS, Srinivasan R, Gupta R, Laxman S. Methionine coordinates a hierarchically organized anabolic program enabling proliferation. *Mol Biol Cell.* 2018;29(26):3063-3200. doi: 10.1091/mbc.E18-08-0515
63. Wang Q, Xu Z, Ai Q. Arginine metabolism and its functions in growth, nutrient utilization, and immunonutrition of fish. *Anim Nutr.* 2021;7(3):716-727. doi: 10.1016/j.aninu.2021.03.006
64. Wu M, Wu X, Lu S, Gao Y, Yao W, Li X, Dong Y, Jin Z. Dietary arginine affects growth, gut morphology, oxidation resistance and immunity of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) juveniles. *Br J Nutr.* 2018;120(3):269-282. doi: 10.1017/S0007114518001022
65. Wu P, Tang L, Jiang W, Hu K, Liu Y, Jiang J, Kuang S, Tang L, Tang W, Zhang Y, Zhou X, Feng L. The relationship between dietary methionine and growth, digestion, absorption, and antioxidant status in intestinal and hepatopancreatic tissues of sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *J Anim Sci Biotechnol.* 2017;8:63. doi: 10.1186/s40104-017-0194-0
66. Yoshida T, Yoshioka Y, Takahashi H, Misato K, Mori T, Hirai T, Nagano K, Abe Y, Mukai Y, Kamada H, Tsunoda S, Nabeshi H, Yoshikawa T, Higashisaka K, Tsutsumi Y. Intestinal absorption and biological effects of orally administered amorphous silica particles. *Nanoscale Res Lett.* 2014;9(1):532. doi: 10.1186/1556-276X-9-532
67. Younes M, Aggett P, Aguilar F, Crebelli R, Dusemund B, Filipič M, Frutos MJ, Galtier P, Gott D, Gundert-Remy U, Kuhnle GG, Leblanc J-C, Lillegaard IT, Moldeus P, Mortensen A, Oskarsson A, Stankovic I, Waalkens-Berendsen I, Woutersen RA, Wright M, Boon P, Chrysafidis D, Gürtler R, Mosesso P, Parent-Massin D, Tobbac P, Kovalkovicova N, Rincon AM, Tard A and Lambre C. Re-evaluation of silicon dioxide (E 551) as a food additive. *EFSA Journal.* 2018;16(1):e5088. doi: 10.2903/j.efsa.2018.5088

Информация об авторах:

Елена Петровна Мирошникова, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-987-862-98-86.

Мария Сергеевна Аринжанова, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, отдел кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-922-867-57-10.

Азамат Ерсайнович Аринжанов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-922-806-33-43.

Сергей Александрович Мирошников, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, ректор, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8(3532)77-67-70.

Information about the authors:

Elena P Miroshnikova, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-987-862-98-86.

Maria S Arinzhanova, Cand. Sci. (Biology), Junior Researcher, Department of Farm Animal Feeding and Feed Technology named after Leushin SG, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-922-867-57-10.

Azamat E Arinzhanov, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-922-806-33-43.

Sergey A Miroshnikov, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Rector, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8(3532)77-67-70.

Статья поступила в редакцию 27.09.2024; одобрена после рецензирования 21.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 27.09.2024; approved after reviewing 21.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

БИОЭЛЕМЕНТОЛОГИЯ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Научная статья
УДК 636.22/.28.082.13:636.088.31
doi:10.33284/2658-3135-107-4-31

Влияние сезона года на элементный статус и продуктивные качества бычков

Алексей Николаевич Фролов¹, Олег Александрович Завьялов²

¹²Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹forleh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4525-2554>

²oleg-zavyalov83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2033-3956>

Аннотация. С целью изучения влияния температуры окружающей среды на продуктивные качества и элементный статус бычков чёрно-пёстрой породы в условиях СПК колхоз "Красногорский" Оренбургской области проведён научно-хозяйственный опыт. Для этого было сформировано 2 группы: I (n=20) – весеннего сезона рождения (март), II (n=20) – летнего (июнь). Продолжительность эксперимента составляла 90 суток. Температура окружающей среды для I группы в среднем составляла в дневное время +13,1 °С, в ночное – +6,3 °С, для II группы – в дневное время +28,3 °С, в ночное – +22,1 °С. Оценка влияния сезона года на продуктивные качества показала, что бычки II группы уступали своим сверстникам из I по живой массе в возрасте 1 мес. на 2,7 %, 2 мес. – 5,3 %, 3 мес. – 6,0 %; среднесуточным приростам в возрасте 0-1 мес. – на 7,5 %, 1-2 мес. – 12,4 %, 2-3 мес. – 8,5 %. Оценка активности системы антиоксидантной защиты показала снижение в летний период уровня каталазы на 17,6 %, СОД – на 11,0 % и повышение малонового диальдегида на 115,4 % по сравнению с весенним. Высокие температуры в летний период повлияли на элементный статус бычков. Так, в волосе бычков II группы были выше концентрации Hg, V, Cr, Pb, As и ниже Mg, P, K, Ca, Sr, Na, B, Mn, I по сравнению с I. Таким образом, температура окружающей среды оказывает влияние как на продуктивные качества, так и на элементный статус животного, оценённый по концентрации химических элементов в волосе. Полученные данные следует учитывать при составлении рационов кормления молодняка в летний период года.

Ключевые слова: бычки, чёрно-пёстрая порода, температура окружающей среды, элементный статус, продуктивность

Благодарности: исследование выполнено в соответствии с планом НИР на 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0001).

Для цитирования: Фролов А.Н., Завьялов О.А. Влияние сезона года на элементный статус и продуктивные качества бычков // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 31-40. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-31>

BIOELEMENTOLOGY IN ANIMAL HUSBANDRY AND CROP PRODUCTION

Original article

The influence of season on the elemental status and productive qualities of bulls

Alexey N Frolov¹, Oleg A Zavyalov²

¹²Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹forleh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4525-2554>

²oleg-zavyalov83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2033-3956>

Abstract. In order to study the influence of ambient temperature on the productive qualities and elemental status of Black Spotted bulls in the conditions of the Krasnogorsky collective farm of the

Orenburg region, a scientific and economic experiment was conducted. For this purpose, 2 groups were formed: I (n=20) – the spring season of birth (March), II (n=20) summer (June). The duration of the experiment was 90 days. The ambient temperature for group I averaged +13.1°C during the daytime, +6.3°C at night, +28.3°C during the daytime and +22.1°C at night for group II. An assessment of the impact of the season on productive qualities showed that bulls of group II were inferior to their peers from group I in terms of live weight at the age of 1 month – by 2.7%, 2 months – 5.3 %, 3 months – 6.0%, average daily gains, at the age of 0-1 months – by 7.5%, 1-2 months – 12.4%, 2-3 months – 8.5%. Assessment of the activity of the antioxidant system protection showed a decrease in catalase levels by 17.6% in summer, SOD by 11.0%, and an increase in malondialdehyde by 115.4% compared to spring. High temperatures in the summer affected the elemental status of the bulls. Thus, the concentrations of Hg, V, Cr, Pb, As in the hair of group II gobies were higher and Mg, P, K, Ca, Sr, Na, B, Mn, I were lower compared to I. Thus, the ambient temperature affects both the productive qualities and the elemental status an animal estimated by the concentration of chemical elements in the hair. The data obtained should be taken into account when compiling feeding rations for young animals in the summer period of the year.

Keywords: bulls, Black Spotted breed, ambient temperature, elemental status, productivity

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0001).

For citation: Frolov AN, Zavyalov OA. The influence of season on the elemental status and productive qualities of bulls. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):31-40. (In Russ). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-31>

Введение.

На количество потребления корма и эффективность его использования влияют сезонные колебания температуры окружающей среды (Mujibi FDN et al., 2010). Оптимальной температурой для хорошего самочувствия и максимального потребления корма взрослым крупным рогатым скотом, которая считается термoneйтральной, является диапазон от +5 до +25 °C (Nardone A et al., 2010; Sammad A et al., 2020). Изменение температуры выше этих значений провоцирует тепловой стресс, вызывая различные терморегуляторные механизмы, проявляющиеся в снижении потребления корма, конверсии питательных веществ в пищевую продукцию, изменении скорости метаболизма, увеличении потерь воды с испарением через усиленное дыхание и потоотделение, изменении концентрации гормонов в крови и перераспределении общего кровотока (Шошин Д.Е. и др., 2024; Curtis AK et al., 2017).

При температуре окружающей среды в диапазоне +25...+27 °C происходят незначительные изменения в потреблении корма, тогда как повышение температуры выше +30 °C приводит к резкому его снижению на 20-40 % и более по сравнению с кормлением в оптимальном температурном режиме (Sanchez WK et al., 1994). Тепловой стресс нарушает гомеостаз у крупного рогатого скота, вызывая терморегуляторные реакции, которые направлены на поддержание теплового баланса, приводя к снижению продуктивности (Фролов А.Н. и др., 2023; Kim SH et al., 2022).

Сокращение потребления корма является защитной реакцией организма в ответ на высокие температуры окружающей среды, способствующей снижению выделения тепла вырабатываемой рубцовой ферментацией и метаболизмом тела, необходимой для поддержания теплового баланса (Мирошникова М.С. и Аринжанов А.Е., 2021; Zhao S et al., 2019). За процессы терморегуляции и проявление аппетита у животного отвечает гипоталамо-гипофизарная система, которая в зависимости от факторов внешней среды регулирует потребление корма (McGuire MA et al., 1991; von Borell E, 2000).

Воздействие высоких и низких температур окружающей среды изменяет потребности организма животного в минеральных веществах. Так, снижение потребления корма коровами на поздних сроках беременности при воздействии высоких температур приводит к изменению элементного статуса не только самих коров, но и их новорождённых телят (Kume S et al., 1998). Сокращение потребления корма влияет на пищеварительную функцию, а также на количество поступивших с рационом минералов, и если их концентрация в рационе не увеличивается, то это неизбежно приводит к их дефициту. В настоящее время рационы кормления крупного рогатого скота не учиты-

вают воздействие факторов внешней среды на организм животного, нет дифференцировки в потребности организма в минеральных веществах в зависимости от температурного и других факторов внешней среды. По этой причине возникает дефицит отдельных химических элементов, способных поддержать организм животного в условиях неблагоприятных факторов окружающей среды. В связи с этим нами проведено комплексное исследование по оценке влияния температуры окружающей среды на продуктивные качества и элементный статус крупного рогатого скота.

Цель исследования.

Оценка влияния сезона года получения телят на их элементный статус и продуктивные качества.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Бычки чёрно-пёстрой породы.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были приняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все процедуры над животными были выполнены в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФНЦ БСТ РАН.

Схема эксперимента. Исследования проведены в условиях СПК колхоз "Красногорский" Оренбургской области на 2-х группах бычков чёрно-пёстрой породы: I (n=20) – весеннего сезона рождения (март), II (n=20) – летнего (июнь). Продолжительность эксперимента составляла 90 суток. Температура окружающей среды для I группы в среднем составляла в дневное время +13,1 °С, в ночное – +6,3 °С, для II группы – в дневное время +28,3 °С, в ночное – +22,1 °С.

Кормление и содержание были аналогичными для опытных групп. Все рационы кормления соответствовали рекомендуемым нормам для данной половозрастной группы, живого веса, продуктивности и состояли из молока, сена, сенажа и комбикорма. Содержание животных: телята находились в индивидуальных клетках первые 2 недели жизни, по истечении которых переводились на групповое содержание.

Продуктивные качества бычков оценивали по динамике живой массы путём ежемесячных индивидуальных взвешиваний, с дальнейшим расчётом абсолютного и среднесуточного приростов.

Для оценки антиоксидантного статуса и перекисного окисления липидов на основании изучения уровня каталазы, супероксиддисмутазы и малонового диальдегида нами был произведён отбор проб крови из хвостовой вены утром до кормления и поения в вакуумные пробирки.

В конце оцениваемого периода был произведён отбор волос с верхней части холки, машинкой для стрижки животных. Элементный анализ волос (Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Co, Cu, Cr, Fe, Zn, Se, B, Ni, Ga, Ag, In, Ba, Tl, Bi, Al, Sr, Cd, Hg, Pb, As) проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и технологией Dynamic Reaction Cell (ICP-DRC-MS) на приборе Agilent 7900.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>). Весы для взвешивания телят ВСП4-ЖсО (АО «ВЕС-СЕРВИС», Россия), масс-спектрометр с индуктивно связанно плазмой Agilent 7900 (Agilent Technologies, США), весы лабораторные CE224-C (Россия), весы лабораторные ВК 3000 (Россия), центрифуга «Миниспин» (Германия), пробирки химические и центрифужные (Украина), колбы мерные, пипетки измерительные (Россия), дозатор пипеточный Биохит (Финляндия).

Статистическая обработка. Для обработки данных использовали пакет прикладных программ «Statistica 10.0» («StatSoftInc», США). В таблицах приведены средние значения показателей (М) и их стандартная ошибка ($\pm m$).

Результаты исследований.

Проведённая оценка влияния сезона года на продуктивные качества показала на имеющиеся существенные межгрупповые различия (табл. 1).

Таблица 1. Продуктивные качества бычков черно-пестрой породы
Table 1. Productive qualities of Black Spotted calves

Показатель/ <i>Indicator</i>	Группа / <i>Group</i>	
	I	II
Живая масса, кг: / <i>Live weight, kg:</i>		
при рождении / <i>at birth</i>	34,5 $\pm$ 0,28	34,6 $\pm$ 0,36
1 мес. / <i>1 month.</i>	55,8 $\pm$ 0,38	54,3 $\pm$ 0,42*
2 мес. / <i>2 month.</i>	75,9 $\pm$ 0,52	71,9 $\pm$ 0,54***
3 мес. / <i>3 month.</i>	98,3 $\pm$ 0,56	92,4 $\pm$ 0,62***
Абсолютный прирост живой массы, кг / <i>Absolute increase in body weight, kg</i>	63,8 $\pm$ 1,48	57,8 $\pm$ 1,62
Среднесуточный прирост, г / <i>Average daily increase, g</i>		
0-1 мес. / <i>0-1 months</i>	687 $\pm$ 12,34	635 $\pm$ 11,82**
1-2 мес. / <i>1-2 months</i>	693 $\pm$ 13,14	607 $\pm$ 12,83***
2-3 мес. / <i>2-3 months</i>	747 $\pm$ 13,28	683 $\pm$ 12,64***
Относительный прирост, % / <i>Relative increase, %</i>	34,5 $\pm$ 0,77	32,4 $\pm$ 1,00*

Примечание: * – при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$, *** – при $P \leq 0,001$

Note: * – at $P \leq 0.05$; ** – at $P \leq 0.01$, *** – at $P \leq 0.001$

Так, бычки II группы (летнего сезона рождения) уступали своим сверстникам из I (весеннего сезона рождения) по живой массе в возрасте 1 мес. – на 2,7 % ($P \leq 0,05$), 2 мес. – 5,3 % ($P \leq 0,001$), 3 мес. – 6,0 % ($P \leq 0,001$); среднесуточным приростам в возрасте 0-1 мес. – на 7,5 % ($P \leq 0,01$), 1-2 мес. – 12,4 % ($P \leq 0,001$), 2-3 мес. – 8,5 % ($P \leq 0,001$).

Оценка активности системы антиоксидантной защиты по уровню ферментов каталазы и супероксиддисмутазы выявила существенные межгрупповые различия (табл. 2).

Таблица 2. Антиоксидантный статус и продукты перекисного окисления липидов бычков различных сезонов рождения

Table 2. Antioxidant status and lipid peroxidation of bulls of different birth seasons

Показатель / <i>Indicator</i>	Группа / <i>Group</i>	
	I	II
СОД, % / <i>SOD, %</i>	62,21 $\pm$ 4,03	51,26 $\pm$ 3,47*
Каталаза, мкМ H ₂ O ₂ /лхмин / <i>Catalase, mcM H₂O₂/lxmin</i>	273,24 $\pm$ 26,31	193,34 $\pm$ 24,68*
Малоновый диальдегид, нм/мл / <i>Malondialdehyde, nm/ml</i>	1,56 $\pm$ 0,24	3,36 $\pm$ 0,42***

Примечание: * – при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$, *** – при $P \leq 0,001$

Note: * – at $P \leq 0.05$; ** – at $P \leq 0.01$, *** – at $P \leq 0.001$

Так, уровень каталазы во II группе снизился на 17,6 % ($P \leq 0,05$), СОД – на 11,0 % ($P \leq 0,05$) по сравнению с I. Оценка малонового диальдегида как основного и наиболее изученного продукта перекисного окисления полиненасыщенных жирных кислот показала, что во II группе он был выше на 115,4 % ($P \leq 0,001$) по сравнению со сверстниками I группы.

Проведённая оценка элементного статуса бычков по уровню концентраций эссенциальных и токсичных биоэлементов показала на существенные его изменения в зависимости от сезона рождения (табл. 3).

Таблица 3. Концентрация биоэлементов в волосе бычков, мг/кг
Table 3. Concentration of bioelements in hair, mg/kg

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>	
	I	II
Макроэлементы / <i>Macroelements</i>		
K	2597,9±111,7	1866,2±89,5*
Ca	2638,3±38,8	1761,2±51,3***
Mg	671,9±20,3	508,4±16,9**
Na	2763,2±127,5	1410,4±109,8**
P	269,7±5,6	199,5±4,5***
Эссенциальные микроэлементы / <i>Essential microelements</i>		
Fe	188,84±12,32	229,24±10,44
Zn	107,1±1,14	101,4±1,15
Co	0,205±0,01	0,267±0,01
Cr	0,381±0,02	0,595±0,04*
Cu	5,633±0,09	6,008±0,09
I	1,44± 0,06	0,61± 0,07***
Mn	51,0± 2,88	23,5± 1,97***
Se	0,253±0,01	0,221±0,01
Условно-эссенциальные микроэлементы / <i>Conditionally essential microelements</i>		
B	8,38±0,329	4,15±0,217***
Si	22,9±6,18	44,4±4,51
Li	0,384±0,031	0,237±0,009
Ni	0,580±0,024	0,600±0,019
V	0,540±0,032	0,851±0,034**
As	0,156±0,009	0,212± 0,006*
Токсичные микроэлементы / <i>Toxic microelements</i>		
Al	38,1±3,30	36,2±2,09
Sr	18,62±0,430	12,04± 0,513***
Pb	0,392±0,021	0,612±0,039*
Sn	0,0150±0,0004	0,0193±0,0018
Cd	0,031±0,0022	0,024±0,0022
Hg	0,004±0,0004	0,013± 0,0009***

Примечание: * – при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$, *** – при $P \leq 0,001$

Note: * – at $P \leq 0.05$; ** – at $P \leq 0.01$, *** – at $P \leq 0.001$

Так, высокие температуры в летний период по сравнению с весенним способствовали повышению концентраций в волосе Hg на 225,8 % ($P \leq 0,001$), V – на 57,7 % ($P \leq 0,01$), Cr – на 56,4 % ($P \leq 0,05$), Pb – на 56,2 % ($P \leq 0,05$), As – на 36,3 % ($P \leq 0,05$) и снижению Mg – на 24,3 % ($P \leq 0,01$), P –

на 26,0 % ($P \leq 0,001$), К – на 28,2 % ($P \leq 0,001$), Са – на 33,2% ($P \leq 0,001$), Sr – на 35,4 % ($P \leq 0,001$), Na – на 49,0 % ($P \leq 0,01$), В – на 50,5 % ($P \leq 0,001$), Mn – на 53,9 % ($P \leq 0,001$), I – на 57,9 % ($P \leq 0,001$).

Обсуждение полученных результатов.

Глобальное изменение климата в виде потепления создаёт серьёзные трудности для развития сельского хозяйства, и в частности, животноводства (Nawaz AH et al., 2021). Высокие температуры, превышающие способность животного рассеивать тепло в окружающую среду, приводят к тепловому стрессу. Физиологические последствия теплового стресса многогранны и включают в себя повышение температуры тела, снижение потребления корма, плохую эффективность конверсии корма в пищевую продукцию (Akbarian A et al., 2016; Wasti S et al., 2021).

Территория Оренбургской области, где проводилось данное исследование, относится к регионам с резко континентальным климатом, который характеризуется ярко выраженной сезонностью с большими амплитудами колебания температур. Характерной особенностью Оренбуржья являются суровые зимы, не редко с температурой в ночное время ниже -30°C и жарким, сухим летом, температура в отдельные дни превышает $+30...+35^{\circ}\text{C}$. Такие большие вариации температуры изменяют потребность организма животного в минеральных веществах. Отсутствие комплексных исследований, направленных на дифференциацию норм потребности крупного рогатого скота в минеральных веществах в зависимости от температуры окружающей среды, и побудило нас провести данный эксперимент.

Как показали результаты наших исследований, температура окружающей среды влияет на интенсивность роста молодняка. Так, бычки, выращиваемые в летний период, достоверно уступали сверстникам весеннего по интенсивности роста во все оцениваемые периоды. Это прежде всего объясняется нами снижением аппетита и потребления корма за счёт регуляторных механизмов, которые направлены на уменьшение выделения тепла в результате метаболизма. Что ранее было продемонстрировано на тёлках абердин-ангусской породы в Австралии (Beatty DT et al., 2008). Одним из путей повышения потребления корма, а следовательно, и поступления питательных и минеральных веществ с рациона в жаркую погоду, ряд авторов считает применение системы кормления, включающей порционное скармливание рациона в ночное время (Gaughan JB et al., 1996).

Окислительный стресс является следствием дисбаланса между антиоксидантной и прооксидантной защитами организма и в конечном итоге приводит к повреждению клеток и тканей. Проведённая оценка антиоксидантной защиты организма по уровню активности ферментов каталазы и супероксиддисмутазы показала, что в летний период происходит их снижение, с одновременным увеличением маркера перекисного окисления липидов – малонового диальдегида. Это объясняется, тем, что высокие температуры в течение продолжительного времени приводят к истощению антиоксидантных систем защиты организма, вследствие чего возникает окислительный стресс, который сопровождается обвальным образованием активных форм кислорода, что и продемонстрировано в нашем эксперименте (Del Rio D et al., 2005; Puppel K et al, 2015).

Дальнейшим направлением наших исследований стало изучение элементного статуса бычков в зависимости от сезона года. Как показали результаты этого эксперимента, содержание бычков при высоких температурах окружающей среды способствует изменению элементного статуса, проявляющемся в снижении целого ряда важнейших химических элементов: Mg, P, K, Ca, Sr, Na, B, Mn, I при повышении Hg, V, Cr, Pb, As. Такое изменение элементного статуса бычков объяснимо как снижением потребления корма, так и тем, что в жаркую погоду организм запускает механизмы адаптации, направленные на снижение тепловой нагрузки, которые проявляются в учащённом дыхании, сердцебиении, потоотделении. И как следствие, необходимы повышенные нормы потребления ряда химических элементов, таких как электролиты K и Na, которые отвечают за поддержание водного баланса в клетках, регулируют работу сердца, ритм сердечных сокращений, работу Na/K-насоса, проведение нервных импульсов и другого (Wildman CD et al., 2007, Wang J et al., 2020). Проведённый нами эксперимент показал, что снижение ряда эссенциальных элементов сопряжено с увеличением уровня токсичных. По-видимому, имея один путь всасывания при сниже-

нии конкуренции со стороны эссенциальных элементов, происходит большее всасывание из рациона кормления токсичных элементов. Так, свинец поглощается кальбайндином – кальций-связывающим белком, который в норме отвечает за перенос кальция к базолатеральной мембране и депонируется, как и кальций, в костной ткани (Simons TJB, 1986; Patra RC et al., 2006).

Таким образом, проведённое нами исследование показало влияние сезона года на продуктивные качества и элементный статус бычков.

Заключение.

Высокая температура окружающей среды по сравнению с термонеutralной приводит к снижению живой массы бычков с рождения до 3 месяцев на 6,0 %, среднесуточных приростов – на 9,5 %, изменяя элементный профиль по 14 химическим элементам: Mg, P, K, Ca, Sr, Na, B, Mn, I, Hg, V, Cr, Pb, As из 25 изучаемых.

Список источников

1. Мирошникова М.С., Аринжанов А.Е. Микробиоценоз рубца – инструмент к построению искусственных биосистем. Биореактор на основе рубца (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 3. С. 57-69. [Miroshnikova MS, Arinzhanov AE. Rumen microbiocenosis is a tool for the construction of artificial biosystems. Ruminal bioreactor (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;104(3):57-69. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-104-3-57
2. Стресс как лимитирующий фактор в животноводстве (обзор) / Д.Е. Шошин, Н.Г. Ерофеев, Е.А. Сизова, М.Ю. Павлова // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107. № 3. С. 138-162. [Shoshin DE, Erofeev NG, Sizova EA, Pavlova MYu. Stress as a limiting factor in animal husbandry (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(3):138-162. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-3-138
3. Фролов А.Н., Ажмулдинов Е.А., Харламов А.В. Влияние сезона года и продолжительности предубойной выдержки на уровень окислительного стресса, убойные показатели и качественные характеристики мяса бычков // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 91-101. [Frolov AN, Azhmuldinov EA, Kharlamov AV. Effect of season and duration of pre-slaughter handling on oxidative stress levels, slaughter performance, and quality traits of steer meat. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):91-101. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-91
4. Akbarian A, Michiels J, Degroote J, Majdeddin M, Golian A, De Smet S. Association between heat stress and oxidative stress in poultry; mitochondrial dysfunction and dietary interventions with phytochemicals. *J Anim Sci Biotechnol*. 2016;7:37. doi: 10.1186/s40104-016-0097-5
5. Beatty DT, Barnes A, Taylor E, Maloney SK. Do changes in feed intake or ambient temperature cause changes in cattle rumen temperature relative to core temperature? *Journal of Thermal Biology*. 2008;33(1):12-19. doi: 10.1016/j.jtherbio.2007.09.002
6. Curtis AK, Scharf B, Eichen PA, Spiers DE. Relationships between ambient conditions, thermal status, and feed intake of cattle during summer heat stress with access to shade. *J Therm Biol*. 2017;63:104-111. doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.11.015
7. Del Rio D, Stewart AJ, Pellegrini N. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*. 2005;15(4):316-328. doi: 10.1016/j.numecd.2005.05.003
8. Gaughan JB, Mader TL, Savage D, Young BA. Effect of feeding regimen on feed intake of cattle exposed to heat. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*. 1996;21:223-226.
9. Kim SH, Ramos SC, Valencia RA, Cho YI, Lee SS. Heat stress: effects on rumen microbes and host physiology, and strategies to alleviate the negative impacts on lactating dairy cows. *Front Microbiol*. 2022;13:804562. doi: 10.3389/fmicb.2022.804562

10. Kume S, Toharmat T, Kobayashi N. Effect of restricted feed intake of dams and heat stress on mineral status of newborn calves. *J Dairy Sci.* 1998;81(6):1581-1590. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75724-8
11. McGuire MA, Beede DK, Collier RJ, Buonomo FC, DeLorenzo MA, Wilcox CJ, Huntington GB, Reynolds CK. Effects of acute thermal stress and amount of feed intake on concentrations of somatotropin, insulin-like growth factor (IGF)-I and IGF-II, and thyroid hormones in plasma of lactating Holstein cows. *J Anim Sci.* 1991;69(5):2050-2056. doi: 10.2527/1991.6952050x
12. Mujibi FDN, Moore SS, Nkrumah DJ, Wang Z, Basarab JA. Season of testing and its effect on feed intake and efficiency in growing beef cattle. *J Anim Sci.* 2010;88(12):3789-3799. doi: 10.2527/jas.2009-2407
13. Nardone A, Ronchi B, Lacetera N, Ranieri MS, Bernabucci U. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livest Sci.* 2010;130(1-3):57-69. doi: 10.1016/j.livsci.2010.02.011
14. Nawaz AH, Amoah K, Leng QY, Zheng JH, Zhang WL, Zhang L. Poultry response to heat stress: its physiological, metabolic, and genetic implications on meat production and quality including strategies to improve broiler production in a warming world. *Front Vet Sci.* 2021;8:699081. doi: 10.3389/fvets.2021.699081
15. Patra RC, Swarup D, Sharma MC, Naresh R. Trace mineral profile in blood and hair from cattle environmentally exposed to lead and cadmium around different industrial units. *J Vet Med A.* 2006;53(10):511-517. doi: 10.1111/j.1439-0442.2006.00868.x
16. Puppel K, Kapusta A, Kuczyńska B. The etiology of oxidative stress in the various species of animals, a review. *J Sci Food Agric.* 2015;95(11):2179-2184. doi: 10.1002/jsfa.7015
17. Sammad A, Wang YJ, Umer S, Lirong H, Khan I, Khan A, Ahmad B, Wang Y. Nutritional physiology and biochemistry of dairy cattle under the influence of heat stress: consequences and opportunities. *Animals (Basel).* 2020;10(5):793. doi: 10.3390/ani10050793
18. Sanchez WK, McGuire MA, Beede DK. Macromineral nutrition by heat stress interactions in dairy cattle: review and original research. *J Dairy Sci.* 1994;77(7):2051-2079. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(94)77150-2
19. Simons TJB. Cellular interactions between lead and calcium. *Br Med Bull.* 1986;42(4):431-434. doi: 10.1093/oxfordjournals.bmb.a072162
20. von Borell EH. The biology of stress and its application to livestock housing and transportation assessment1. *J Anim Sci.* 2000;79(suppl_E):E260-E267. doi: 10.2527/jas2001.79E-SupplE260x
21. Wang J, Li J, Wang F, Xiao J, Wang Y, Yang H, Li S, Cao Z. Heat stress on calves and heifers: a review. *J Anim Sci Biotechnol.* 2020;11:79. doi: 10.1186/s40104-020-00485-8
22. Wasti S, Sah N, Singh AK, Lee CN, Jha R, Mishra B. Dietary supplementation of dried plum: a novel strategy to mitigate heat stress in broiler chickens. *J Anim Sci Biotechnol.* 2021;12(1):58. doi: 10.1186/s40104-021-00571-5
23. Wildman CD, West JW, Bernard JK. Effects of dietary cation-anion difference and potassium to sodium ratio on lactating dairy cows in hot weather. *J Dairy Sci.* 2007;90(2):970-977. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(07)71581-3
24. Zhao S, Min L, Zheng N, Wang J. Effect of heat stress on bacterial composition and metabolism in the rumen of lactating dairy cows. *Animals (Basel).* 2019;9(11):925. doi: 10.3390/ani9110925

References

1. Miroshnikova MS, Arinzhanov AE. Rumen microbiocenosis is a tool for the construction of artificial biosystems. *Ruminal bioreactor (review).* *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;104(3):57-69. doi: 10.33284/2658-3135-104-3-57
2. Shoshin DE, Erofeev NG, Sizova EA, Pavlova MYu. Stress as a limiting factor in animal husbandry (review). *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2024;107(3):138-162. doi: 10.33284/2658-3135-107-3-138

3. Frolov AN, Azhmuldinov EA, Kharlamov AV. Effect of season and duration of pre-slaughter handling on oxidative stress levels, slaughter performance, and quality traits of steer meat. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):91-101. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-91
4. Akbarian A, Michiels J, Degroote J, Majdeddin M, Golian A, De Smet S. Association between heat stress and oxidative stress in poultry; mitochondrial dysfunction and dietary interventions with phytochemicals. *J Anim Sci Biotechnol*. 2016;7:37. doi: 10.1186/s40104-016-0097-5
5. Beatty DT, Barnes A, Taylor E, Maloney SK. Do changes in feed intake or ambient temperature cause changes in cattle rumen temperature relative to core temperature? *Journal of Thermal Biology*. 2008;33(1):12-19. doi: 10.1016/j.jtherbio.2007.09.002
6. Curtis AK, Scharf B, Eichen PA, Spiers DE. Relationships between ambient conditions, thermal status, and feed intake of cattle during summer heat stress with access to shade. *J Therm Biol*. 2017;63:104-111. doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.11.015
7. Del Rio D, Stewart AJ, Pellegrini N. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*. 2005;15(4):316-328. doi: 10.1016/j.numecd.2005.05.003
8. Gaughan JB, Mader TL, Savage D, Young BA. Effect of feeding regimen on feed intake of cattle exposed to heat. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*. 1996;21:223-226.
9. Kim SH, Ramos SC, Valencia RA, Cho YI, Lee SS. Heat stress: effects on rumen microbes and host physiology, and strategies to alleviate the negative impacts on lactating dairy cows. *Front Microbiol*. 2022;13:804562. doi: 10.3389/fmicb.2022.804562
10. Kume S, Toharmat T, Kobayashi N. Effect of restricted feed intake of dams and heat stress on mineral status of newborn calves. *J Dairy Sci*. 1998;81(6):1581-1590. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75724-8
11. McGuire MA, Beede DK, Collier RJ, Buonomo FC, DeLorenzo MA, Wilcox CJ, Huntington GB, Reynolds CK. Effects of acute thermal stress and amount of feed intake on concentrations of somatotropin, insulin-like growth factor (IGF)-I and IGF-II, and thyroid hormones in plasma of lactating Holstein cows. *J Anim Sci*. 1991;69(5):2050-2056. doi: 10.2527/1991.6952050x
12. Mujibi FDN, Moore SS, Nkrumah DJ, Wang Z, Basarab JA. Season of testing and its effect on feed intake and efficiency in growing beef cattle. *J Anim Sci*. 2010;88(12):3789-3799. doi: 10.2527/jas.2009-2407
13. Nardone A, Ronchi B, Lacetera N, Ranieri MS, Bernabucci U. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livest Sci*. 2010;130(1-3):57-69. doi: 10.1016/j.livsci.2010.02.011
14. Nawaz AH, Amoah K, Leng QY, Zheng JH, Zhang WL, Zhang L. Poultry response to heat stress: its physiological, metabolic, and genetic implications on meat production and quality including strategies to improve broiler production in a warming world. *Front Vet Sci*. 2021;8:699081. doi: 10.3389/fvets.2021.699081
15. Patra RC, Swarup D, Sharma MC, Naresh R. Trace mineral profile in blood and hair from cattle environmentally exposed to lead and cadmium around different industrial units. *J Vet Med A*. 2006;53(10):511-517. doi: 10.1111/j.1439-0442.2006.00868.x
16. Puppel K, Kapusta A, Kuczyńska B. The etiology of oxidative stress in the various species of animals, a review. *J Sci Food Agric*. 2015;95(11):2179-2184. doi: 10.1002/jsfa.7015
17. Sammad A, Wang YJ, Umer S, Lirong H, Khan I, Khan A, Ahmad B, Wang Y. Nutritional physiology and biochemistry of dairy cattle under the influence of heat stress: consequences and opportunities. *Animals (Basel)*. 2020;10(5):793. doi: 10.3390/ani10050793
18. Sanchez WK, McGuire MA, Beede DK. Macromineral nutrition by heat stress interactions in dairy cattle: review and original research. *J Dairy Sci*. 1994;77(7):2051-2079. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(94)77150-2
19. Simons TJB. Cellular interactions between lead and calcium. *Br Med Bull*. 1986;42(4):431-434. doi: 10.1093/oxfordjournals.bmb.a072162

20. von Borell EH. The biology of stress and its application to livestock housing and transportation assessment1. J Anim Sci. 2000;79(suppl_E):E260-E267. doi: 10.2527/jas2001.79E-SupplE260x
21. Wang J, Li J, Wang F, Xiao J, Wang Y, Yang H, Li S, Cao Z. Heat stress on calves and heifers: a review. J Anim Sci Biotechnol. 2020;11:79. doi: 10.1186/s40104-020-00485-8
22. Wasti S, Sah N, Singh AK, Lee CN, Jha R, Mishra B. Dietary supplementation of dried plum: a novel strategy to mitigate heat stress in broiler chickens. J Anim Sci Biotechnol. 2021;12(1):58. doi: 10.1186/s40104-021-00571-5
23. Wildman CD, West JW, Bernard JK. Effects of dietary cation-anion difference and potassium to sodium ratio on lactating dairy cows in hot weather. J Dairy Sci. 2007;90(2):970-977. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(07)71581-3
24. Zhao S, Min L, Zheng N, Wang J. Effect of heat stress on bacterial composition and metabolism in the rumen of lactating dairy cows. Animals (Basel). 2019;9(11):925. doi: 10.3390/ani9110925

Информация об авторах:

Алексей Николаевич Фролов, доктор биологических наук, заведующий отделом технологии мясного скотоводства и производства говядины, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532) 30-81-78.

Олег Александрович Завьялов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532) 30-81-78.

Information about the authors:

Alexey N Frolov, Dr. Sci. (Biology), Head of Department of Technology for Beef Cattle Breeding and Beef Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: +7 (3532) 30-81-78.

Oleg A Zavyalov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher of Department of Technology for Beef Cattle Breeding and Beef Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: +7 (3532) 30-81-78.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 09.10.2024; approved after reviewing 22.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 41-52.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 41-52.

РАЗВЕДЕНИЕ, СЕЛЕКЦИЯ, ГЕНЕТИКА

Научная статья

УДК 636.223.1

doi:10.33284/2658-3135-107-4-41

Химический состав и гистологическая структура длиннейшей мышцы спины крупного рогатого скота абердин-ангусской породы в зависимости от генотипа

Елена Николаевна Коновалова¹, Лилия Валерьевна Евстафьева², Станислава Сергеевна Сафонова³, Ольга Сергеевна Романенкова⁴, Елена Александровна Гладырь⁵

^{1,4,5}Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Московская область, п. Дубровицы, Россия

^{2,3}Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

¹konoval-elena@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2170-5259>

²lilmo@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5045-1235>

³sfalij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7587-3293>

⁴ksilosa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2682-6164>

⁵elenagladyr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5210-8932>

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования генов кальпаина 1 (*CAPN1*) и кальпастатина (*CAST*) для прогнозирования нежности говядины и селекции наиболее перспективных по этому качеству животных. Целью работы было изучение полиморфизмов генов *CAPN1* и *CAST* в связи с химическим составом и гистологической структурой мяса крупного рогатого скота. От бычков абердин-ангусской породы ($n=9$) с известными генотипами по полиморфизмам *CAPN1*_316, *CAPN1*_4751, *CAST*_282 и *CAST*_2959 после убоя были отобраны пробы длиннейшей мышцы спины (*M. longissimus dorsum*), в которых определялось содержание белка, жира, сухого и минеральных веществ, а также содержание мышечной, соединительной, жировой тканей и диаметр мышечных волокон. Было установлено, что мясо бычков с генотипами GG-*CAPN1*_316 и GG-*CAST*_2959 содержало на 14,5-15,8 % больше белка и на 11,4-13,3 % меньше жира по сравнению с другими генотипами, а мясо животных с генотипами СТ-*CAPN1*_4751 и АА-*CAST*_2959 отличалось меньшим содержанием соединительной ткани (на 7,5-7,7 и на 9,6-10,2 %, соответственно). Наибольший диаметр миофибрилл наблюдался в пробах от бычков с генотипами СС-*CAPN1*_316 (111,2 мкм), ТТ-*CAPN1*_4751 (116,2 мкм) и АА-*CAST*_2959 (111,7 мкм). В отношении полиморфизма *CAST*_282 тенденции преимущества по всем изучаемым показателям демонстрировали животные с генотипом GC.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, бычки, абердин-ангусская порода, генетические маркеры, мясная продуктивность, кальпаин 1, кальпастатин

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-26-00176.

Для цитирования: Химический состав и гистологическая структура длиннейшей мышцы спины крупного рогатого скота абердин-ангусской породы в зависимости от генотипа / Е.Н. Коновалова, Л.В. Евстафьева, С.С. Сафонова, О.С. Романенкова, Е.А. Гладырь // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 41-52. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-41>

BREEDING, SELECTION, GENETICS

Original article

Chemical composition and histological structure of the longest muscle of the back of Aberdeen-Angus cattle depending on genotype

Elena N Konovalova¹, Liliia V Evstafeva², Stanislava S Safonova³, Olga S Romanenkova⁴,
Elena A Gladyr⁵

^{1,4,5}Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Moscow region, Dubrovitsy, Russia

^{2,3}Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

¹konoval-elena@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2170-5259>

²lilmo@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5045-1235>

³sfalij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7587-3293>

⁴ksilosa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2682-6164>

⁵elenagladyr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5210-8932>

Abstract. The article discusses the possibility of using calpain 1 (*CAPN1*) and calpastatin (*CAST*) genes for the prediction of beef tenderness and selection of the most perspective in this property animals. The aim of the research was the study of the *CAPN1* and *CAST* gene polymorphisms in association with the chemical composition and histological structure of the meat in cattle. Samples from the longest muscle of the back (*M. longissimus dorsi*) of Aberdeen-Angus bulls (n=9) with known genotypes for the CAPN1_316, CAPN1_4751, CAST_282 and CAST_2959 polymorphisms were collected after slaughter and analyzed for protein, fat, dry matter and mineral content, as well as muscle, connective and adipose tissue content and muscle fiber diameter. It was found that meat from bulls with the GG-CAPN1_316 and GG-CAST_2959 genotypes contained 14.5-15.8% more protein and 11.4-13.3% less fat compared to other genotypes, and meat from animals with the ST-CAPN1_4751 and AA-CAST_2959 genotypes had lower connective tissue content (by 7.5-7.7 and 9.6-10.2%, respectively). The largest myofibril diameter was observed in samples from steers with genotypes CC-CAPN1_316 (111.2 μ m), TT-CAPN1_4751 (116.2 μ m) and AA-CAST_2959 (111.7 μ m). With respect to the CAST_282 polymorphism, animals with the GC genotype showed advantages in all studied parameters.

Keywords: cattle, bulls, Aberdeen Angus breed, genetic markers, meat productivity, calpain 1, calpastatin

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-26-00176.

For citation: Konovalova EN, Evstafeva LV, Safonova SS, Romanenkova OS, Gladyr EA. Chemical composition and histological structure of the longest muscle of the back of Aberdeen-Angus cattle depending on genotype. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):41-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-41>

Введение.

Важнейшим показателем продовольственной безопасности России является её самообеспечение, подразумевающее удовлетворение потребностей населения в высококачественных продуктах питания за счёт собственного производства (Остапчук Т.В. и др., 2021). В современных условиях особенно острой остаётся несбалансированность пищи по белку, в связи с чем к приоритетным видам продовольствия относятся мясные продукты, в частности говядина, как источник легко усвояемого организмом человека белка (Place SE and Miller AM, 2020). В связи с этим мясное скотоводство занимает существенное место как в производственном, так и потребительском плане для экономики государства (Вартанова М.Л. и Газимагомедова П.К., 2018). Селекционно-племенная работа, направленная на улучшение качества говядины, осложняется невозможностью проведения точной прижизненной оценки свойств мясной продуктивности, а следовательно, и отбора животных для воспроизводства стада, вследствие чего поиск наиболее объективных методов определения основных показателей, характеризующих биологическую полноценность мяса, имеет важное научно-практическое значение для повышения конкурентоспособности отечественной отрасли мясного скотоводства (Шамина О.В., 2023).

Достижения последних лет в молекулярно-биологических исследованиях сельскохозяйственных видов животных делают возможным полное секвенирование геномов, но для производственных селекционных систем оно является дорогим. При этом существует практический интерес

к использованию простых однонуклеотидных полиморфизмов (single nucleotide polymorphisms, SNP) в качестве генетических маркеров, благодаря которым можно проводить точную идентификацию генотипов животных, несущих желательные фенотипические особенности, и на их основе вести селекцию (Столповский Ю.А. и др., 2022).

В настоящее время известен ряд генетических маркеров, связанных с качеством мяса крупного рогатого скота, в частности, наблюдались значимые ассоциации генов, кодирующих белки, участвующие в посмертном протеолизе мышечной ткани, кальпаина 1 (*CAPN1*) и кальпастина (*CAST*) с нежностью говядины, как основной характеристикой, определяющей её вкусовые качества (Sun X et al., 2018). Наблюдалось положительное влияние аллелей *C-CAPN1_316*, *C-CAPN1_4751*, *C-CAST_282*, *A-CAST_2959* на свойства мясной продуктивности крупного рогатого скота (Тюлебаев С.Д. и Кадышева М.Д., 2021; Saucedo-Uriarte JA et al., 2024). Научные исследования, направленные на анализ структуры популяций крупного рогатого скота мясных пород, разводимых на территории Российской Федерации и Белоруссии, выявили полиморфность изучаемых стад абердин-ангусской, герефордской и лимузинской пород по полиморфизмам генов кальпаина 1 и кальпастина (Романишко Е.Л. и др., 2022; Коновалова Е.Н. и др., 2023а, 2023б), что открывает возможность отбора наиболее перспективных в отношении мясной продуктивности животных, используя полиморфизмы данных генов.

Наряду с этим интерес представляет генетическое совершенствование крупного рогатого скота в направлении получения мяса максимальной питательной ценности и вкусовых качеств, определяемых химическим составом и тканевой структурой продукта (Павлов А.В. и Рудь А.И., 2023).

Цель исследования.

Изучение полиморфизмов генов кальпаина 1 и кальпастина в связи с гистохимическим составом мяса, полученного от крупного рогатого скота абердин-ангусской породы.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Бычки абердин-ангусской породы, ООО «КФХ «Хэппи Фарм» (Калужская обл., Медынский район), рождённые в 2020 г. и отправленные на убой в 2023 г. в возрасте 3,5-3,7 лет.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Прижизненно от животных ($n=9$) были взяты образцы крови, из которых при помощи наборов для выделения ДНК Экстран-1 (НПФ «Синтол», Россия) были получены препараты ДНК, генотипированные впоследствии по полиморфизмам генов кальпаина 1 (*CAPN1_316*, *CAPN1_4751*) и кальпастина (*CAST_282*, *CAST_2959*) при помощи собственных методик на основе ПЦР-ПДРФ и ПЦР в режиме реального времени (Коновалова Е.Н. и др., 2023; Konovalova E et al., 2024).

После убоя от бычков были взяты пробы длиннейшей мышцы спины (*M. longissimus dorsi*), которые были анализированы по стандартизированным методикам на содержание белка (ГОСТ 25011-2017), жира (ГОСТ 23042-2015), сухого вещества (ГОСТ 15113.4-2021) и минеральных веществ (ГОСТ Р 52416-2005). Гистологический анализ заключался в определении в образцах содержания мышечной, соединительной и жировой тканей, а также диаметра мышечных волокон (миофибрилл) (Гурова С.В., 2020).

Оборудование и технические средства. Генетические исследования проводились в лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных на оборудовании ЦКП ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Химический и гистологический анализ проб проводились на базе ФГОУ ВО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева в учебно-научном ЦКП «Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений» при ФГОУ ВО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева.

Статистическая обработка. Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) и онлайн-калькулятора «Медицинская статистика» (<https://medstatistic.ru/calculators/averagestudent.html>). Достоверность обнаруженных различий определяли по критерию t-Стьюдента. Разница считалась статистически значимой при $P \leq 0,05$.

Результаты исследований.

В таблице 1 представлены результаты генетического, химического и гистологического анализов проб исследуемых животных.

Таблица 1. Результаты гистохимического анализа длиннейшей мышцы спины бычков абердин-ангусской породы различных генотипов
Table 1. Results of histochemical analysis of Musculus longissimus dorsum of Aberdeen Angus bulls of the different genotypes

Бык № / Bull No.	Комплексный генотип / Com- plex genotype	Содержание вещества $\pm \Delta$ (%) / Substance content $\pm \Delta$ (%)				Содержание ткани $\pm \Delta$ (%) / Tissue content $\pm \Delta$ (%)			
		P	F	DM	MS	M	C	F	D
1	CC-CAPNI 316 CC-CAPNI 4751 GC-CAST 282								
2	AG-CAST 2959 CC-CAPNI 316 CC-CAPNI 4751 GC-CAST 282	38,02 $\pm$ 3,04	34,09 $\pm$ 5,11	42,41 $\pm$ 1,06	3,96 $\pm$ 0,11	74,2	24,2	1,6	105,5 $\pm$ 5,1
3	AA-CAST 2959 GC-CAPNI 316 CT-CAPNI 4751 GC-CAST 282	85,16 $\pm$ 6,85	38,31 $\pm$ 0,58	25,54 $\pm$ 5,96	0,98 $\pm$ 0,14	78,3	20,6	1,1	116,8 $\pm$ 5,7
4	AA-CAST 2959 GC-CAPNI 316 CT-CAPNI 4751 GC-CAST 282	39,05 $\pm$ 3,12	40,66 $\pm$ 6,1	42,77 $\pm$ 1,2	1,89 $\pm$ 0,05	89,2	8,3	2,5	106,6 $\pm$ 5,4
5	AG-CAST 2959 GG-CAPNI 316 CT-CAPNI 4751 GC-CAST 282	66,58 $\pm$ 5,33	17,01 $\pm$ 2,55	31,39 $\pm$ 0,79	3,25 $\pm$ 0,09	78,3	20,3	1,4	95,6 $\pm$ 4,6
6	AG-CAST 2959 GG-CAPNI 316 TT-CAPNI 4751 GC-CAST 282	66,96 $\pm$ 5,36	20,93 $\pm$ 3,14	31,16 $\pm$ 0,8	4,08 $\pm$ 0,12	76,7	22,5	0,8	110,7 $\pm$ 6,0
7	AG-CAST 2959 GG-CAPNI 316 TT-CAPNI 4751 GC-CAST 282	62,58 $\pm$ 5,01	18,45 $\pm$ 2,77	34,91 $\pm$ 0,87	3,19 $\pm$ 0,09	80,8	17,5	1,7	109,1 $\pm$ 5,4
8	GG-CAST 2959 GC-CAPNI 316 CC-CAPNI 4751 GG-CAST 282	79,51 $\pm$ 6,36	8,11 $\pm$ 1,22	29,14 $\pm$ 0,73	4,04 $\pm$ 0,11	67,5	31,9	0,6	124,2 $\pm$ 5,5
9	AG-CAST 2959 GG-CAPNI 316 CC-CAPNI 4751 GG-CAST 282	51,56 $\pm$ 4,12	31,16 $\pm$ 4,67	38,44 $\pm$ 0,96	2,13 $\pm$ 0,06	62,5	35,8	1,7	80,4 $\pm$ 3,5
	GG-CAST 2959	63,61 $\pm$ 5,09	17,77 $\pm$ 2,67	30,35 $\pm$ 0,76	3,3 $\pm$ 0,09	80,8	17,5	1,7	96,2 $\pm$ 5,1

Примечание: P – белок, F – жир, DM – сухое вещество, MS – минеральные вещества, M – мышечная ткань, C – соединительная ткань, F – жировая ткань, D – диаметр мышечных волокон, Δ – погрешность измерения

Note: P – protein, F – fat, DM – dry matter, MS – mineral substances, M – muscle tissue, C – connective tissue, F – fat tissue, D – diameter of muscle fibers, Δ – measurement error

Анализ химического состава длиннейшей мышцы спины изучаемых животных в зависимости от генотипа (табл. 2) показал, что наибольший процент белка и наименьший жира наблюдались у бычков с генотипами GG-CAPN1_316, TT-CAPN1_4751, GC-CAST_282 и GG-CAST_2959. Максимальное содержание жира было в мясе животных, гетерозиготных по вышеуказанным полиморфизмам.

Таблица 2. Химический состав мяса бычков абердин-ангусской породы в зависимости от генотипа

Table 2. Chemical composition of meat from Aberdeen Angus bulls depending on genotype

Генотип (n) / Genotype (n)	Содержание в пересчёте на сухое вещество $\pm \sigma$ (%) / Content in terms of dry matter $\pm \sigma$ (%)			
	Белок / Protein	Жир / Fat	Сухое вещество / Dry matter	Минеральные вещества / Mineral substances
GG-CAPN1_316 (4)	68,2 $\pm$ 2,8	16,3 $\pm$ 2,4	31,4 $\pm$ 1,6	3,7 $\pm$ 0,7
GC-CAPN1_316 (3)	52,4 $\pm$ 3,7	29,6 $\pm$ 3,4	37,5 $\pm$ 2,4	2,4 $\pm$ 0,9
CC-CAPN1_316 (2)	61,6 $\pm$ 5,8	19,0 $\pm$ 4,6	34,0 $\pm$ 3,5	2,5 $\pm$ 1,5
CC-CAPN1_4751 (4)	59,6 $\pm$ 4,5	21,7 $\pm$ 3,7	34,2 $\pm$ 2,8	2,6 $\pm$ 1,1
CT-CAPN1_4751 (3)	57,5 $\pm$ 4,0	26,2 $\pm$ 3,6	35,1 $\pm$ 2,6	3,1 $\pm$ 2,6
TT-CAPN1_4751 (2)	71,0 $\pm$ 3,5	13,3 $\pm$ 2,7	32,0 $\pm$ 2,0	3,6 $\pm$ 0,8
GC-CAST_282 (7)	62,6 $\pm$ 4,3	20,4 $\pm$ 3,6	33,9 $\pm$ 2,6	3,1 $\pm$ 1,0
GG-CAST_282 (2)	57,6 $\pm$ 2,9	24,5 $\pm$ 3,1	34,4 $\pm$ 2,4	2,7 $\pm$ 0,9
AA-CAST_2959 (2)	62,1 $\pm$ 5,7	22,2 $\pm$ 5,1	34,2 $\pm$ 3,5	1,4 $\pm$ 0,8
AG-CAST_2959 (5)	57,1 $\pm$ 3,5	24,3 $\pm$ 2,8	35,7 $\pm$ 2,2	3,3 $\pm$ 0,9
GG-CAST_2959 (2)	71,6 $\pm$ 3,4	12,9 $\pm$ 2,6	29,7 $\pm$ 0,9	3,7 $\pm$ 0,7

Примечание: σ – среднее квадратичное отклонение выборки

Note: σ – the mean square deviation of the sample

При этом, по сравнению с гетерозиготными животными, пробы *M. Longissimus dorsum* бычков с генотипами GG-CAPN1_316 и GG-CAST_2959 содержали достоверно более высокие доли белка (на 15,8 и 14,5 % соответственно) и меньшие жира (на 13,3 и 11,4 % соответственно) (рис. 1).

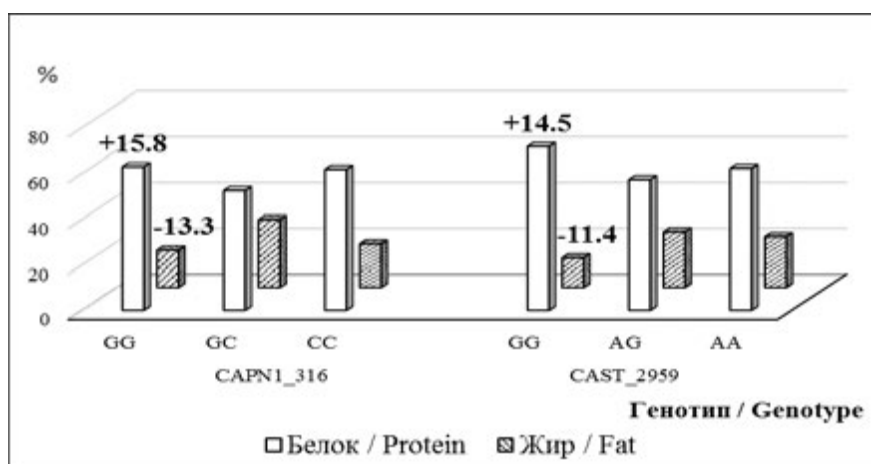


Рисунок 1. Связь полиморфизмов генов кальпаина 1 и кальпастатина с содержанием белка и жира в мясе бычков абердин-ангусской породы

Figure 1. Association of the polymorphisms of calpain 1 and calpastatin genes with protein and fat content in the meat of Aberdeen Angus bulls

В отношении сухого вещества, предположительно оказывающего влияние на устойчивость мяса при хранении (Zhu Y et al., 2022), незначительные преимущества наблюдалось у животных с

генотипом GC-*CAPN1*_316 и AG-*CAST*_2959, а по минеральным веществам – у GG-*CAPN1*_316 и GG-*CAST*_2959.

Анализ гистологической структуры длиннейшей мышцы спины бычков не выявил значительных различий по содержанию в образцах мышечной и жировой ткани между животными различных генотипов – разница между генотипами составляла в большинстве случаев менее 1 % (табл. 1).

В отношении соединительной ткани наблюдалось статистически значимое превосходство по наименьшему её содержанию, способствующему формированию более нежного мяса, у животных с генотипами CT-*CAPN1*_4751 – 17,0 %, что было ниже на 7,5-7,7 % по сравнению с генотипами CC и TT. Разница по данному показателю между гомозиготными генотипами (TT-CC) была незначительна и составила 0,2 %. Также наблюдалась достоверная разница по полиморфизму *CAST*_2959 между бычками с генотипом AA с минимальным содержанием соединительной ткани (14,5 %) по сравнению с генотипом AG и GG, превышающими этот показатель на 9,6 и 10,2 % соответственно (рис. 2). По полиморфизму *CAST*_282 значительно меньшее содержание соединительной ткани оказалось у животных с генотипом GC по сравнению с GG (разница 21,4 %; $t=3,27$; $P\leq 0,05$), что показывает положительное влияние аллеля C-*CAST*_282 на нежность мяса.

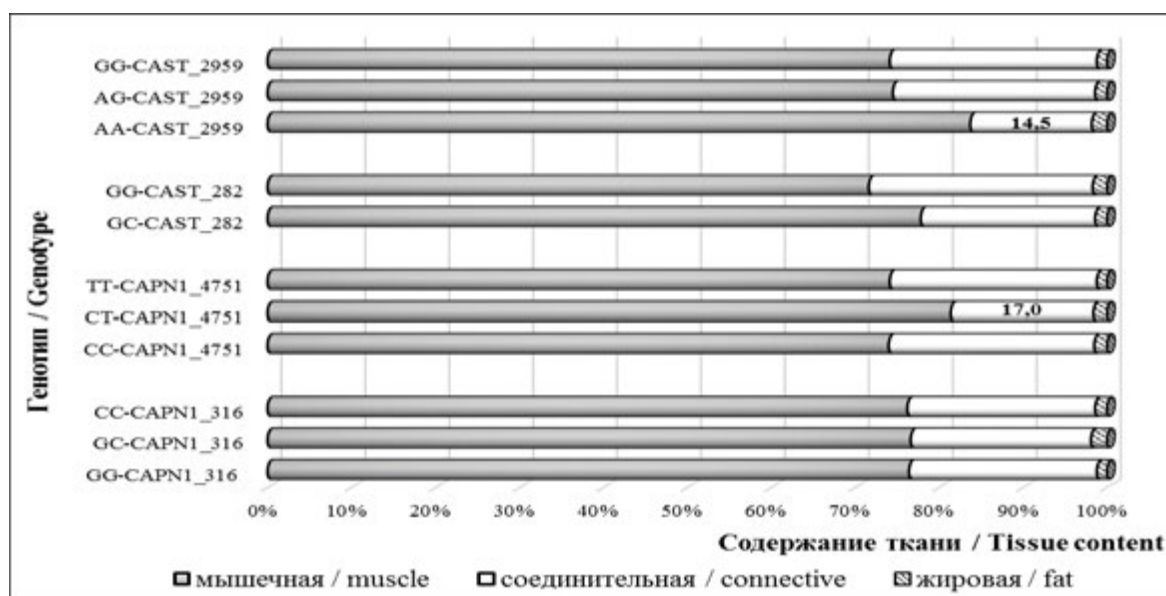


Рисунок 2. Гистологическая структура длиннейшей мышцы спины бычков абердин-ангусской породы разных генотипов
Figure 2. Histological structure of *Musculus longissimus dorsi* of Aberdeen Angus bulls of the different genotypes

Оценка связи диаметра мышечных волокон с генотипами по полиморфизмам *CAPN1*_316, *CAPN1*_4751, *CAST*_282 и *CAST*_2959 (рис. 3) показала, что наибольший диаметр миофибрилл наблюдался в пробах от бычков с генотипами CC-*CAPN1*_316, TT-*CAPN1*_4751, GC-*CAST*_282 и AA-*CAST*_2959. Причём преимущество животных с TT-*CAPN1*_4751 на 16,5 мкм по сравнению с CC-генотипом оказалось статистически значимым ($t=3,27$; $P\leq 0,05$). Также достоверным оказалось наблюдаемое превосходство (на 21,4 мкм больше) животных с генотипом GC-*CAST*_282 по сравнению с GG-*CAST*_282 ($t=4,80$; $P\leq 0,05$).

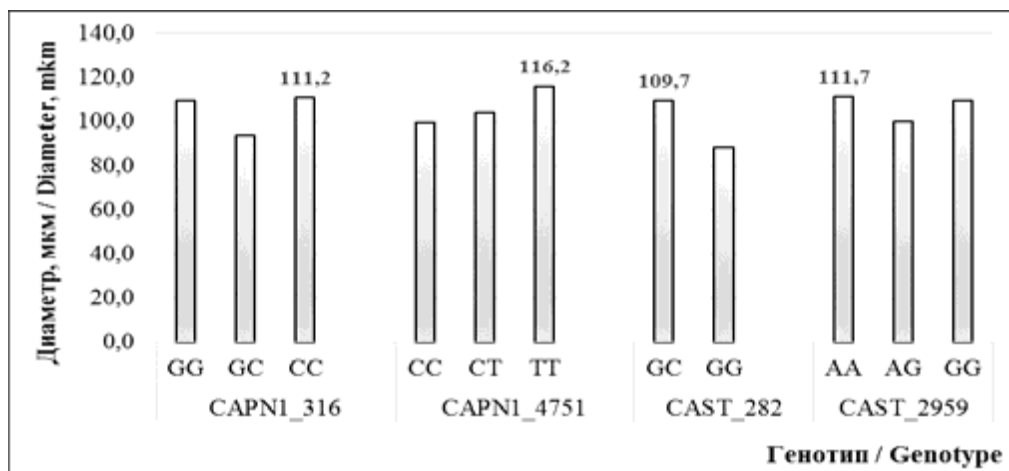


Рисунок 3. Диаметр мышечных волокон *M. longissimus dorsum* бычков абердин-ангусской породы в зависимости от генотипов по полиморфизмам генов кальпаина 1 (*CAPN1*) и кальпастатина (*CAST*)

Figure 3. Diameter of muscle fibers of *M. longissimus dorsum* of Aberdeen Angus bulls depending on genotype by calpain 1 (*CAPN1*) and calpastatin (*CAST*) gene polymorphisms

Обсуждение полученных результатов.

Полученные результаты согласуются с ранее проведенным исследованием, показавшим связь генотипов GG-*CAPN1*_316 и GG-*CAST*_2959 с более высоким содержанием в туше дорогих отрубов и, как следствие, реализацией их по более высокой стоимости (Kononova E et al., 2024). Так, туши, полученные от животных с генотипом GG-*CAPN1*_316, в среднем оказались на 10 983 и 21 374 рублей более прибыльными по сравнению с мясом от носителей генотипов GC и CC соответственно. Средняя стоимость туш от бычков генотипа GG-*CAST*_2959 превышала полученные от генотипов AG и AA данного полиморфизма на 18 223-36 409 рублей.

Наблюдаемое в нашей работе положительное влияние аллелей *CAPN1*_316, C-*CAPN1*_4751, C-*CAST*_282 и A-*CAST*_2959 на химический состав и гистологическую структуру длиннейшей мышцы спины подтверждается и результатами ранее проведенных исследований ряда других авторов. Так, в 2021 г. Тюлебаев С.Д. и Кадышева М.Д. обнаружили значимые преимущества генотипа CC-*CAPN1*_316 как при оценке собственного влияния, так и в сочетании с генотипом TT-*CAST*_2857, в отношении свойств нежности, сочности и вкуса в мясе бычков, гомозиготных по аллелю C-*CAPN1*_316, оценки этих свойств были выше на 1,22-1,56 баллов по сравнению с другими генотипами. Недавние исследования креольского крупного рогатого скота из региона Амазонас (Перу) также подтвердили положительное влияние генотипов CC полиморфизма *CAPN*_316 на и AA полиморфизма *CAST*_2959 на нежность мяса, так как пробы длиннейшей мышцы спины, полученные от животных TT-*CAPN1*_316 и GG-*CAST*_2959, имели более высокие показатели усилия сдвига по Уорнеру-Братцлеру (WBSF) (Saucedo-Uriarte JA et al., 2024).

Следует отметить, что в современных условиях мясо крупного рогатого скота набирает всё большую популярность среди потребителей, в частности, прогнозируется постепенное снижение глобального спроса на животные белки, получаемые из свинины и мяса птицы в пользу говядины, ввиду её высокой диетической ценности (Place SE and Miller AM, 2020).

Известно, что крупнейшие производители говядины поставляют на рынки продукцию самого разного качества, что не исключает импорт, в том числе и в Россию, жёсткого, волокнистого с отсутствием жировых прослоек мяса со специфическим запахом, которое возможно использовать лишь для производства колбасных изделий и консервов. Кроме того, неоднократно фиксировались факты применения зарубежными производителями стимуляторов роста мышечной ткани, в частности, рактопамина – препарата, запрещённого в 160 странах, включая Россию и Евросоюз (Challis JK et al.,

2021). Всё это указывает на необходимость импортозамещения говядины путём развития собственного производства, в достаточных для потребителей объёмах и приемлемого качества. Скорейшему достижению этой цели будут способствовать использование крупного рогатого скота специализированных мясных пород, применение оптимальных стратегий кормления и содержания животных, а также мер, направленных на максимальную реализацию их генетического потенциала (Хайнацкий В.Ю., 2021; Dairoh et al., 2024).

В связи с этим научные исследования, направленные на поиск и изучение генных полиморфизмов, влияющих на продуктивность, не теряют популярности, рассматривая для практического применения новые маркеры, которые могли бы быть полезны в мясном скотоводстве (Селионова М.И. и др., 2023), что в перспективе будет способствовать формированию надёжной племенной базы, повысит информативность геномной оценки и, как следствие, конкурентоспособность мясного скотоводства и уровень продовольственной безопасности нашей страны.

Заключение.

Полученные результаты показали тенденции влияния полиморфизма *CAST_282* и значимые ассоциации полиморфизмов *CAPN1_316* и *CAPN1_4751* и *CAST_2959* с показателями химического состава и гистологической структуры длиннейшей мышцы спины крупного рогатого скота абердин-ангусской породы. В пробах бычков с генотипом GC-*CAST_282* наблюдались больший процент белка и диаметр мышечных волокон при минимальном содержании жира и соединительной ткани, что указывает на положительное влияние аллеля С на данные показатели. Пробы бычков с генотипами GG-*CAPN1_316* и GG-*CAST_2959* содержали больше белка и меньше жира, что указывает на его большую питательную ценность и пригодность данного сырья для детского или диетического питания. Мышечная ткань животных генотипов СТ-*CAPN1_4751* и АА-*CAST_2959* содержала меньше соединительной ткани и состояла из миофибрилл большего диаметра, что способствует формированию более нежного и приятного на вкус мяса. Таким образом, в отрасли мясного скотоводства возможна селекция крупного рогатого скота для получения говядины с высокими питательными и вкусовыми свойствами.

Список источников

1. Анализ российских популяций крупного рогатого скота мясного направления продуктивности по полиморфизмам гена кальпаина 1 / Е.Н. Коновалова, О.С. Романенкова, Е.А. Гладырь // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 107. № 1. С. 42-50. [Konovalova EN, Romanenkova OS, Gladyr EA. The analysis of the Russian beef cattle population on polymorphism of CAPN1 gene. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023a;107(1):42-50. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-42
2. Вартанова М.Л., Газимагомедова П.К. Приоритетное направление развития сельского хозяйства: обеспечение населения продуктами отечественного производства // Продовольственная политика и безопасность. 2018. Т. 5. № 1. С. 37-46. [Vartanova ML, Gazimagomedova PK. Priority direction of agricultural development: provision of population with domestic production. Food Policy and Security. 2018;5(1):37-46. (In Russ.)]. doi: 10.18334/ppib.5.1.40105
3. ГОСТ 15113.4-2021. Концентраты пищевые. Гравиметрические методы определения массовой доли влаги. Введ. 01.01.2022. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с. [GOST 15113.4-2021. Kontsentraty pishchevye. Gravimetricheskie metody opredeleniya massovoi doli vlagi. Vved. 01.01.2022. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii; 2021:11 p. (In Russ.)].
4. ГОСТ Р 52416-2005. Концентраты пищевые. Гравиметрический метод определения массовой доли золы. Введ. 01.01.2007. М.: Стандартинформ, 2007. 5 с. [GOST R 52416-2005. Kontsentraty pishchevye. Gravimetricheskii metod opredeleniya massovoi doli zoly. Vved. 01.01.2007. Moscow: Standartinform; 2007:5 p. (In Russ.)].

5. ГОСТ 25011-2017. Мясо и мясные продукты. Методы определения белка. Введ. 01.07.2018. М.: Стандартиформ, 2018. 13 с. [GOST 25011-2017. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya belka. Vved. 01.07.2018. Moscow: Standartinform; 2018:13 p. (*In Russ.*)].
6. ГОСТ 23042-2015. Мясо и мясные продукты. Методы определения жира. Введ. 01.01.2017. М.: Стандартиформ, 2019. 8 с. [GOST 23042-2015. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya zhira. Vved. 01.01.2017. Moscow: Standartinform; 2019:8 p. (*In Russ.*)].
7. Гурова С.В. Морфология. Гистология: учеб. пособие. Пермь: ИПЦ «Прокрост», 2020. 172 с. [Gurova SV. Morfologiya. Gistologiya: ucheb. posobie. Perm': IPC «Prokrost»; 2020:172 p. (*In Russ.*)].
8. ДНК-анализ полиморфизма генов миостатина, лептина и кальпаина 1 у российской популяции крупного рогатого скота абердин-ангусской породы / Е.Н. Коновалова, М.И. Селионова, Е.А. Гладырь, О.С. Романенкова, Л.В. Евстафьева // Сельскохозяйственная биология. 2023б. Т. 58. № 4. С. 622-637. [Konovalova EN, Selionova MI, Gladyr EA, Romanenkova OS, Evstafeva LV. DNA analysis of myostatin, leptin and calpain 1 gene polymorphism in Russian cattle population of Aberdeen Angus breed. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2023b;58(4):622-637. (*In Russ.*)]. doi: 10.15389/agrobiology.2023.4.622rus doi: 10.15389/agrobiology.2023.4.622eng
9. Исследование полиморфизма Rs17872000 в генах кальпаина (CAPN1) и RS109221039 кальпастатина (CAST) у крупного рогатого скота мясного направления продуктивности / Е.Л. Романишко, А.И. Киреева, М.Е. Михайлова, Р.И. Шейко // Молекулярная и прикладная генетика. 2022;32:88-96. [Ramanishka EL, Kireyeva AI, Mikhailova ME, Sheyko RI. Study of RS17872000 polymorphism in calpain (CAPN1) and RS109221039 calpastatin (CAST) genes in meat productivity cattle. Molekulyarnaya i prikladnaya genetika. 2022;32:88-96. (*In Russ.*)]. doi: 10.47612/1999-9127-2022-32-88-96
10. Маркер-ассоциированная и геномная селекция мясного скота / М.И. Селионова, Л.В. Евстафьева, Е.Н. Коновалова, Е.Н. Белая // Тимирязевский биологический журнал. 2023. № 2. С. 37-48. [Selionova MI, Evstafeva LV, Konovalova EN, Belaya EN. Marker-assisted and genomic selection of beef cattle. Timiryazev Biological Journal. 2023;2:37-48. (*In Russ.*)]. doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-37-48
11. Новая система генотипирования крупного рогатого скота на основе технологии ДНК-микрочипов / Ю.А. Столповский, С.Б. Кузнецов, Е.В. Солоднева, И.Д. Шумов // Генетика. 2022. Т. 58. № 8. С. 857-871. [Stolpovsky YuA, Kuznetsov SB, Solodneva EV, Shumov ID. New cattle genotyping system based on dna microarray technology. Russian Journal of Genetics. 2022;58(8):885-898. (*In Russ.*)]. doi: 10.31857/S0016675822080094
12. Павлов А.В., Рудь А.И. Факторы, влияющие на вкусовые качества мяса. Эффективное животноводство. 2023. № 7(189). С. 39-41. [Pavlov AV, Rud' AI. Faktory, vliyayushchie na vkusovye kachestva myasa. Effektivnoe zhiivotnovodstvo. 2023;7(189):39-41. (*In Russ.*)].
13. Состояние молочного и мясного скотоводства в мире / Т.В. Остапчук, Мухаметзянов Р.Р., Джанчарова Г.К., Платоновский Н.Г., Васильева Е.Н., Иванцова Н.Н., Аннакова З.К. // Московский экономический журнал. 2021. № 12. С. 219-243. [Ostapchuk TV, Mukhametzyanov RR, Dzhancharova GK, Platonovskiy NG, Vasil'eva EN, Ivantsova NN, Annakova ZK. The state of dairy and beef cattle breeding in the world. Moscow Economic Journal. 2021;12:219-243. (*In Russ.*)]. doi: 10.24412/2413-046X-2021-10750
14. Тюлебаев С.Д., Кадышева М.Д. Влияние полиморфных генов на качественные показатели мясной продукции // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2021;13(2):50-56. [Tyulebaev SD, Kadyшева MD. Influence of polymorphic genes on qualitative indicators of meat products. Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2021;13(2):50-56. (*In Russ.*)]. doi: 10.36508/rsatu.2021.50.2.007
15. Хайнацкий В.Ю. Метод племенной оценки быков-производителей мясных пород на основе BLUP // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 1. С. 20-31. [Haynatsky VYu BLUP Method of breeding assessment of beef sires. Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(1):20-31. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-104-1-20

16. Шамина О.В. Роль мясного скотоводства в формировании мясного баланса России // Russian Journal of Management. 2023. Т. 11. № 2. С. 184-190. [Shamina OV. The role of beef cattle breeding in the formation of the meat balance of Russia. Russian Journal of Management. 2023;11(2):184-190. (In Russ.)]. doi: 10.29039/2409-6024-2023-11-2-184-190
17. Challis JK, Sura S, Cantin J, Curtis AW, Shade KM, McAllister TA, Jones PD, Giesy JP, Larney FJ. Ractopamine and other growth-promoting compounds in beef cattle operations: fate and transport in feedlot pens and adjacent environments. Environmental Science and Technology. 2021;55(3):1730-1739. doi: 10.1021/acs.est.0c06450
18. Dairoh, Ulum MF, Jakaria, Sumantri C. Calpain 1 gene expression in liver tissue and the association of novel calpain 1 single-nucleotide polymorphisms (SNPs) with meat quality in Bali cattle. Arch Anim Breed. 2024;67(3):311-321. doi: 10.5194/aab-67-311-2024
19. Konovalova E, Romanenkova O, Evstafeva L, Safonova S, Selionova M, Gladyr E. Aberdeen Angus beef quality and profitability in dependence of the genotypes. E3S Web of Conferences. 2024;548:02017. doi: 10.1051/e3sconf/202454802017
20. Place SE, Miller AM. Beef production. What Are the Human and Environmental Impacts? Nutrition Today. 2020;55(5):227-233. doi: 10.1097/nt.0000000000000432
21. Saucedo-Urriarte JA, Portocarrero-Villegas S, Diaz-Quevedo C, Quispe-Ccasa HA, Tapia-Limonchi R, Chenet SM, Cesar ASM, Cayo-Colca IL. Association of polymorphisms in CAPN1 and CAST genes with the meat tenderness of Creole cattle. Sci Agric. 2024;81:e20230098. doi: 10.1590/1678-992X-2023-0098
22. Sun X, Wu X, Fan Y, Mao Y, Ji D, Huang B, Yang Z. Effects of polymorphisms in CAPN1 and CAST genes on meat tenderness of Chinese Simmental cattle. Archives Animal Breeding. 2018;61(4):433-439. doi: 10.5194/aab-61-433-2018
23. Zhu Y, Wang W, Li M, Zhang J, Ji L, Zhao Z, Zhang R, Cai D, Chen L. Microbial diversity of meat products under spoilage and its controlling approaches. Frontiers in Nutrition. 2022;9:1078201. doi: 10.3389/fnut.2022.1078201

References

1. Konovalova EN, Romanenkova OS, Gladyr EA. The analysis of the Russian beef cattle population on polymorphism of CAPN1 gene. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;107(1):42-50. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-42
2. Vartanova ML, Gazimagomedova PK. Priority direction of agricultural development: provision of population with domestic production. Food Policy and Security. 2018;5(1):37-46. doi: 10.18334/ppib.5.1.40105
3. State Standard 15113.4-2021. Food concentrates. Gravimetric methods for determining the mass fraction of moisture. Implementation date 01.01.2022. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii; 2019:11 p.
4. State Standard R 52416-2005. Food concentrates. Gravimetric method of ash mass fraction determination. Implementation date. 01.01.2007. Moscow: Standardinform; 2019:5 p.
5. State Standard 25011-2017. Meat and meat products. Protein determination. Implementation date. 01.07.2018. Moscow: Standardinform; 2018:13 p.
6. State Standard 23042-2015. Meat and meat products. Fat determination methods. Implementation date 01.01.2017. Moscow: Standardinform; 2019:8 p.
7. Gurova SV. Morphology. Histology: study guide. Perm': PPC «Prokrost»; 2020:172 p.
8. Konovalova EN, Selionova MI, Gladyr EA, Romanenkova OS, Evstafeva LV. DNA analysis of myostatin, leptin and calpain 1 gene polymorphism in Russian cattle population of Aberdeen Angus breed. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2023a;58(4):622-637. doi: 10.15389/agrobiol.2023.4.622eng

9. Ramanishka EL, Kireyeva AI, Mikhailova ME, Sheyko RI. Study of RS17872000 polymorphism in calpain (CAPN1) and RS109221039 calpastatin (CA ST) genes in meat productivity cattle. *Molecular and Applied Genetics*. 2022;32:88-96. doi: 10.47612/1999-9127-2022-32-88-96
10. Selionova MI, Evstafeva LV, Konovalova EN, Belaya EN. Marker-assisted and genomic selection of beef cattle. *Timiryazev Biological Journal*. 2023;2:37-48. doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-37-48
11. Stolpovsky YuA, Kuznetsov SB, Solodneva EV, Shumov ID. New cattle genotyping system based on DNA microarray technology. *Russian Journal of Genetics*. 2022;58(8):885-898. doi: 10.31857/S0016675822080094
12. Pavlov AV, Rud' AI. Factors affecting the flavor quality of meat. *Efficient Livestock Production*. 2023;7(189):39-41.
13. Ostapchuk TV, Mukhametzyanov RR, Dzhancharova GK, Platonovskiy NG, Vasil'eva EN, Ivantsova NN, Annakova ZK. The state of dairy and beef cattle breeding in the world. *Moscow Economic Journal*. 2021;12:219-243. doi: 10.24412/2413-046X-2021-10750
14. Tyulebaev SD, Kadysheva MD. Influence of polymorphic genes on qualitative indicators of meat products. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2021; 13(2):50-56. doi: 10.36508/rsatu.2021.50.2.007
15. Haynatsky VYu BLUP Method of breeding assessment of beef sires. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(1):20-31. doi: 10.33284/2658-3135-104-1-20
16. Shamina OV. The role of beef cattle breeding in the formation of the meat balance of Russia. *Russian Journal of Management*. 2023;11(2):184-190. doi: 10.29039/2409-6024-2023-11-2-184-190
17. Challis JK, Sura S, Cantin J, Curtis AW, Shade KM, McAllister TA, Jones PD, Giesy JP, Larney FJ. Ractopamine and other growth-promoting compounds in beef cattle operations: fate and transport in feedlot pens and adjacent environments. *Environmental Science and Technology*. 2021;55(3):1730-1739. doi:10.1021/acs.est.0c06450
18. Dairoh, Ulum MF, Jakaria, Sumantri C. Calpain 1 gene expression in liver tissue and the association of novel calpain 1 single-nucleotide polymorphisms (SNPs) with meat quality in Bali cattle. *Arch Anim Breed*. 2024;67(3):311-321. doi: 10.5194/aab-67-311-2024
19. Konovalova E, Romanenkova O, Evstafeva L, Safonova S, Selionova M, Gladyr E. Aberdeen Angus beef quality and profitability in dependence of the genotypes. *E3S Web of Conferences*. 2024;548:02017. doi:10.1051/e3sconf/202454802017
20. Place SE, Miller AM. Beef production. What Are the Human and Environmental Impacts? *Nutrition Today*. 2020;55(5):227-233. doi:10.1097/nt.0000000000000432
21. Saucedo-Urriarte JA, Portocarrero-Villegas S, Diaz-Quevedo C, Quispe-Ccasa HA, Tapia-Limonchi R, Chenet SM, Cesar ASM, Cayo-Colca IL. Association of polymorphisms in CAPN1 and CAST genes with the meat tenderness of Creole cattle. *Sci Agric*. 2024;81:e20230098. doi: 10.1590/1678-992X-2023-0098
22. Sun X, Wu X, Fan Y, Mao Y, Ji D, Huang B, Yang Z. Effects of polymorphisms in CAPN1 and CAST genes on meat tenderness of Chinese Simmental cattle. *Archives Animal Breeding*. 2018;61(4):433-439. doi: 10.5194/aab-61-433-2018
23. Zhu Y, Wang W, Li M, Zhang J, Ji L, Zhao Z, Zhang R, Cai D, Chen L. Microbial diversity of meat products under spoilage and its controlling approaches. *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:1078201. doi: 10.3389/fnut.2022.1078201

Информация об авторах:

Елена Николаевна Коновалова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651104.

Лилия Валерьевна Евстафьева, старший преподаватель кафедры ветеринарии и физиологии животных, ФГОУ ВО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, тел.: +7 (499) 976-04-80.

Станислава Сергеевна Сафонова, аспирант, Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, тел.: +7 (499) 976-04-80.

Ольга Сергеевна Романенкова, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651104.

Елена Александровна Гладырь, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651104.

Information about the authors:

Elena N Konovalova, Cand. Sci. (Biology), senior researcher of the Laboratory of Molecular Genetics of Agricultural Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Dubrovitsy 60, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-04.

Liliia V Evstafeva, senior lecturer of the Department of Veterinary Medicine and Animal Physiology, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskay St., Moscow, 127434, tel.: +7 (499) 976-04-80.

Stanislava S Safonova, PhD student of Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskay St., Moscow, 127434, tel.: +7 (499) 976-04-80.

Olga S Romanenkova, Cand. Sci. (Biology), researcher of the Laboratory of Molecular Genetics of Agricultural Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Dubrovitsy 60, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-04.

Elena A Gladyr, Cand. Sci. (Biology), leading researcher, Chief of the Laboratory of Molecular Genetics of Agricultural Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Dubrovitsy 60, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-04.

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 17.09.2024; approved after reviewing 24.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 53-67.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 53-67.

Научная статья
УДК 636.082 (571.1)
doi:10.33284/2658-3135-107-4-53

Оценка качества генеалогических данных в племенных предприятиях Западной Сибири

Евгений Варисович Камалдинов¹, Алексей Фёдорович Петров², Кирилл Николаевич Нарожных³, Павел Николаевич Пальчиков⁴

^{1,2,3}Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия

⁴АО «Новосибирскагроплем», с. Ярково, Новосибирской обл., Россия

¹ekamaldinov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0341-5055>

²lexluterking@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7402-4107>

³narozhnykh@nsau.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1519-697X>

⁴v.2899936@yandex.ru

Аннотация. Анализ генеалогических баз данных, содержащих более 6 миллионов записей, выявил значительное количество пропусков в данных о происхождении животных, особенно по быкам-производителям. Это затрудняет внедрение технологий автоматизированного подбора родительских пар и снижает эффективность контроля уровня инбридинга. Установлено, что в среднем 7 % записей о предках до третьего ряда родословной содержат пропуски, из которых 85,5 % приходится на быков-производителей. Это представляет серьёзную проблему при создании региональных цифровых платформ для автоматизации принятия решений в племенном животноводстве, ограничивает возможности объективной оценки племенной ценности животных и препятствует необходимому давлению целенаправленного искусственного отбора и закрепления производителей за маточным поголовьем. Предложены способы повышения качества первичных генеалогических данных, в том числе с использованием зарубежных источников. Показано, что автоматизация процесса принятия решений в племенном молочном скотоводстве позволяет не только ускорить выявление ошибок, но и значительно сократить время на их исправление благодаря создаваемым агрегаторам данных. Этот процесс может стать основой для крупномасштабной верификации и валидации данных первичного зоотехнического учёта с последующей передачей в Федеральную государственную информационную-аналитическую систему племенных ресурсов (ФГИАС ПР). Кроме того, это повысит эффективность работы зоотехников-селекционеров в крупных племенных и товарных хозяйствах, а также позволит отбирать быков-производителей, генетически совместимых с маточным поголовьем как отдельного региона, так и их совокупности.

Ключевые слова: молочный скот, генеалогические данные, информационно-аналитическая система, племенная ценность, селекция, инбридинг, сельское хозяйство

Для цитирования: Оценка качества генеалогических данных в племенных предприятиях Западной Сибири / Е.В. Камалдинов, А.Ф. Петров, К.Н. Нарожных, П.Н. Пальчиков // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 53-67. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-53>

Original article

Assessment of the quality of genealogical data in breeding enterprises of Western Siberia

Evgeny V Kamaldinov¹, Alexey F Petrov², Kirill N Narozhnykh³, Pavel N Palchikov⁴

^{1,2,3}Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia

⁴JSC Novosibirskagropem, Yarkovo settlement, Novosibirsk region, Russia

¹ekamaldinov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0341-5055>

²lexluterking@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7402-4107>

³narozhnykh@nsau.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1519-697X>

⁴v.2899936@yandex.ru

Abstract. Analysis of genealogical databases containing more than 6 million records revealed a significant number of gaps in the data on the origin of animals, especially for sires. This complicates the

implementation of automated parental pair selection technologies and reduces the effectiveness of inbreeding level control. It was found that on average 7% of records on ancestors up to the third row of the pedigree contain gaps, of which 85.5% are for sires. This is a serious problem in the creation of regional digital platforms for the automation of decision-making in breeding livestock, limits the possibilities of an objective assessment of the breeding value of animals and hinders the necessary pressure of targeted artificial selection and assignment of sires to breeding stock.

Methods for improving the quality of primary genealogical data are proposed, including using foreign sources. It is shown that automation of the decision-making process in purebred dairy breeding allows not only to speed up the detection of errors, but also to significantly reduce the time for their correction thanks to the created data aggregators. This process can become the basis for large-scale verification and validation of primary zootechnical accounting data with subsequent transfer to the Federal State Information and Analytical System of Breeding Resources (FGIAS PR). In addition, this will increase the efficiency of zootechnicians-breeders in large breeding and commercial farms, and will also allow selecting breeding bulls that are genetically compatible with the breeding stock of both a separate region and their totality.

Keywords: dairy cattle, genealogical data, information and analytical system, breeding value, breeding, inbreeding, agriculture

For citation: Kamaldinov EV, Petrov AF, Narozhnykh KN, Palchikov PN. Assessment of the quality of genealogical data in breeding enterprises of Western Siberia. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):53-67. (In Russ). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-53>

Введение.

Молочное скотоводство – одна из важнейших отраслей сельского хозяйства, обеспечивающая население ценными продуктами питания. Повышение эффективности этой отрасли – приоритетная задача аграрного сектора, в решении которой ключевая роль принадлежит селекционно-племенной работе, направленной на улучшение продуктивных и племенных качеств животных (Маринченко Т.Е., 2019; Швелёва О.М. и Свяженина М.А., 2023). Современное отечественное животноводство претерпевает ускоренную цифровую трансформацию, открывающую новые возможности для интенсификации селекционно-племенной работы. Одним из перспективных направлений такой трансформации является создание информационно-аналитических систем ИАС для генетической оценки и управления селекционным процессом (Cañas-Álvarez JJ et al., 2023; Cole JB et al., 2020). Инструменты цифровых платформ для племенной работы позволяют хранить, обрабатывать и анализировать большие массивы данных, вести электронный учет родословных, оценивать племенную ценность, проводить подбор родительских пар, формировать оптимальную структуру стада, управлять селекционным процессом, а также контролировать и прогнозировать его эффективность (Nilforooshan MA and Saavedra-Jiménez LA, 2020).

За рубежом активно развивается использование геномной селекции с применением искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования продуктивности животных (Schaeffer L, 2006; Wiggans GR et al., 2011; Wiggans GR and Carrillo JA, 2022). Широко используются платформы типа CDN (cdn.ca/home) Select Star SA (selectstar.ch) или Interbull (interbull.org). В России разрабатывается Федеральная государственная информационно-аналитическая система племенных ресурсов (ФГИАС ПР), которая должна стать основой для цифровизации племенной работы. Примеры использования ИИ в российском племенном деле пока немногочисленны и находятся на стадии разработки и внедрения (Васильев Н.П. и др., 2024).

Эффективность подобных систем напрямую зависит от качества входных данных, включая генеалогическую информацию (Martin P et al., 2019; Fioretti M et al., 2020; Toghiani S and Van Raden PM, 2021). Ее неполнота или некорректность неизменно приводит к искажению результатов оценки генетического потенциала (Aguilar I et al., 2020).

На протяжении нескольких десятилетий в России практикуется массовое использование импортного племенного материала, что привело к изменению генеалогической структуры отечественного маточного поголовья чёрно-пёстрого скота, преимущественно за счёт поглотительного

скрещивания. Изолированность и локализация баз данных на предприятиях не дают общего представления о реальной генеалогической структуре и сдерживают реализацию крупномасштабной селекции, затрудняя оценку и контроль уровня инбридинга в популяциях разного размера (Cavani L et al., 2018; Nyman S et al., 2022; Silva MHMA et al., 2019). Выявленные проблемы с качеством генеалогических данных подчеркивают необходимость дальнейшей разработки и совершенствования цифровых платформ для объективной и эффективной оценки генетического потенциала животных и управления селекционным процессом.

Цель исследования.

Оценка качества генеалогических данных племенных предприятий Новосибирской и Кемеровской областей для последующей разработки цифровых платформ, обеспечивающих объективный прогноз генетического потенциала.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. В качестве источников генеалогической информации были использованы базы данных ряда племенных предприятий Новосибирской и Кемеровской областей по разведению молочного скота голштинской породы, открытые данные, публикуемые ФГБНУ ВНИИ-плем (https://vniipleml.ru/l/gisc/bd_ng/db_ng_mol_krs/) и Canadian Dairy Network (CDN) (https://www.cdn.ca/files_ge_datafiles.php) с общим объемом данных, превышающим 6 млн записей.

Схема эксперимента. Для сопоставления рядов родословных отдельно взятых групп с пропущенными записями о происхождении по всем исследуемым базам данных региона было проведено ранжирование сумм частот, где минимальный ранг соответствует минимальной частоте. Также было проведено ранжирование животноводческих предприятий по степени заполненности генеалогической базы данных с применением интегрального показателя количества пропущенных записей о происхождении животных (без учёта группы «быки-осеменители»). Построены генеалогические деревья линий и семейств, представленных в хозяйствах.

Статистическая обработка. Для обработки данных, проведения анализа и построения генеалогических деревьев использовалось программное обеспечение R (Giorgi FM et al., 2022) с подключением специализированных пакетов (dplyr) (Wickham H and Grolemond GR, 2017).

Для оценки сходства хозяйств по качеству генеалогической информации и выявления групп хозяйств со схожими показателями пропущенных записей был проведён кластерный анализ с использованием расстояния Чебышева (Chen TY, 2019) и метода дальнего соседа (Поддубный В.В. и др., 2006). Для данных с рангами абсолютных частот была выбрана евклидова дистанция (Suwanda R et al., 2020) и метод Уорда (Gaikadi S and Kumar SV, 2024) которые показали наилучшие результаты. Для проведения кластерного анализа и визуализации дендрограмм были использованы пакеты factoextra (Irnowati I et al., 2021) и cluster (Bivand R, 2022). В качестве входных данных для кластерного анализа были использованы две матрицы: матрица с процентом пропущенных записей в генеалогии для каждой группы животных (быки, коровы, тёлки) в 18 хозяйствах и матрица с рангами абсолютных частот пропущенных записей о происхождении в группах животных до третьего ряда родословной. Данный метод позволяет визуализировать процесс объединения хозяйств в кластеры на дендрограмме, что делает его более наглядным и интерпретируемым.

Результаты исследований.

Анализ заполненности родословных пробандов племенных предприятий Новосибирской и Кемеровской областей выявил существенную вариабельность качества генеалогической информации в зависимости от источника. Оценка доли пропущенных записей о происхождении животных до третьего ряда родословной показала, что в среднем по региону этот показатель составляет около 7 % (табл. 1). Однако распределение пропущенных данных неоднородно: наибольшее число пропусков наблюдается в третьем ряду родословной по материнской линии (MMM), в то время как записи о происхождении по отцовской линии (O) являются наиболее полными.

Таблица 1. Ранги абсолютных частот пропущенных записей о происхождении в группах животных региональных предприятий

Table 1. Ranks of absolute frequencies of missed records of origin in animal groups of regional enterprises

Группа/ Group	O/S		OO/ SS	OM/ SD	OOO/ SSS	OOM/ SSD	OMO/ SDS	OMN/ SSD	M/ D	MN/ DD	MO/ DS	MNM/ DDD	MNO/ DDS	MON/ DSD	MOO/ SDD	Исчислена / Row/group
	Ряд рождественной / Purebreeding row															
	1	2	2	3	3	3	3	1	2	2	3	3	3	3	3	
Всего/ Total	1	3	7	5	9	11	13	13	2	8	4	14	12	10	6	0,778
Всего по быкам-осеменителям/ Total for sires	2	3	5	6	11	9	13	1	8	4	14	10	12	7	0,827	
Всего по быкам/ Total for bulls	1	3	8	5	11	7	13	2	10	4	14	9	12	6	0,705	
Всего по коровам/ Total for cows	2	4	3	7	9	12	13	1	5	6	14	11	10	8	0,876	
Всего по телкам/ Total for heifers	2	6	3	9	7	13	11	1	4	5	12	14	8	10	0,876	

Такая закономерность может быть объяснена тем, что зоотехники-селекционеры на предприятиях традиционно уделяют большее внимание заполнению отцовских рядов предков (табл. 1). В условиях широкого использования искусственного осеменения информация о быках-производителях, как правило, более доступна и полностью отражается в сопроводительной документации.

Важно отметить, что высокая доля пропущенных записей, особенно в отношении быков-производителей (85,5 % от общего числа пропусков), представляет собой серьёзную проблему для создания полноценной региональной ИАС. Неполные родословные затрудняют адекватную оценку племенной ценности животных и ограничивают возможности для проведения эффективного подбора родительских пар, направленного на повышение генетического потенциала поголовья.

Дендрограмма, построенная на основе рангов частот пропущенных генеалогических записей до третьего ряда родословной и представленная на рисунке 1, выявила два основных кластера, разделяющих анализируемые группы животных, что указывает на существенные различия в структуре пропусков между ними.

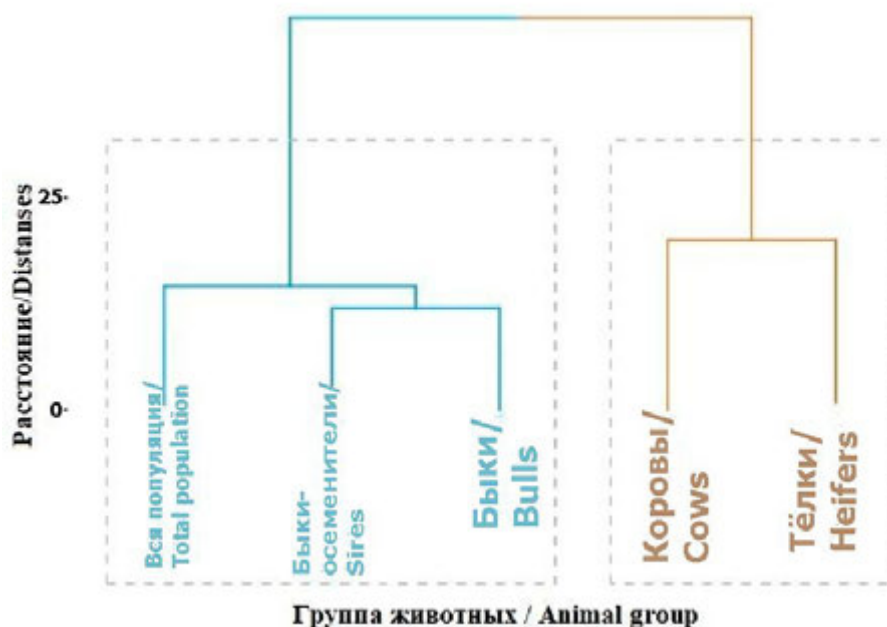


Рисунок 1. Дендрограмма групп животных по рангам пропущенных генеалогических записей
 Figure 1. Dendrogram of animal groups by ranks of missing genealogical records

Первый кластер объединяет всю популяцию, быков-осеменителей и быков, свидетельствуя о высокой степени сходства в структуре рангов пропущенных записей в этих группах (дистанция=2). Это означает, что распределение пропусков по разным предкам для быков и быков-осеменителей практически идентично распределению соответствующих пропусков для всей совокупности животных. Такой результат объясняется тем, что быки и быки-осеменители составляют значительную часть популяции, происхождение которых играет ключевую роль в процессе подбора родительских пар. Второй кластер включает коров и тёлочек, что указывает на отличия в структуре рангов пропущенных генеалогических записей для этих групп по сравнению с быками и всей популяцией. Данное различие может быть обусловлено особенностями ведения генеалогического учёта для разных половозрастных групп животных. Информация о происхождении коров и тёлочек заполняется менее тщательно относительно таковой о происхождении быков. Необходимо отме-

тительное расстояние между двумя кластерами на дендрограмме (дистанция=5.5), которое подтверждает существенные различия в структуре пропущенных генеалогических записей. Проведённый анализ был основан на рангах, а не на абсолютных частотах, что позволило снизить влияние выбросов и различий в общем числе пропусков для разных групп животных, фокусируясь на сравнительном анализе структуры пропусков.

Дендрограмма, построенная на основе рангов частот пропущенных генеалогических записей до третьего ряда родословной (рис. 2), выявила пять кластеров, отражающих структуру пропусков информации о происхождении животных. Кластеры формируются группами предков с похожими паттернами отсутствующих данных, что позволяет выявить тенденции в заполнении генеалогической информации.

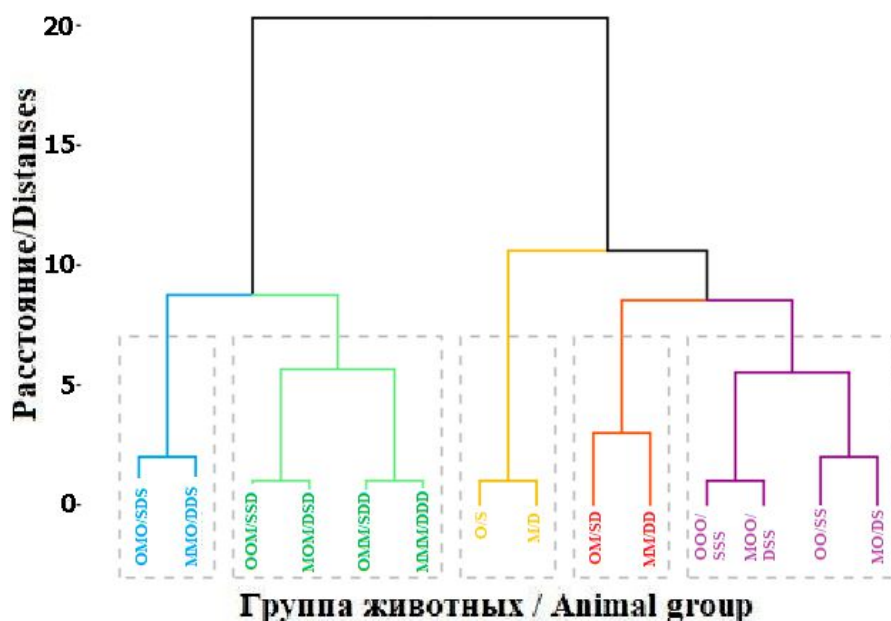


Рисунок 2. Кластеризация комбинаций предков до третьего ряда родословной по рангам частот пропусков
 Figure 2. Clustering of ancestral combinations up to the third row of the pedigree by omission frequency rank

Кластер 1 объединяет предков ОМО и ММО (предки третьего ряда родословной с одним материнским и двумя отцовскими предками в каждом случае). Близость этих групп на дендрограмме предполагает наличие схожих причин пропусков информации о происхождении для этих комбинаций предков. Сходство паттернов может быть обусловлено сложностями получения информации о более дальних родственниках, особенно по материнской линии, что объясняет объединение в кластере предков третьего ряда. Кластер 2 включает предков ООМ, МОМ, ОММ и МММ (предки третьего ряда родословной с двумя материнскими и одним отцовским предками, либо с одним материнским и двумя отцовскими, включающие информацию до третьего ряда включительно). В кластер 3 входят предки О и М (предки первого ряда – отец и мать), что указывает на сходную частоту пропусков для непосредственных родителей. Это может быть связано с тем, что информация об отце и матери зачастую записывается одновременно, и если данные об одном из родителей отсутствуют, то с большой вероятностью будут отсутствовать и данные о втором. В кластер 4 входят предки ОМ и ММ (предки второго ряда), близость данного кластера к кластеру 3 связана с тенденцией к более полному заполнению данных о родителях, чем о более дальних предках. Кластер 5 включает ООО, МОО, ОО и МО (предки второго и третьего ряда). Присутствие в

одном кластере предков разных рядов может говорить о том, что на практике заполнение генеалогической информации до второго или третьего ряда родословной обусловлен, скорее всего, практической необходимостью (наличие или отсутствие племенной документации), чем последовательной работой по её заполнению, что объясняет близость предков как второго, так и третьего рядов. Проведённый анализ, основанный на рангах частот пропущенных записей, позволяет сфокусироваться на структуре пропусков и выявить общие тенденции, независимо от абсолютного количества отсутствующих данных в разных группах животных. Дополнительное исследование конкретных рангов внутри кластеров может дать более детальную информацию о причинах возникновения пропусков.

Результаты ранжирования хозяйств по степени заполненности баз данных (табл. 2) подтверждают наличие значительной вариабельности между предприятиями в отношении качества генеалогической информации. Наиболее высокие ранги и, соответственно, наилучшее качество данных демонстрируют хозяйства 16, 18 и 14, в которых ведётся целенаправленная работа по корректировке и актуализации генеалогической информации.

Таблица 2. Ранжирование предприятий по качеству генеалогической информации
 Table 2. Ranking of enterprises by quality of genealogical information

Хозяйство/ Farm	Пропуски / Omissions									
	всего рядов предков/ Total rows of ancestors	абсолютное количество/ Absolute number			проценты / Percents			итого (без быков) / Total (without bulls)		ранг/ Rank
		быки /Bulls	коровы /Cows	тёлки/ Heifers	быки /Bulls	коровы /Cows	тёлки/ Heifers	абсолют/ Absolute number	проценты / Percents	
1	84938	5211	561	488	6,14	0,66	0,57	1049	3,46	11
2	123340	3997	666	232	3,25	0,54	0,19	898	1,32	9
3	97146	3997	666	2524	4,13	0,69	2,60	3190	1,80	12
4	178024	3539	530	55	1,99	0,30	0,03	585	1,66	4
5	102718	3650	148	12	3,55	0,14	0,01	160	0,79	6
6	212156	12224	839	922	5,76	0,40	0,43	1761	2,22	10
7	130760	3097	800	922	2,37	0,61	0,71	1722	1,66	7
8	116088	2572	848	317	2,22	0,73	0,27	1165	0,50	6
9	411208	29283	8151	1037	7,12	1,98	0,25	9188	1,11	13
10	450198	46037	3287	965	10,23	0,73	0,21	4252	0,47	14
11	773346	85016	8375	116	10,99	1,08	0,01	8491	0,55	16
12	642180	86987	5699	7431	13,55	0,89	1,16	13130	1,03	17
13	210952	35757	0	154	16,95	0,00	0,07	154	0,04	18
14	1545866	5699	0	5014	0,37	0,00	0,32	5014	0,16	3
15	105588	9043	366	3050	8,56	0,35	2,89	3416	1,62	15
16	540876	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	1
17	120190	0	2721	119	0,00	2,26	0,10	2840	1,18	5
18	173124	0	0	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	2
T	6018698	336109	32991	23364	5,58	0,55	0,39	56355	0,94	

T – Итого / Total

Дендрограмма, построенная с использованием метрики Чебышева и метода полной связи, иллюстрирует структуру сходства/различия 18 племенных хозяйств по проценту пропущенных генеалогических записей для быков, коров и телок (рис. 3).

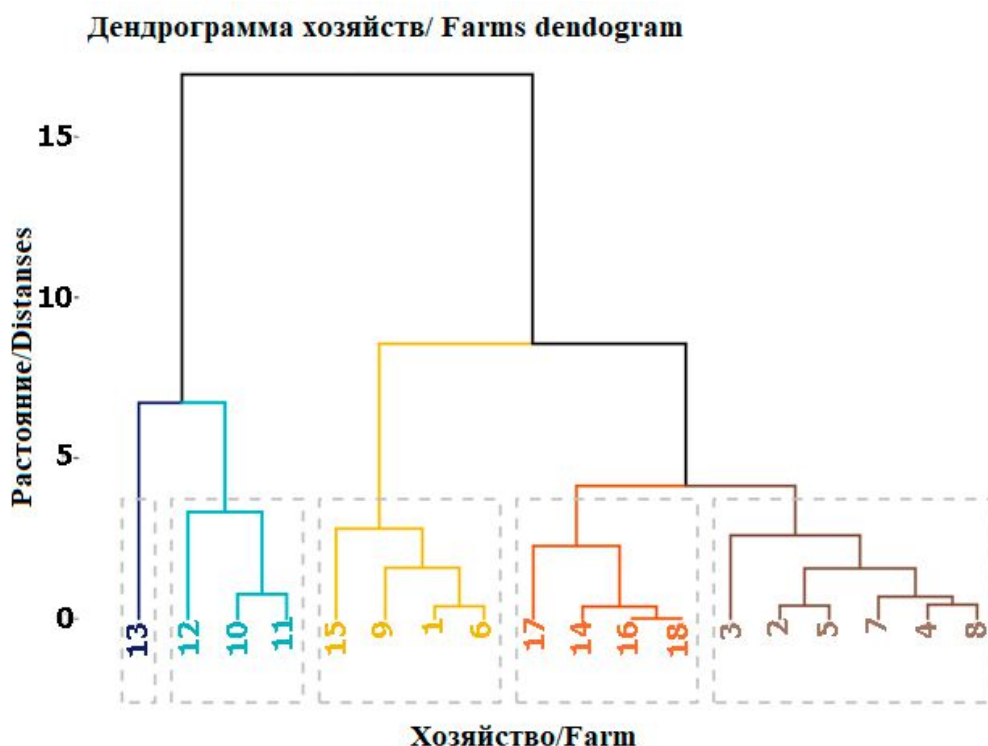


Рисунок 3. Дендрограмма сходства/различия хозяйств по качеству генеалогической информации (1-18, условные обозначения племенных хозяйств)
Figure 3. Dendrogram of similarity/difference of farms according to quality of genealogical information (1-18, designations of breeding farms)

Разбивка на 5 кластеров, выделенных на дендрограмме, позволяет детально проанализировать различия между хозяйствами по качеству генеалогической информации. Кластер 1 обособлен на самом высоком уровне иерархии и представлен исключительно хозяйством 13, характеризующимся экстремально высоким процентом пропусков генеалогических записей по быкам (почти 17 %), что значительно превышает показатели всех остальных хозяйств. Кластер 2 объединяет хозяйства 12, 10 и 11, отличающиеся высоким процентом пропущенных записей по быкам (более 10 % в хозяйствах 11 и 12). Дополнительно, в хозяйстве 12 отмечается повышенный процент пропусков по телкам (более 1 %), в то время как хозяйство 10 демонстрирует средние значения пропусков по коровам и телкам, не превышающие 1 %. Кластер 3 включает хозяйства 15, 9, 1 и 6, демонстрирующие более высокий, чем в среднем по выборке, процент пропущенных записей. Хозяйства 9 и 15 характеризуются повышенным процентом пропусков по коровам (около 2 % для хозяйства 9) и телкам (около 3 % для хозяйства 15) соответственно. В то же время хозяйства 1 и 6 имеют средние значения процента пропусков, находящиеся в интервале 3-6 % для быков и не более 0.7 % для коров и телок. Кластер 4 объединяет хозяйства 17, 14, 16 и 18, демонстрирующие высокое качество генеалогической информации. Хозяйства 16, 14 и 18 характеризуются минимальным количеством пропусков по всем группам животных, близким к нулю. Хозяйство 17, имея аналогичный показатель по быкам (около 0 %), демонстрирует наибольший процент пропусков по коровам внутри данного кластера (более 2 %). Кластер 5 включает хозяйства 3, 2, 5, 7, 4 и 8, демонстрирующие низкий процент пропущенных записей по всем трем группам животных, что указывает на достаточно высокое качество генеалогических данных (рис. 3). Процент пропущенных записей по быкам в этих хозяйствах, как правило, не превышает 5 %, за исключением хозяйства 3, для которого характерен несколько более высокий процент пропусков по телкам. В целом, проведенный кла-

стерный анализ позволяет выявить группы хозяйств со сходными характеристиками в отношении качества генеалогической информации и может служить основой для разработки рекомендаций по улучшению ведения генеалогического учета.

Обсуждение полученных результатов.

Проведённое исследование позволило оценить качество генеалогических и количественных данных племенных предприятий Новосибирской и Кемеровской областей для разработки региональной (ИАС) генетической оценки и селекции молочного скота. Анализ выявил существенную вариабельность качества генеалогической информации между хозяйствами. В среднем по региону доля отсутствующих записей о происхождении животных до третьего ряда родословной составляет около 7 %. Однако распределение пропущенных данных неоднородно: больше всего пропусков наблюдается в третьем ряду родословной по материнской линии, тогда как записи о происхождении по отцовской линии наиболее полные. Это может объясняться тем, что зоотехники-селекционеры традиционно уделяют больше внимания заполнению отцовских рядов предков, особенно при широком использовании искусственного осеменения (Castro-Vásquez R et al., 2023; Nader N et al., 2021; Cole JB et al., 2021). Высокая доля пропущенных записей, особенно по быкам-производителям (85,5 % от общего числа пропусков), представляет серьёзную проблему для создания качественных баз данных регионального и федерального масштабов, поскольку неполные родословные затрудняют оценку племенной ценности и ограничивают возможности эффективного подбора родительских пар.

Оценка качества количественных данных (удой и содержание жира за 305 дней лактации) показала, что распределение этих признаков во многих хозяйствах статистически значимо отличается от гауссовского. Наиболее частые отклонения связаны с асимметрией и двухвершинностью распределений (Камалдинов Е.В. и др., 2022). Причины такого отклонения могут быть различны: генетическая гетерогенность стада, различия в условиях кормления и содержания животных, особенности селекционной работы. Несоответствие распределения количественных признаков нормальному закону может снижать точность оценки племенной ценности, особенно при использовании смешанных линейных моделей.

Для улучшения качества генеалогических данных и повышения эффективности разработки и использования региональной ИАС рекомендуется восстанавливать и актуализировать генеалогическую информацию на племенных предприятиях, уделяя особое внимание заполнению данных о происхождении быков-производителей. Целесообразно также подключить дополнительные источники генеалогической информации, включая зарубежные базы данных, и внедрить инструменты ИАС для автоматизации поиска и исправления ошибок. Важным аспектом является разработка и внедрение системы мотивации племенных предприятий для поддержания высокого качества генеалогической информации (Brito LF et al., 2020; Georges M et al., 2019; Mrode R et al., 2019).

Для корректной оценки племенной ценности и эффективного подбора родительских пар при негауссовском распределении количественных признаков следует рассмотреть применение специальных статистических методов или трансформацию данных для приближения их к нормальному распределению. Перспективным направлением также является разработка и внедрение категориальных систем оценки племенной ценности, учитывающих различия в уровне продуктивности и условиях содержания животных на разных предприятиях.

В настоящее время активно развиваются методы ИИ для контроля качества данных, включая методы обнаружения выбросов (Aggarwal CC, 2015) и методы предсказания пропущенных значений (Little RJA, 1988). Эти методы могут быть перспективными для автоматизации процесса оценки качества генеалогических данных в животноводстве и повышения достоверности информации в ИАС. Однако практическое применение ИИ для этих целей в племенной работе пока ограничено и требует дальнейших исследований. В перспективе разработка и внедрение инструментов на основе ИИ, таких как системы автоматического обнаружения ошибок и аномалий в данных, могут

существенно повысить эффективность контроля качества генеалогических баз данных и обеспечить более высокую достоверность информации, используемой в селекционно-племенной работе.

Реализация этих рекомендаций будет способствовать повышению эффективности разработки и использования региональной ИАС, ускорению генетического прогресса в популяции молочного скота и повышению экономической эффективности молочного скотоводства в регионе.

Заключение.

Исследование, посвящённое оценке качества генеалогических данных молочного скота в племенных предприятиях Западной Сибири, выявило ряд важных закономерностей и проблем. Анализ генеалогических баз данных показал высокую вариабельность качества данных между хозяйствами. В среднем по региону доля отсутствующих записей о происхождении животных до третьего ряда родословной составляет около 7 %, однако в некоторых хозяйствах этот показатель значительно выше. Это может свидетельствовать о недостаточном внимании к ведению генеалогического учёта и необходимости разработки унифицированных стандартов племенной документации. Особую проблему представляет высокая доля пропусков по быкам-производителям (85,5 % от общего числа пропусков). Это затрудняет контроль уровня инбридинга и может привести к его нежелательному повышению, негативно влияющему на продуктивность, воспроизводительные качества и здоровье животных.

Неполнота генеалогической информации серьёзно препятствует созданию полноценной региональной ИАС и может привести к недостоверной оценке племенной ценности и неэффективному подбору родительских пар, замедляя генетический прогресс. Поэтому результаты исследования подчеркивают необходимость разработки и внедрения инструментов для автоматизации поиска и корректировки генеалогических данных, а также системы контроля качества вводимой информации. Создание региональной ИАС, основанной на достоверных и полных генеалогических данных, позволит повысить эффективность селекционно-племенной работы в молочном скотоводстве Западной Сибири и ускорить генетический прогресс в отрасли. В перспективе необходимо продолжить исследования, направленные на совершенствование методов оценки и контроля качества генеалогической информации, а также на разработку методик учёта неоднородности стад при оценке племенной ценности животных.

Список источников

1. Достоверность данных первичного зоотехнического учёта в молочном скотоводстве / Е.В. Камалдинов, А.Ф. Петров, К.С. Шатохин, К.Н. Нарожных, В.Г. Маренков, Т.А. Жигулин, О.В. Богданова, П.Н. Пальчиков, А.А. Плахова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 2(63). С. 76-83. [Kamaldinov EV, Petrov AF, Shatohin KS, Narozhnyh KN, Marenkov VG, Zhigulin TA, Bogdanova OV, Palchikov PN, Plakhova AA. Reliability of primary zootechnical records in dairy farming. Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2022;2(63):76-83. (In Russ.)]. doi: 10.31677/2072-6724-2022-63-2-76-83
2. Маринченко Т.Е. Повышение эффективности молочного скотоводства // Вестник всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 2(34). С. 193-203. [Marinchenko TE. Improving of the of dairy breedings efficiency. Journal of VNIIMZH. 2019;2(34):193-203. (In Russ.)].
3. Поддубный В.В., Шевелев О.Г., Бормашов Д.А. Сравнение качества подходов к кластеризации текстов на основе гипергеометрического критерия // Вестник Томского государственного университета. 2006. № 293. С. 120-125. [Poddubny VV, Shevelyov OG, Bormashov DA. Comparision of texts clusterization methods quality on the base of hypergeometrical criterion. Tomsk State University Journal. 2006;293:120-125. (In Russ.)].
4. Формирование единой цифровой платформы сельского хозяйства региона / Н.П. Васильев, Л.Д. Протопопова, Г.И. Даянова, А.Н. Крылова, Н.Н. Никитина //

Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 1(397). С. 53-56. [Vasil'ev NP, Protoporova LD, Dayanova GI, Krylova AN, Nikitina NN. Formation of a unified digital platform for the region's agriculture. *Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal*. 2024;1(397):53-56. (*In Russ.*)]. doi: 10.55186/25876740_2024_67_1_53

5. Шевелёва О.М., Свяженина М.А. Влияние быков на продуктивные качества потомства // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 40-56. [Sheveleva OM, Svyazhenina MA. The influence of bulls on the productive qualities of progeny. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):40-56. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-40

6. Aggarwal CC. Outlier analysis: advanced concepts. In: *Data Mining*. Springer, Cham; 2015:265-83. doi: 10.1007/978-3-319-14142-8_9

7. Aguilar I, Fernandez EN, Blasco A, Ravagnolo O, Legarra A. Effects of ignoring inbreeding in model-based accuracy for BLUP and SSGBLUP. *J Anim Breed Genet*. 2020;137(4):356-364. doi: 10.1111/jbg.12470

8. Bivand R. R packages for analyzing spatial data: a comparative case study with areal data. *Geographical Analysis*. 2022;54(3):488-518. doi: 10.1111/gean.12319

9. Brito LF, Oliveira HR, McConn BR, Schinckel AP, Arrazola A, Marchant-Forde JN, et al. Large-scale phenotyping of livestock welfare in commercial production systems: a new frontier in animal breeding. *Front Genet*. 2020;11:793. doi: 10.3389/fgene.2020.00793

10. Cañas-Álvarez JJ, Ossa-Saraz GA, Garcés-Blanquiceth JL, Burgos-Paz WO. Genealogical structure of the Colombian Romosinuano Creole cattle. *Trop Anim Health Prod*. 2023;55(5):292. doi: 10.1007/s11250-023-03694-1

11. Castro-Vásquez R, Vásquez-Loaiza M, Cruz-Méndez A, Domínguez-Viveros J, Camacho-Sandoval J, Saborío-Montero A. Genealogical information analysis of Gyr and Nelore cattle from Costa Rica. *Cienc Rural*. 2023;53(10):e20220236. doi: 10.1590/0103-8478cr20220236

12. Cavani L, Silva RM de O, Carreño LOD, Ono RK, Bertipaglia TS, Farah MM, et al. Genetic diversity of Brazilian Brahman cattle by pedigree analysis. *Pesq Agropec Bras*. 2018;53(1):74-79. doi: 10.1590/s0100-204x2018000100008

13. CDN. Canadian Network for Dairy Excellence. [Internet] Available from: <https://www.cdn.ca/home.php> (accessed 2024 November 27).

14. Chen TY. New Chebyshev distance measures for Pythagorean fuzzy sets with applications to multiple criteria decision analysis using an extended ELECTRE approach. *Expert Systems with Applications*. 2019;147(2):113164. doi: 10.1016/j.eswa.2019.113164

15. Cole JB, Dürr JW, Nicolazzi EL. Invited review: The future of selection decisions and breeding programs: What are we breeding for, and who decides? *Journal of Dairy Science*. 2021;104(5):5111-24. doi: 10.3168/jds.2020-19777

16. Cole JB, Eaglen SAE, Maltecca C, Mulder HA, Pryce JE. The future of phenomics in dairy cattle breeding. *Animal Frontiers*. 2020;10(2):37-44. doi: 10.1093/af/vfaa007

17. Fioretti M, Negrini R, Biffani S, Quaglia A, Valentini A, Nardone A. Demographic structure and population dynamics of Maremmana cattle local breed after 35 years of traditional selection. *Livestock Science*. 2020;232:103903. doi: 10.1016/j.livsci.2019.103903

18. Gaikadi S, Kumar SV. Is ward-level calculation of urban green space availability important?—A case study on Vellore city, India, using the histogram-based spectral discrimination approach. *Front Sustain Cities*. 2024;6:1393156. doi: 10.3389/frsc.2024.1393156

19. Georges M, Charlier C, Hayes B. Harnessing genomic information for livestock improvement. *Nat Rev Genet*. 2019;20(3):135-156. doi: 10.1038/s41576-018-0082-2

20. Giorgi FM, Ceraolo C, Mercatelli D. The R language: an engine for bioinformatics and data science. *Life (Basel)*. 2022;12(5):648. doi: 10.3390/life12050648

21. Interbull. International Bull Evaluation Service Official Website. [Internet] Available from: <https://interbull.org/index> (accessed 2024 November 27).

22. Irnawati I, Riswanto FDO, Riyanto S, Martono S, et al. The use of software packages of R factoextra and FactoMineR and their application in principal component analysis for authentication of oils. *Indonesian Journal of Chemometrics and Pharmaceutical Analysis*. 2021;1(1):1-10. doi: 10.22146/ijcpa.482
23. Little RJA. A test of missing completely at random for multivariate data with missing values. *Journal of the American Statistical Association*. 1988;83(404):1198-202.
24. Martin P, Baes C, Houlahan K, Richardson CM, Jamrozik J, Miglior F. Genetic correlations among selected traits in Canadian Holsteins. *Can J Anim Sci*. 2019; 99(4):693-704. doi: 10.1139/CJAS-2018-0190
25. Mrode R, Ojango JMK, Okeyo AM, Mwacharo JM. Genomic selection and use of molecular tools in breeding programs for indigenous and crossbred cattle in developing countries: current status and future prospects. *Front Genet*. 2019;9:694. doi:10.3389/fgene.2018.00694
26. Nader N, El-Gamal FEZ, El-Sappagh S, Kwak KS, Elmogy M. Kinship verification and recognition based on handcrafted and deep learning feature-based techniques. *PeerJ Computer Science*. 2021;7:e735. doi: 10.7717/peerj-cs.735
27. Nilforooshan MA, Saavedra-Jiménez LA. ggroups: an R package for pedigree and genetic groups data. *Hereditas*. 2020;157(1):17. doi: 10.1186/s41065-020-00124-2
28. Nyman S, Johansson AM, Palucci V, Schönherz AA, Guldbrandtsen B, Hinrichs D, et al. Inbreeding and pedigree analysis of the European red dairy cattle. *Genet Sel Evol*. 2022;54(1):70. doi: 10.1186/s12711-022-00761-3
29. Schaeffer L. Strategy for applying genome-wide selection in dairy cattle. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2006;123(4):218-23. doi: 10.1111/j.1439-0388.2006.00595.x
30. Select Star SA. [Internet] Available from: <https://www.selectstar.ch/de/index.htm>. (accessed: 2024 November 27).
31. Silva MHMA da, Malhado CHM, Kern EL, Daltro D dos S, Cobuci JA, Carneiro PLS. Inbreeding depression in Holstein cattle in Brazil. *R Bras Zootec*. 2019;48:e20170212. doi: 10.1590/rbz4820170212
32. Suwanda R, Syahputra Z, Zamzami EM. Analysis of euclidean distance and manhattan distance in the k-means algorithm for variations number of Centroid K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1566(1):012058. doi: 10.1088/1742-6596/1566/1/012058
33. Toghiani S, VanRaden PM. National Index Correlations and Actual vs. Expected Use of Foreign Sires. *Interbull Bulletin*. Leeuwarden, The Netherlands, 2021, April 26-30. 2021;56:52-9.
34. Wickham H, Grolemund G. *R for Data Science*. Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA: O'Reilly; 2017: 520 p.
35. Wiggans GR, Carrillo JA. Genomic selection in United States dairy cattle. *Front Genet*. 2022;9(13):994466.
36. Wiggans GR, Vanraden PM, Cooper TA. The genomic evaluation system in the United States: past, present, future. *J Dairy Sci*. 2011;94(6):3202-11. doi: 10.3168/jds.2010-3866

References

1. Kamaldinov EV, Petrov AF, Shatohin KS, Narozhnyh KN, Marenkov VG, Zhigulin TA, Bogdanova OV, Palchikov PN, Plakhova AA. Reliability of primary zootechnical records in dairy farming. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2022;2(63):76-83. doi: 10.31677/2072-6724-2022-63-2-76-83
2. Marinchenko TE. Improving of the of dairy breedings efficiency. *Journal of VNIIMZH*. 2019; 2(34):193-203.
3. Poddubny VV, Shevelyov OG, Bormashov DA. Comparision of texts clusterization methods quality on the base of hypergeometrical criterion. *Tomsk State University Journal*. 2006;293:120-125.

4. Vasilev NP, Protopopova LD, Dayanova GI, Krylova AN, Nikitina NN. Formation of a unified digital platform for the region's agriculture. *International agricultural Journal*. 2024;1(397):53-56. doi: 10.55186/25876740_2024_67_1_53
5. Sheveleva OM, Svyazhenina MA. The influence of bulls on the productive qualities of progeny. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):40-56. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-40
6. Aggarwal CC. Outlier analysis: advanced concepts. In: *Data Mining*. Springer, Cham; 2015:265-83. doi: 10.1007/978-3-319-14142-8_9
7. Aguilar I, Fernandez EN, Blasco A, Ravagnolo O, Legarra A. Effects of ignoring inbreeding in model-based accuracy for BLUP and SSGBLUP. *J Anim Breed Genet*. 2020;137(4):356-364. doi: 10.1111/jbg.12470
8. Bivand R. R packages for analyzing spatial data: a comparative case study with areal data. *Geographical Analysis*. 2022;54(3):488-518. doi: 10.1111/gean.12319
9. Brito LF, Oliveira HR, McConn BR, Schinckel AP, Arrazola A, Marchant-Forde JN, et al. Large-scale phenotyping of livestock welfare in commercial production systems: a new frontier in animal breeding. *Front Genet*. 2020;11:793. doi: 10.3389/fgene.2020.00793
10. Cañas-Álvarez JJ, Ossa-Saraz GA, Garcés-Blanquiceth JL, Burgos-Paz WO. Genealogical structure of the Colombian Romosinuano Creole cattle. *Trop Anim Health Prod*. 2023;55(5):292. doi: 10.1007/s11250-023-03694-1
11. Castro-Vásquez R, Vásquez-Loaiza M, Cruz-Méndez A, Domínguez-Viveros J, Camacho-Sandoval J, Saborio-Montero A. Genealogical information analysis of Gyr and Nelore cattle from Costa Rica. *Cienc Rural*. 2023;53(10):e20220236. doi: 10.1590/0103-8478cr20220236
12. Cavani L, Silva RM de O, Carreño LOD, Ono RK, Bertipaglia TS, Farah MM, et al. Genetic diversity of Brazilian Brahman cattle by pedigree analysis. *Pesq Agropec Bras*. 2018;53(1):74-79. doi: 10.1590/s0100-204x2018000100008
13. CDN. Canadian Network for Dairy Excellence. [Internet] Available from: <https://www.cdn.ca/home.php> (accessed 2024 November 27).
14. Chen TY. New Chebyshev distance measures for Pythagorean fuzzy sets with applications to multiple criteria decision analysis using an extended ELECTRE approach. *Expert Systems with Applications*. 2019;147(2):113164. doi: 10.1016/j.eswa.2019.113164
15. Cole JB, Dürr JW, Nicolazzi EL. Invited review: The future of selection decisions and breeding programs: What are we breeding for, and who decides? *Journal of Dairy Science*. 2021;104(5):5111-24. doi: 10.3168/jds.2020-19777
16. Cole JB, Eaglen SAE, Maltecca C, Mulder HA, Pryce JE. The future of phenomics in dairy cattle breeding. *Animal Frontiers*. 2020;10(2):37-44. doi: 10.1093/af/vfaa007
17. Fioretti M, Negrini R, Biffani S, Quaglia A, Valentini A, Nardone A. Demographic structure and population dynamics of Maremmana cattle local breed after 35 years of traditional selection. *Livestock Science*. 2020;232:103903. doi: 10.1016/j.livsci.2019.103903
18. Gaikadi S, Kumar SV. Is ward-level calculation of urban green space availability important?—A case study on Vellore city, India, using the histogram-based spectral discrimination approach. *Front Sustain Cities*. 2024;6:1393156. doi: 10.3389/frsc.2024.1393156
19. Georges M, Charlier C, Hayes B. Harnessing genomic information for livestock improvement. *Nat Rev Genet*. 2019;20(3):135-156. doi: 10.1038/s41576-018-0082-2
20. Giorgi FM, Ceraolo C, Mercatelli D. The R language: an engine for bioinformatics and data science. *Life (Basel)*. 2022;12(5):648. doi: 10.3390/life12050648
21. Interbull. International Bull Evaluation Service Official Website. [Internet] Available from: <https://interbull.org/index> (accessed 2024 November 27).
22. Irnawati I, Riswanto FDO, Riyanto S, Martono S, et al. The use of software packages of R factoextra and FactoMineR and their application in principal component analysis for authentication of oils. *Indonesian Journal of Chemometrics and Pharmaceutical Analysis*. 2021;1(1):1-10. doi: 10.22146/ijcpa.482

23. Little RJA. A test of missing completely at random for multivariate data with missing values. *Journal of the American Statistical Association*. 1988;83(404):1198-202.
24. Martin P, Baes C, Houlihan K, Richardson CM, Jamrozik J, Miglior F. Genetic correlations among selected traits in Canadian Holsteins. *Can J Anim Sci*. 2019; 99(4):693-704. doi: 10.1139/CJAS-2018-0190
25. Mrode R, Ojango JMK, Okeyo AM, Mwacharo JM. Genomic selection and use of molecular tools in breeding programs for indigenous and crossbred cattle in developing countries: current status and future prospects. *Front Genet*. 2019;9:694. doi:10.3389/fgene.2018.00694
26. Nader N, El-Gamal FEZ, El-Sappagh S, Kwak KS, Elmogy M. Kinship verification and recognition based on handcrafted and deep learning feature-based techniques. *PeerJ Computer Science*. 2021;7:e735. doi: 10.7717/peerj-cs.735
27. Nilforooshan MA, Saavedra-Jiménez LA. gggroups: an R package for pedigree and genetic groups data. *Hereditas*. 2020;157(1):17. doi: 10.1186/s41065-020-00124-2
28. Nyman S, Johansson AM, Palucci V, Schönherz AA, Guldbrandtsen B, Hinrichs D, et al. Inbreeding and pedigree analysis of the European red dairy cattle. *Genet Sel Evol*. 2022;54(1):70. doi: 10.1186/s12711-022-00761-3
29. Schaeffer L. Strategy for applying genome-wide selection in dairy cattle. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2006;123(4):218-23. doi: 10.1111/j.1439-0388.2006.00595.x
30. Select Star SA. [Internet] Available from: <https://www.selectstar.ch/de/index.htm>. (accessed: 2024 November 27).
31. Silva MHMA da, Malhado CHM, Kern EL, Daltro D dos S, Cobuci JA, Carneiro PLS. Inbreeding depression in Holstein cattle in Brazil. *R Bras Zootec*. 2019;48:e20170212. doi: 10.1590/rbz4820170212
32. Suwanda R, Syahputra Z, Zamzami EM. Analysis of euclidean distance and manhattan distance in the k-means algorithm for variations number of Centroid K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1566(1):012058. doi: 10.1088/1742-6596/1566/1/012058
33. Toghiani S, VanRaden PM. National Index Correlations and Actual vs. Expected Use of Foreign Sires. *Interbull Bulletin*. Leeuwarden, The Netherlands, 2021, April 26-30. 2021;56:52-9.
34. Wickham H, Grolemund G. *R for Data Science*. Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA: O'Reilly; 2017: 520 p.
35. Wiggans GR, Carrillo JA. Genomic selection in United States dairy cattle. *Front Genet*. 2022;9(13):994466.
36. Wiggans GR, Vanraden PM, Cooper TA. The genomic evaluation system in the United States: past, present, future. *J Dairy Sci*. 2011;94(6):3202-11. doi: 10.3168/jds.2010-3866

Информация об авторах:

Евгений Варисович Камалдинов, доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной биоинформатики, Новосибирский государственный аграрный университет, 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160.

Алексей Фёдорович Петров, заведующий лабораторией прикладной биоинформатики, Новосибирский государственный аграрный университет, 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160.

Кирилл Николаевич Нарожных, кандидат биологических наук, доцент кафедры прикладной биоинформатики, Новосибирский государственный аграрный университет, 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160.

Павел Николаевич Пальчиков, директор, АО «Новосибирскагроплем», 630522, НСО, Новосибирский район, МО Ярковский сельсовет по Ордынской трассе на территории р-на за 1,5 км до с. Ярково.

Information about the authors:

Evgeny V Kamaldinov, Dr Sci. (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Applied Bioinformatics, Novosibirsk State Agrarian University, 160 Dobrolyubova str., 630039, Novosibirsk.

Alexey F Petrov, Head of the Laboratory of Applied Bioinformatics, Novosibirsk State Agrarian University, 160 Dobrolyubova str., 630039, Novosibirsk.

Kirill N Narozhnykh, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Applied Bioinformatics, Novosibirsk State Agrarian University, 160 Dobrolyubova str., 630039, Novosibirsk.

Pavel N Palchikov, Director, JSC "Novosibirsk Agropem", 630522, NSO, Novosibirsk district, MO Yarkovsky village Council along the Ordynsky highway in the territory of the district 1.5 km from the village of Yarkovo.

Статья поступила в редакцию 18.10.2024; одобрена после рецензирования 05.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 18.10.2024; approved after reviewing 05.12.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 68-82.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 68-82.

Научная статья
УДК 636.225.1:618.19-002
doi:10.33284/2658-3135-107-4-68

Идентификация и анализ значимых локусов генома, ассоциированных с устойчивостью к маститу у айрширских коров методом GWAS

**Марина Владимировна Позовникова¹, Ольга Васильевна Тулинова²,
Ольга Константиновна Васильева³, Юрий Сергеевич Щербаков⁴**

^{1,2,3,4}Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», Санкт-Петербург, Тярлево, Россия

¹pozovnikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8658-2026>

²tulinova_59@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5704-4420>

³vaciola@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8361-8399>

⁴yura.10.08.94.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6434-6287>

Аннотация. Одним из методов профилактики распространения субклинического мастита в стадах является селекция животных с природной резистентностью к этому заболеванию. Данный подход основан на генетической предрасположенности, которая определяет индивидуальную устойчивость коров к различным формам мастита. Целью исследования была идентификация и анализ геномных регионов и SNP, предположительно связанных с количеством соматических клеток с учётом их дифференциации, в российской популяции коров айрширской породы. В исследование было включено 5828 проб молока и ДНК 600 коров айрширской породы из шести хозяйств Ленинградской и Московской областей. В среднем значение количества соматических клеток (КСК) равно $184,1 \pm 12,1$ тыс. ед./мл с колебаниями от $107,6 \pm 6,4$ тыс. ед./мл до $272,5 \pm 49,4$ тыс. ед./мл. Аналогичная картина наблюдалась и в отношении показателя дифференциального количества соматических клеток (ДКСК) со средним значением $31,8 \pm 0,7$ %, минимальным – $25,9 \pm 0,8$ % и максимальным – $47,9 \pm 4,2$ %. Рассчитаны коэффициенты наследуемости: для КСК – 0,207, для ДКСК – 0,085. Выявлено существенное влияние на уровень КСК и ДКСК в молоке коров факторов «Хозяйство», «Отец» и «Период лактации» ($p < 0,001$). В ходе исследования с использованием ДНК-чипа Illumina BovineSNP50 BeadChip были получены SNP-профили животных идентифицированы функциональные гены-кандидаты. Анализ GWAS выявил три SNP на BTA12 (*MYO16*, rs42775315), BTA17 (*NELL1*, rs43178042) и BTA29 (близлежащая область гена *SCLT*, rs43178042), достоверно ассоциированных с количеством соматических клеток в молоке коров ($p < 0,00001$). Отличались меньшими значениями КСК животные с гомозиготными генотипами по rs42775315 GG (90,3 %, $163,1 \pm 9,8$ тыс. ед./мл), по rs109897445 GG (44,17 %, $137,5 \pm 11,6$ тыс. ед./мл) и по rs43178042 CC (85,0 %, $162,6 \pm 9,5$ тыс. ед./мл). Полученные результаты представляют важную информацию о генетических механизмах, определяющих предрасположенность к маститу у коров айрширской породы.

Ключевые слова: коровы, айрширская порода, молоко, соматические клетки молока, SNP, ген-кандидат, ДНК-чип

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2024 г. ВНИИГРЖ (№ FGGN-2024-0021).

Для цитирования: Идентификация и анализ значимых локусов генома, ассоциированных с устойчивостью к маститу у айрширских коров методом GWAS / М.В. Позовникова, О.В. Тулинова, О.К. Васильева, Ю.С. Щербаков // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 68-82. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-68>

Original article

Identification and GWAS analysis of significant genomic loci associated with mastitis resistance in Ayrshire cows

Marina V Pozovnikova¹, Olga V Tulinova², Olga K Vasileva³, Yuriy S Shcherbakov⁴

^{1,2,3,4} Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Tyarlevo, Russia

¹pozovnikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8658-2026>

²tulinova_59@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5704-4420>

³vaciola@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8361-8399>

⁴yura.10.08.94.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6434-6287>

Abstract. One of the methods for preventing the spread of subclinical mastitis in herds is the selection of animals with natural resistance to this disease. This approach is based on genetic predisposition, which determines the individual resistance of cows to various forms of mastitis. The aim of the study was to identify and analyze genomic regions and SNPs presumably associated with the somatic cell count, taking into account their differentiation in the Russian population of Ayrshire cows. The study included 5828 milk and DNA samples from 600 Ayrshire cows from six farms in the Leningrad and Moscow regions. On average, the SCC value was 184.1 ± 12.1 thousand units/ml with fluctuations from 107.6 ± 6.4 thousand units/ml to 272.5 ± 49.4 thousand units/ml. A similar picture was observed in relation to the DSCC indicator with an average value of $31.8 \pm 0.7\%$, a minimum of $25.9 \pm 0.8\%$ and a maximum of $47.9 \pm 4.2\%$. The heritability coefficients were calculated for the SCC – 0.207, for the DSCC – 0.085. A significant influence of the factors “Farm”, “Father” and “Lactation period” ($p < 0.001$) on the level of SCC and DSCC in cows’ milk was revealed. In the course of the study, using the Illumina BovineSNP50 BeadChip DNA chip, SNP profiles of animals were obtained and functional candidate genes were identified. GWAS analysis revealed three SNPs in BTA12 (MYO16, rs42775315), BTA17 (NEL1, rs43178042) and BTA29 (the closest region of the SCLT gene, rs43178042) significantly associated with the number of somatic cells in cows’ milk ($p < 0.00001$). Animals with homozygous genotypes for rs42775315 GG (90.3%, 163.1 ± 9.8 thousand units/ml), rs109897445 GG (44.17%, 137.5 ± 11.6 thousand units/ml) and rs43178042 CC (85.0%, 162.6 ± 9.5 thousand units/ml) had lower SCC values. The results obtained provide important information on the genetic mechanisms that determine the predisposition to mastitis in Ayrshire cows.

Keywords: cows, Ayrshire breed, milk, somatic cells, SNP, candidate gene, DNA-chip

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2024 FSBRI Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst (No. FGGN-2024-0021).

For citation: Pozovnikova MV, Tulinova OV, Vasileva OK, Shcherbakov YuS. Identification and GWAS analysis of significant genomic loci associated with mastitis resistance in Ayrshire cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):68-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-68>

Введение.

В молочных стадах для получения достаточных объемов молока высокого качества необходим контроль здоровья вымени, так как нарушение его секреторной функции может возникать вследствие развития воспалительных заболеваний вымени – маститов. Субклинический мастит характеризуется воспалительным процессом в молочной железе, который не проявляется явными клиническими симптомами, что затрудняет его диагностику, поэтому именно раннее выявление и профилактика данного заболевания не перестают быть актуальными. Причиной субклинического мастита могут быть как инфекционные составляющие (Kaczorowski Ł et al., 2022; Artemieva O et al., 2021), так и тепловой стресс (Rakib MRH, 2020) или нарушения рациона, такие как, например, высокое содержание белка (Исакова М.Н., 2021) и недостаток селена (Zhang Y et al., 2022; Сычева И.Н. и др., 2022). Методы диагностики и профилактики субклинического мастита включают регулярный мониторинг качества молока путём исследований количества соматических клеток (КСК). В норме

соматические клетки всегда присутствуют в молоке, а их уровень у здоровых коров варьирует на протяжении лактации и может быть выше у высокопродуктивных коров (Найманов Д.К. и др., 2019). Современные доступные методы проточной цитометрии, дополненные инфракрасной спектроскопией, предоставляют возможность проведения не только количественной оценки общего числа клеток, но и их дифференциации по типу. Данный подход позволяет определить процентное соотношение лимфоцитов и полиморфноядерных нейтрофилов в составе соматических клеток (ДКСК – дифференциальное количество соматических клеток). Одновременный учёт КСК и ДКСК позволяет не только выявлять животных с субклинической формой мастита, но также мониторить стадо по наличию хронических (персистирующих) форм заболевания и выявлять особей, находящихся в группе риска развития мастита (Schwarz D et al., 2020; Сермягин А.А. и др., 2021).

Одним из направлений работы по минимизации распространённости мастита в стадах является селекционная работа, направленная на отбор животных, обладающих природной резистентностью к данному заболеванию. В основе этого подхода лежит генетическая составляющая, которая определяет индивидуальную устойчивость коров к развитию различных форм мастита. Несмотря на полигенную природу мастита коров, актуальным является поиск различных регионов генома, ассоциированных с низким содержанием КСК в молоке коров, методом GWAS. Систематический обзор научных статей (Narayana SG et al., 2023) объединил имеющиеся опубликованные данные GWAS для признаков здоровья вымени. Установлено, что для 3 основных молочных пород (голландской, джерсейской и айрширской) было выявлено 5843, 2311 и 1915 генов соответственно, среди которых общими были 74 гена. Количество генов, связанных с признаками клинического мастита, составило 54, а 24 из них были ассоциированы как с КСК, так и с клиническими признаками мастита (Narayana SG et al., 2023). Мета-анализ данных GWAS по 6-ти породам скота (голландская, джерсейская, брауншвейгская, норвежский красный скот, монбельярд, нормандский скот) определил 58 генов-кандидатов, которые были связаны с заболеваемостью маститом, включая 16 QTL, которые не перекрывались с ранее идентифицированными локусами. Анализ обогащения геномных признаков определил 31 ген-кандидат и 14 казуальных генов, ассоциированных с маститом коров (Cai Z et al., 2024).

Таким образом, анализ полногеномных исследований для выявления в геноме локусов, ассоциированных с КСК и ДКСК, является актуальным и перспективным направлением. Определение функциональных генетических вариантов позволит разработать эффективную стратегию селекции на резистентность к данному заболеванию.

Цель исследования.

Идентификация и анализ геномных регионов и SNP, предположительно связанных с количеством соматических клеток с учётом их дифференциации, в российской популяции коров айрширской породы.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Пробы молока и ДНК коров айрширской породы.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Протоколом Комиссии по этике экспериментов на животных Федерального научного центра животноводства им. Л.К. Эрнста (№ 2020/2) и Законом Российской Федерации о ветеринарной медицине (№ 4979-1 от 14 мая 1993 г.). При проведении исследований были приняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Исследования проводили в 2021-2022 гг. в 6-ти хозяйствах по разведению айрширской породы молочного скота: № 1 (n=98), № 2 (n=60), № 3 (n=178), № 4 (n=159), № 5 (n=76) (Ленинградская область) и № 6 (n=29) (Московская область). В исследование привлечены коровы-сверстницы первого отёла, родившиеся в 2018-2019 гг. Пробы молока для лабораторных исследований собирали 1 раз в месяц (всего 5828 проб). Однократно у всех животных были взяты образцы венозной крови для получения препаратов ДНК. На протяжении исследования животные получали сбалансированный монокорм в соответствии с их физиологическим статусом в системе кормления конкретного хозяйства.

Оборудование и технические средства. Подсчёт КСК (тыс. ед./мл) и ДКСК (%) в пробах сырого молока проводили на базе ЦКП ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста с использованием инфракрасного анализатора CombiFoss 7 DC («FOSS», Дания). Взятие проб крови осуществляли из хвостовой вены в вакуумные пробирки K3EDTA (ООО «Астрamed», Китай). Для генотипирования использовался ДНК-чип Illumina BovineSNP50 BeadChip (50K) (Illumina Inc., США) с плотностью покрытия 54 609 SNP.

Статистическая обработка. На основании результатов контроля качества геномных прочтений для дальнейшего анализа были отобраны образцы с качеством не менее 95%. Редактирование данных ДНК-чипа для создания адаптивных файлов расширения (.ped, .map, .fam, .bed, .bim) выполнялось с использованием программного обеспечения PLINK 1.9 с частотой минорного аллеля (MAF)>0,05. После контроля качества для дальнейшего анализа были сохранены 39856 SNP. Полученные фенотипические данные по КСК и ДКСК были использованы для анализа GWAS. Анализ ассоциаций генотипов с признаками по всему геному был выполнен с использованием статистического программного обеспечения EMMAX, где была сгенерирована матрица родства. В статистической модели учитывались хозяйство, год и месяц рождения как фиксированные эффекты. Влияние SNP на признак рассчитывалось в соответствии со следующей моделью:

$$y = X\beta + Zu + \epsilon,$$

где: y – вектор $n \times 1$ наблюдаемых фенотипов, n – количество собранных фенотипов,

X – матрица $n \times f$ фиксированных эффектов (f), β – вектор $f \times 1$, содержащий фиксированные коэффициенты эффектов,

Z – матрица $n \times t$, связывающая случайные эффекты (t) с фенотипом, u – случайный эффект смешанной модели (Kiser JN and Neibergs HL, 2021).

Поправка Бонферрони была применена для установления уровней значимости для эффекта SNP. Значимые и предполагаемые уровни были установлены как $1.254516e-06$ ($0,05/39815$) и $2.509033e-05$ ($1,00/39815$) соответственно. Манхэттенские и квантильно-квантильные (Q-Q) графики были созданы с использованием пакетов qqman и ggplot2 в среде программирования R.

Перекрывающиеся гены или гены, близкие к геномной области идентифицированных SNP (расположенные в пределах 0,5 Мб от SNP), были аннотированы на основе сборки генома коровы (Bos Taurus; BTA) ARS-UCD1.3. Информация о SNP для соответствующих генов была получена с помощью геномного браузера Ensembl (Genome assembly: UMD3.1 (GCA_000003055.3)).

Статистическую обработку фенотипических данных проводили в программе «Statistica.10» («Statsoft, Inc./TIBCO», США). Применяли многофакторный дисперсионный анализ ANOVA для проверки основных эффектов влияния на состав молока факторов «хозяйство», «отец», «сезон года» и «месяц лактации». Парное сравнение значений проводили с использованием критерия Тьюки. Различия считали статистически значимыми при $P \leq 0,05$.

Коэффициент наследуемости вычисляли с применением дисперсионного анализа по уравнению:

$$h^2 = \frac{VarA}{VarA + VarPE + VarE},$$

где: $VarA$ – аддитивная генетическая дисперсия,

$VarPE$ – дисперсия постоянно действующих факторов среды,

$VarE$ – остаточная дисперсия ошибки.

Подготовка информации по фенотипам животных, исключение недостоверных данных, пропущенных значений, оценка описательных и частотных статистик проведена в программах «Microsoft Office Excel» («Microsoft», США) и «RStudio». Дисперсии и ковариации оценивали методом ограниченного максимального правдоподобия (Restricted Maximum Likelihood Estimation, REML) на основе множественных итераций с использованием модуля RENUMF90 (Misztal I et al., 2002).

Результаты исследования.

Анализ содержания соматических клеток в пробах молока коров показал, что в среднем по всем анализируемым группам средние значение КСК не превышало 200 тыс. ед./мл. Однако высокий доверительный интервал свидетельствует о большой вариабельности признака в стадах. Среди анализируемых стад коровы в хозяйстве № 3 имели самые низкие средние значения КСК (107,6 тыс. ед./мл, Std.Dev=85,2), а максимальные были зафиксированы для хозяйства № 6 (272,5 тыс. ед./мл, Std.Dev=266,1). Повышенное содержание КСК может свидетельствовать о некоторых проблемах со здоровьем вымени животных в стаде (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения КСК и ДКСК в молоке коров айрширской породы в анализируемых хозяйствах
Table 1. Average values of SCC and DSCC in milk of Ayrshire cows in the analyzed farms

№ хозяйства / No of farm	n	Показатель / Indicator					
		КСК, тыс. ед./мл / SCC, thousand units/ml			ДКСК / DSCC, %		
		Mean	Std.Dev.	Std.Err	Mean	Std.Dev.	Std.Err
1	98	237,0	395,6	40,0	36,0	26,3	2,7
2	60	152,5	253,9	32,8	31,5	23,7	3,1
3	178	107,6	85,2	6,4	25,9	10,6	0,8
4	159	207,3	390,1	30,9	30,6	12,9	1,0
5	76	236,9	245,7	28,2	36,9	16,3	1,9
6	29	272,5	266,1	49,4	47,9	22,4	4,2
В среднем/Average	600	184,1	296,9	12,1	31,8	18,2	0,7

Аналогичная картина наблюдалась и в отношении показателя ДКСК. Так, минимальные средние значения были получены в хозяйстве № 3 (25,9 %, Std.Dev=10,6), а максимальные – в хозяйстве № 6 (47,9 %, Std.Dev=22,4). Полученные нами данные могут свидетельствовать как о разной степени восприимчивости коров к заболеванию маститом, так и разном уровне менеджмента в стадах.

Корреляционный анализ выявил однонаправленную взаимосвязь КСК-ДКСК ($r=0,700$ при $P \leq 0,05$). Коэффициент наследуемости для КСК составил 0,207, а для ДКСК – 0,085 при $P \leq 0,001$.

Анализ влияния факторов (табл. 2) показал, что изменение значений КСК с учётом ДКСК значимо не изменяется в зависимости от сезона года.

Таблица 2. Влияние факторов на фенотипическую изменчивость КСК и ДКСК в молоке коров айрширской породы
Table 2. Influence of factors on the phenotypic variability of the SCC and DSCC in milk of Ayrshire cows

Показатель / Indicator	Фактор / Factor							
	хозяйство / Farm		отец / Father		сезон года / Season of year		период лактации / Lactation period	
	R ²	p-value	R ²	p-value	R ²	p-value	R ²	p-value
КСК, тыс. ед./мл / SCC, thousand units/ml	0,010	0,000	0,029	0,000	0,000	0,878	0,002	0,005
ДКСК, % / DSCC, %	0,032	0,000	0,050	0,000	0,001	0,094	0,002	0,004

Это, вероятно, обусловлено тем, что коровы находятся на круглогодичном монокормлении, что, в свою очередь, в определённой степени нивелирует сезонные колебания в составе молока.

Однако остальные факторы («Хозяйство», «Отец» и «Период лактации») оказывали существенное влияние на уровень КСК и ДКСК в молоке коров ($P \leq 0,001$).

Для поиска ассоциаций было использовано 39856 SNP из панели массива Illumina BovineSNP50 BeadChip. В общей сложности анализ GWAS выявил 20 SNP, из которых 3 SNP (табл. 3) достигли порога значимости (1.254516×10^{-6}) и были связаны с признаком «КСК», а 17 SNP при суггестивном уровне значимости (2.509033×10^{-5}) были ассоциированы, как с признаком «КСК», так и с признаком «ДКСК» (рис. 1а и 2а). Анализ не выявил ни одного одиночного нуклеотидного полиморфизма, ассоциированного более чем с одним изучаемым признаком. Уровень достоверности оценок ассоциаций по признакам «КСК» и «ДКСК» приближался к нормальному и демонстрировал незначительное отклонение от теоретически ожидаемого (рис. 1б и 2б).

Идентифицированные в нашем исследовании SNP с высоким порогом значимости локализовались в области генов *MYO16* (BTA 12, rs42775315) и *NELL1* (BTA29, rs43178042) и в межгеномном пространстве вблизи гена *SCLT1* (BTA 17, rs109897445).

Таблица 3. Достоверно значимые SNP, ассоциированные с КСК в молоке коров айрширской породы

Table 3. Significant SNPs associated with SCC in milk of Ayrshire cows

SNP	Хромосома / <i>Chromosome</i>	Позиция, п. н. / <i>Position, b.p.</i>	P-value	Ген/локализация / <i>Gene/localization</i>
rs42775315	12	88018471	$1.115738255 \times 10^{-7}$	<i>MYO16</i>
rs109897445	17	28862421	$3.793613216 \times 10^{-8}$	Межгенное (ближайший ген <i>SCLT1</i>) / <i>Intergenic</i> (closest gene <i>SCLT1</i>)
rs43178042	29	24014819	$7.081803309 \times 10^{-7}$	<i>NELL1</i>

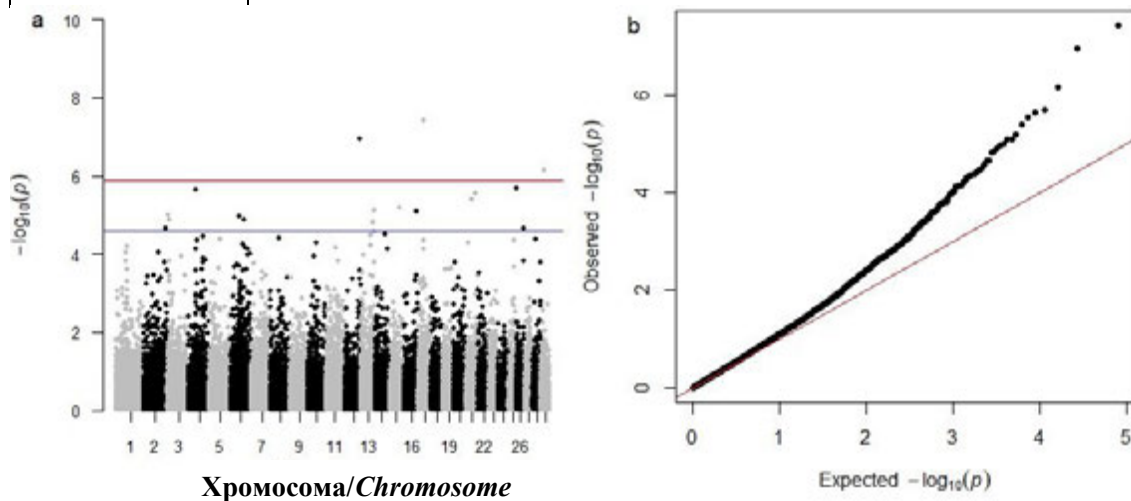


Рисунок 1. График Манхеттан для признака «КСК» (а). Пороговое значение для всего генома (красная линия) соответствует поправке Бонферрони. Графики квантиль-квантиль (QQ) отображают отрицательные логарифмы ожидаемых значений p (ось X) и наблюдаемых значений p (ось Y) (б).

Figure 1. Manhattan plot for the “SCC” trait (a). The genome-wide threshold (red line) corresponds to the Bonferroni correction. Quantile-quantile (QQ) plots display the negative logarithms of the expected p -values (X-axis) and the observed p -values (Y-axis) (b).

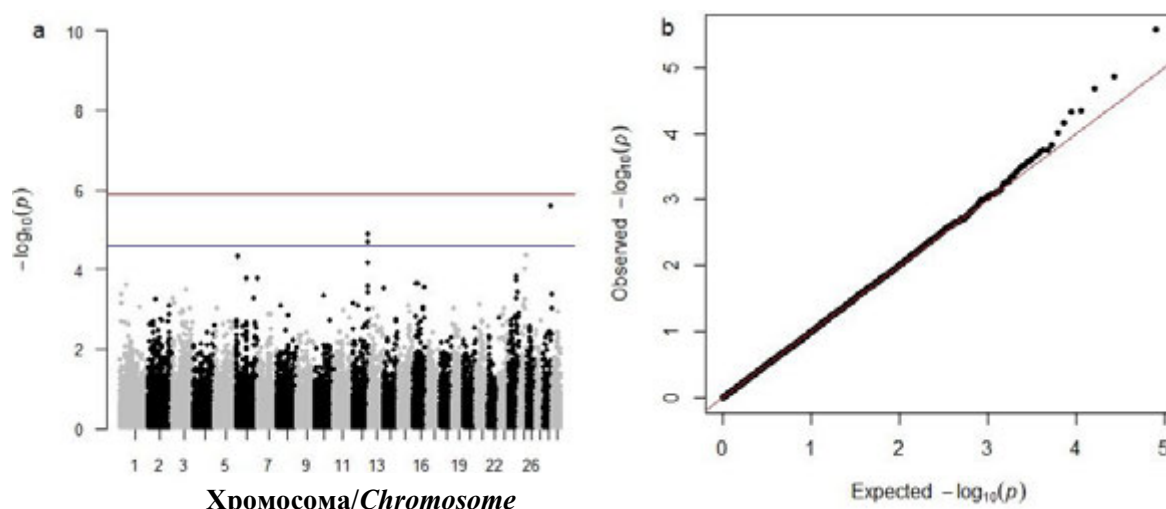


Рисунок 2. График Манхеттан для признака «ДКСК» (а). Пороговое значение для всего генома (красная линия) соответствует поправке Бонферрони. Графики квантиль-квантиль (QQ) отображают отрицательные логарифмы ожидаемых значений p (ось X) и наблюдаемых значений p (ось Y) (b).

Figure 2. Manhattan plot for the “DSCC” trait (a). The genome-wide threshold (red line) corresponds to the Bonferroni correction. Quantile-quantile (QQ) plots display the negative logarithms of the expected p -values (X-axis) and the observed p -values (Y-axis) (b).

Для установления связи полиморфных вариантов идентифицированных SNP мы провели сравнительный анализ содержания соматических клеток в молоке у коров с различными генотипами (табл. 4). По rs42775315 90,3 % животных имели генотип GG и отличались меньшими значениями КСК в сравнении с животными с гетерозиготным генотипом ($P \leq 0,01$). Всего 3 особи имели генотип AA и средние значения КСК >1000,0 тыс. ед./мл и были исключены из анализа ввиду малочисленности группы. 3 полиморфных варианта было идентифицировано среди анализируемых стад по rs109897445: AA (9,5 %), AG (46,33 %) и GG (44,17 %). Минимальные средние значения соматических клеток в молоке были зафиксированы у особей с генотипом GG в сравнении со сверстниками с генотипом AA ($P \leq 0,05$) и AG ($P \leq 0,001$). По rs43178042 большая часть выборки животных (85,0 %) имела гомозиготный генотип CC и характеризовалась низкими значениями КСК в сравнении с особями с генотипом AC ($P \leq 0,05$).

Таблица 4. Показатели КСК (тыс. ед./мл) по первой законченной лактации коров айрширской породы в зависимости от их генотипов по идентифицированным SNP
Table 4. Indicators of “SCC” trait in the first completed lactation of Ayrshire cows depending on their genotypes for identified SNPs

SNP	Генотип / Genotype		
rs42775315	AA=3	AG=55	GG=542
	1124,2±1006,3	337,7±69,0 ^a	163,1±9,8 ^b
rs109897445	AA=57	AG=278	GG=265
	446,4±89,9 ^e	175,1±13,4 ^{f,c}	137,5±11,6 ^{f,d}
rs43178042	AA=9	AC=81	CC=510
	783,2±380,2	255,5±39,0 ^c	162,6±9,5 ^d

Примечание: значения с разными индексами различаются при ^{a-b} – $P \leq 0,01$; ^{c-d} – $P \leq 0,05$; ^{e-f} – $P \leq 0,001$
Note: means with different indices are differ at ^{a-b} – $P \leq 0,01$; ^{c-d} – $P \leq 0,05$; ^{e-f} – $P \leq 0,001$

Таким образом, различные полиморфные варианты SNP, идентифицированные GWAS, были ассоциированы с содержанием соматических клеток в молоке коров айрширской породы, разводимой в РФ.

Обсуждение полученных результатов.

Количество соматических клеток в молоке служит важным биомаркером, отражающим состояние здоровья вымени коровы и, следовательно, безопасность произведённого молока. Согласно установленным стандартам качества (ГОСТ Р 52054-2003 «Молоко натуральное коровье - сырьё. Технические условия»), содержание соматических клеток в сыром молоке, поступающем на предприятия по переработке, не должно превышать 400 тыс. ед./мл. При этом, при оценке количества соматических клеток в индивидуальных пробах молока от отдельных коров, предельно допустимые значения не должны превышать 200 тыс. ед./мл. Полученные нами данные показали, что в среднем по всем оценённым стадам КСК равно 184,1 тыс. ед./мл, что в целом согласуется с результатами Болгова А.Е. с соавторами (2019), в исследованиях которых содержание соматических клеток в молоке айрширских коров составило 185 тыс. ед./мл.

Определение показателя ДКСК не так давно стало доступным в России. Однако уже имеется ряд публикаций, доказывающих его информативность в плане индивидуальной оценки состояния молочной железы коров. По данным Сермягина А.А. с коллегами (2021), у коров голштинизированной чёрно-пёстрой породы значения ДКСК составило $63,5 \pm 0,6$ % при КСК 832 ± 31 тыс. ед./мл. В проведённых нами ранее исследованиях установлено, что в молоке коров айрширской породы значения КСК было $106,73 \pm 252$ тыс. ед./мл, а ДКСК – $25,79 \pm 33,93$ %, что ниже в 3,2 и 2 раза соответственно, чем в молоке голштинских коров ($P \leq 0,001$) (Позовникова М.В. и др., 2022). Данный факт, по-видимому, связан с высокой устойчивостью животных айрширской породы к воспалительным заболеваниям вымени (Костомахин Н.М. и др., 2020).

Показатели наследуемости для КСК и ДКСК были зафиксированы на уровне 20,7 и 8,5 % соответственно. Ряд работ демонстрируют низкую наследуемость для данных признаков. Так, по данным Ablondi М с соавторами (2023), у симментальских коров коэффициент наследуемости для КСК составил 0,06, а для ДКСК – 0,08, но значения повторяемости для этих признаков составляли 0,43 и 0,36, что, по мнению авторов, было связано в первую очередь, со значительным влиянием факторов окружающей среды. У голштинских коров, оценённых по первой лактации, коэффициент наследуемости для КСК составил 0,104, а для комплекса признаков, «удой, КСК и ДКСК» – 0,137. Одновременный учёт трёх составляющих может быть эффективен в отношении снижения уровня КСК с одновременным повышением молочной продуктивности (Huang CH et al., 2024). По данным Лашневой И.А. (2023), в российской популяции голштинских коров показатель наследуемости для КСК был выше и составил 0,119.

На изменение числа соматических клеток с учётом их дифференциации в индивидуальных пробах молока айрширских коров значимое влияние оказывали факторы «Хозяйство», «Отец» и «Период лактации» ($P \leq 0,001$). «Хозяйство» – фактор, включающий в себя целый комплекс условий, в которых содержатся коровы: рацион питания, условия содержания, уровень санитарно-гигиенических норм, режим доения и т. д. Различные хозяйства могут иметь существенные отличия в этих условиях, что влияет на состояние здоровья коров и, соответственно, на качество их молока (Третьяков Е.А., 2018). Фактор «Отец» определяет генетическую предрасположенность коровы к продукции молока с определёнными свойствами (Болгов А.Е. и др., 2020). Период лактации отражает физиологическое состояние коровы в разные стадии её молочной продуктивности (Найманов Д.К. и др., 2019). Необходимо отметить совместное влияние данных факторов. Например, генетически склонные к болезням коровы могут быть более чувствительны к неблагоприятным условиям содержания в хозяйстве, что приводит к увеличению количества соматических клеток в молоке.

Несмотря на низкую наследуемость признаков КСК и ДКСК, анализ генетических факторов, основанный на идентификации значимых локусов в геноме коров, становится более актуальным. Определение SNP, ассоциированных с устойчивостью коров к субклиническому маститу поз-

воляет выявлять «желательные» генотипы животных, что в перспективе может быть эффективным инструментом в селекции стад на устойчивость к маститу. По результатам нашего исследования методом GWAS было выявлено три SNP с высоким уровнем значимости (1.254516×10^{-6}). Животные с гомозиготным генотипом GG по rs42775315, GG по rs109897445 и CC по rs43178042 характеризовались достоверно низкими значениями КСК в сравнении со сверстницами ($P \leq 0,01-0,001$). В качестве функциональных генов-кандидатов были определены гены *MYO16*, *NELL1* и ген *SCLT1*. Ген *MYO16* (миозин 16) играет значимую роль в регуляции клеточного цикла, пролиферации клеток и функционировании нейронов (Telek E et al., 2022). По данным Nazar M с коллегами (2021), методом GWAS с использованием модели FarmCPU у коров голштинской породы ген *MYO16* был определён как ген-кандидат для признаков сосков вымени. Другими авторами методом GWAS использованием подхода ddRAD данный ген был связан с признаками молочной продуктивности воспроизводства у буйолов породы мурра (Ravi Kumar D et al., 2023). Ген *NELL1* (Нейронный EGFL-1) был изначально идентифицирован как ген, участвующий в регуляции роста и дифференциации остеобластов. Последние данные показали, что белок NELL1 обладает противовоспалительными свойствами путем подавления острой и хронической инфильтрации воспалительных клеток, способствует выработке воспалительных цитокинов и экссудации мягких тканей (Shen J et al., 2013; Chen H et al., 2018).

В исследованиях Duchemin SI (2017) картирование BTA17 выявило значимые QTL у коров голштино-фризской породы, ассоциированные с жирнокислотным составом молока. Среди прочих значимым был определён ген *SCLT1* (натриевый канал и клатриновый линкер 1). Известно, что в процессе развития воспаления или при хроническом течении мастита соотношения жирных кислот в молоке подвержено значимым изменениям (Сермягин А.А. и др., 2021; Позовникова М.В. и др., 2022). Ген *SCLT1* экспрессируется в тканях молочной железы, а белок *SCLT1* необходим для цитолиза. Сигналы, передаваемые первичными ресничками, играют важную роль в дифференциации и морфогенезе тканей в процессе развития (Ott CM, 2020).

Основной проблемой в изучении генетических факторов, влияющих на развитие мастита, является недостаточное знание о функциях клеточных сетей и роли генов, не специфичных для этого заболевания, но потенциально важных в его развитии. Для совершенствования геномного прогнозирования необходимы дальнейшие исследования, направленные на верификацию и идентификацию SNP в этих ключевых кандидатных генах.

Наше исследование позволило обнаружить ранее неизвестные участки генома и гены-кандидаты, связанные с устойчивостью к маститу у коров айрширской породы, разводимой в РФ. Полученные данные расширяют наши представления о генетической основе устойчивости к маститу у молочного скота.

Заключение.

В результате проведённых исследований с использованием метода GWAS получены данные по идентификации геномных регионов и SNP, предположительно связанных с количеством соматических клеток в молоке коров айрширской породы. Идентифицированы SNP на BTA12 (*MYO16*, rs42775315), BTA17 (*NELL1*, rs43178042) и BTA29 (близлежащая область гена *SCLT1*, rs43178042). Полученные данные предоставляют важные сведения о генетических механизмах, которые определяют предрасположенность к маститу у айрширских коров. Проведение дополнительных исследований и верификация выявленных генетических ДНК-маркеров будут способствовать разработке инструментов, обеспечивающих реальное повышение резистентности к маститу животных и тем самым улучшения здоровья стада, повышение качества молока и молочной продукции, что повлияет на экономическую эффективность скотоводства.

Список источников

1. Болгов А.Е., Комлык И.П., Гришина Н.В. Определение и использование индексов племенной ценности быков по соматическим клеткам молока у дочерей при отборе на резистентность к маститу // Генетика и разведение животных. 2020. № 1. С. 3-8. [Bolgov AE, Komlyk IP, Grishina NV. Determination and use of bulls breeding value indices for somatic milk cells in daughters during selection for mastitis resistance. *Genetika i razvedenie zhivotnyh*. 2020;1:3-8. (*In Russ.*)]. doi: 10.31043/2410-2733-2020-1-3-8
2. Влияние количества соматических клеток с учетом их морфологической дифференциации на компонентный состав молока коров / М.В. Позовникова, В.Б. Лейбова, О.В. Тулинова, Е.А. Романова, Ю.С. Щербаков // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 6. С. 57-62. [Pozovnikova MV, Leibova VB, Tulanova OV, Romanova EA, Shcherbakov YuS. Effect of the somatic cell count, taking into account their morphological differentiation, on the component composition of cow's milk. *Russian Agricultural Sciences*. 2022;6:57-62. (*In Russ.*)]. doi: 10.31857/S2500262722060114
3. Влияние коррекции элементного статуса молочных коров на количественные и качественные характеристики молока / И.Н. Сычева, А.Б. Оришев, А.А. Мамедов, О.Н. Ивашова, Д.М. Муслюмова // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 3. С. 8-18. [Sychyova IN, Orishev AB, Mamedov A A, Ivashova ON, Muslyumova DM. Effect of elemental status correction on the quantitative and qualitative characteristics of milk in dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):8-18. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-8
4. Возрастные и наследственные факторы изменчивости количества соматических клеток в молоке коров айрширской породы / А.Е. Болгов, И.П. Комлык, Н.В. Гришина, Л.С. Паталяйнен // Генетика и разведение животных. 2019. № 2. С. 36-41. [Bolgov AE, Komlyk IP, Grishina NV, Patalainen LS. Age and hereditary factors of somatic cells number variability in milk of Ayrshire cows. *Genetika i razvedenie zhivotnyh*. 2019;2:36-41. (*In Russ.*)]. doi: 10.31043/2410-2733-2019-2-36-41
5. ГОСТ Р 52054-2003. Молоко натуральное коровье - сырье. Технические условия. Введ. 22.05.2003. М.: Стандартинформ, 2008. 30 с. [GOST R 52054-2003. Moloko natural'noe korov'e – syr'e. *Texnicheskie usloviya*. Vved. 22.05.2003. Moscow: Standartinform; 2008:30 p. (*In Russ.*)].
6. Лашнева И.А. Генетическая и геномная вариабельность компонентного состава молока и количества соматических клеток у коров голштинской породы: дис. канд. биол. наук. Дубровицы, 2023. 206 с. [Lashneva IA. *Geneticheskaja i genomnaja variabel'nost' komponentnogo sostava moloka i kolichestva somaticheskikh kletok u korov golshtinskoj породы*. [dissertation] Dubrovicy; 2023:206 p. (*In Russ.*)].
7. Молочная продуктивность дочерей быков-производителей различных линий голштинской породы и содержание соматических клеток в молоке / Д.К. Найманов, Г.И. Шайкамал, А.Т. Кажиякбарова, Е.Б. Джуламанов // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 2. С. 115-124. [Naimanov DK, Shaykamal GI, Kazhiyakbarova AT, Dzulamanov EB. Milk productivity of daughters from sires of various lines of Hholstein breed and the content of somatic cells in milk. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(2):115-124. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-115
8. Морфологический состав соматических клеток в молоке коров как критерий оценки здоровья молочной железы в связи с продуктивностью и компонентами молока / А.А. Сермягин, И.А. Лашнева, А.А. Косицин, Л.П. Игнатьева, О.А. Артемьева, J. Sölkner, Н.А. Зиновьева // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56, № 6. С. 1183-1198. [Sermyagin AA, Lashneva IA, Kositsin AA, Ignatieva LP, Artemieva OA, Sölkner J, Zinovieva N.A. Differential somatic cell count in milk as criteria for assessing cows' udder health in relation with milk production and components. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2021;56(6):1183-1198. (*In Russ.*)]. doi:10.15389/agrobiology.2021.6.1183rus doi: 10.15389/agrobiology.2021.6.1183eng
9. Морфофункциональные свойства вымени, экстерьерные особенности и молочная продуктивность коров разных пород / Н.М. Костомахин, Г.П. Табаков, Л.П. Табакова, В.Е. Никит-

ченко, А.С. Коротков // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2020. № 2. С. 64-84. [Kostomakhin NM, Tabakov GP, Tabakova LP, Nikitchenko VYe, Korotkov AS. Morphofunctional properties of udder, conformation features and milk productivity of different cow breeds. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2020;2:64-84. (In Russ.)]. doi: 10.26897/0021-342X-2020-2-64-84

10. Определение мочевины в молоке высокопродуктивных коров - прогностический маркер развития мастита / М.Н. Исакова, М.В. Ряпосова, С.В. Мымрин, У.В. Сивкова // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 3. С. 147-154. [Isakova MN, Ryaposova MV, Mymrin SV, Sivkova UV. Determination of urea in the milk of highly productive cows – a prognostic marker of mastitis development. Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(3):147-154. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-104-3-147

11. Третьяков Е.А. Качество молока коров айрширской породы прилутского типа в зависимости от сезона года и способа содержания // Молочнохозяйственный вестник. 2018. № 2(30). С. 89-97. [Tretyakov YeA. Milk quality of Ayrshire breed cows (Prilutsky type) depending on a season and a keeping way. Molochnokhozyajstvennyj Vestnik. 2018;2(30):89-97. (In Russ.)].

12. Ablondi M, Summer A, Stocco G, Degano L, Vicario D, Stefanon B, Cipolat-Gotet C. Heritability and genetic correlations of total and differential somatic cell count with milk yield and composition traits in Italian Simmental cows. Journal of Dairy Science. 2023;106(12):9071-9077. doi: 10.3168/jds.2023-23639

13. Artemieva O, Nikanova DA, Kositsin A, Lashneva I, Ignatieva LP, Sermyagin AA, Zinovieva NA. PSX-B-21 Diagnosis of early mastitis in dairy cows: Somatic cells and bacterial pathogen measuring. Journal of Animal Science. 2021;99(3):269-270. doi: 10.1093/jas/skab235.494

14. Cai Z, Iso-Touru T, Sanchez MP, Kadri N, Bouwman AC, Chitneedi PK, Sahana G, et al. Meta-analysis of six dairy cattle breeds reveals biologically relevant candidate genes for mastitis resistance. Genetics Selection Evolution. 2024;56(1):54. doi: 10.1186/s12711-024-00920-8

15. Chen H, Zhang Z, Zhang L, Wang J, Zhang M, Zhu B. miR-27a protects human mitral valve interstitial cell from TNF- α -induced inflammatory injury via up-regulation of NELL-1. Brazilian Journal of Medical and Biological Research. 2018;51(6):e6997. doi: 10.1590/1414-431X20186997

16. Duchemin SI, Bovenhuis H, Megens HJ, Van Arendonk JAM, Visker MHPW. Fine-mapping of BTA17 using imputed sequences for associations with de novo synthesized fatty acids in bovine milk. Journal of Dairy Science. 2017;100(11):9125-9135. doi: 10.3168/jds.2017-12965

17. Huang CH, Furukawa K, Kusaba N, Baba T, Kawakami J, Hagiya K. Genetic parameters for novel mastitis traits defined by combining test-day somatic cell score and differential somatic cell count in the first lactation of Japanese Holsteins. Journal of Dairy Science. 2024;107(6):3738-3752. doi: 10.3168/jds.2023-24399

18. Kaczorowski Ł, Powierska-Czarny J, Wolko Ł, Piotrowska-Cyplik A, Cyplik P, Czarny J. The influence of bacteria causing subclinical mastitis on the structure of the cow's milk microbiome. Molecules. 2022;27(6):1829. doi: 10.3390/molecules27061829

19. Kiser JN, Neibergs HL. Identifying loci associated with bovine corona virus infection and bovine respiratory disease in dairy and feedlot cattle. Front Vet Sci. 2021;8:679074. doi: 10.3389/fvets.2021.679074

20. Misztal I, Tsruta S, Strabel T, Auvray B, Druet T, Lee DH. BLUPF90 and related programs (BGF90). Proceedings of the 7th world congress on genetics applied to livestock production. France, Montpellier, 19-23 Aug. Communication. 2002;28-07(28):21-22.

21. Narayana SG, de Jong E, Schenkel FS, Fonseca PA, Chud TC, Powell D, Barkema HW, et al. Underlying genetic architecture of resistance to mastitis in dairy cattle: A systematic review and gene prioritization analysis of genome-wide association studies. Journal of Dairy Science. 2023;106(1):323-351. doi: 10.3168/jds.2022-21923

22. Nazar M, Lu X, Abdalla IM, Ullah N, Fan Y, Chen Z, Yang Z, et al. Genome-wide association study candidate genes on mammary system-related teat-shape conformation traits in Chinese holstein cattle. Genes. 2021;12(12):2020. doi: 10.3390/genes12122020

23. Ott CM. Primary Cilia. Arais IM, et al. The Liver: Biology and Pathobiology, 6 th edition. 2020;50-61. doi: 10.1002/9781119436812.ch5
24. Rakib MRH, Zhou M, Xu S, Liu Y, Khan MA, Han B, Gao J. Effect of heat stress on udder health of dairy cows. Journal of Dairy Research. 2020;87(3):315-321. doi: 10.1017/S0022029920000886
25. Ravi Kumar D, Nandhini PB, Joel Devadasan M, Sivalingam J, Mengistu D W, Verma A, Tania MS, et al. Genome-wide association study revealed suggestive QTLs for production and reproduction traits in Indian Murrah buffalo. 3 Biotech. 2023;13(3):100. doi: 10.1007/s13205-023-03505-2
26. Schwarz D, Kleinhans S, Reimann G, et al. Investigation of dairy cow performance in different udder health groups defined based on a combination of somatic cell count and differential somatic cell count. Preventive Veterinary Medicine. 2020;183:105123. doi: 10.1016/j.prevetmed.2020.105123
27. Shen J, James AW, Zara JN, Asatrian G, Khadarian K, Zhang JB, Soo C, et al. BMP2-induced inflammation can be suppressed by the osteoinductive growth factor NELL-1. Tissue engineering Part A. 2013;19(21-22):2390-2401. doi: 10.1089/ten.tea.2012.0519
28. Telek E, Karadi K, Kardos J, Kengyel A, Fekete Z, Halasz H, Lukacs A, et al. Conformational dynamics and functional characterization of the C-terminal tail of Myosin 16. Biophysical Journal. 2022;121(3-1):181a. doi:10.1016/j.bpj.2021.11.1831
29. Zhang Y, Xu Y, Chen B, Zhao B, Gao XJ. Selenium deficiency promotes oxidative stress-induced mastitis via activating the NF- κ B and MAPK pathways in dairy cow. Biological Trace Element Research. 2022;200(6):2716-2726. doi: 10.1007/s12011-021-02882-0

References

1. Bolgov AE, Komlyk IP, Grishina NV. Determination and use of bulls breeding value indices for somatic milk cells in daughters during selection for mastitis resistance. Genetics and Breeding of Animals. 2020;1:3-8. doi: 10.31043/2410-2733-2020-1-3-8
2. Pozovnikova MV, Leibova VB, Tulinova OV, Romanova EA, Shcherbakov YuS. Effect of the somatic cell count, taking into account their morphological differentiation, on the component composition of cow's milk. Russian Agricultural Sciences. 2022;6:57-62. doi: 10.31857/S2500262722060114
3. Sychyova IN, Orishev AB, Mamedov A A, Ivashova ON, Muslyumova DM. Effect of elemental status correction on the quantitative and qualitative characteristics of milk in dairy cows. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(3):8-18. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-8
4. Bolgov AE, Komlyk IP, Grishina NV, Patalainen LS. Age and hereditary factors of somatic cells number variability in milk of Ayrshire cows. Genetics and Breeding of Animals. 2019;2:36-41. doi: 10.31043/2410-2733-2019-2-36-41
5. State Standard R 52054-2003 Cow's milk raw. Specifications. Implementation date 22.05.2003. Moscow: Standartinform; 2008:30 p.
6. Lashneva IA. Genetic and genomic variability of milk component composition and somatic cell count in Holstein cows. [dissertation] Dubrovicy; 2023:206 p.
7. Naimanov DK, Shaykamal GI, Kazhiyakbarova AT, Dzulamanov EB. Milk productivity of daughters from sires of various lines of Hholstein breed and the content of somatic cells in milk. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(2):115-124. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-115
8. Sermyagin AA, Lashneva IA, Kositsin AA, Ignatieva LP, Artemieva OA, Sölkner J, Zinovieva N.A. Differential somatic cell count in milk as criteria for assessing cows' udder health in relation with milk production and components. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2021;56(6):1183-1198. doi: 10.15389/agrobiology.2021.6.1183rus doi: 10.15389/agrobiology.2021.6.1183eng
9. Kostomakhin NM, Tabakov GP, Tabakova LP, Nikitchenko VYe, Korotkov AS. Morphofunctional properties of udder, conformation features and milk productivity of different cow breeds. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2020;2:64-84. doi: 10.26897/0021-342X-2020-2-64-84

10. Isakova MN, Ryapsova MV, Mymrin SV, Sivkova UV. Determination of urea in the milk of highly productive cows – a prognostic marker of mastitis development. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(3):147-154. doi: 10.33284/2658-3135-104-3-147
11. Tretyakov YeA. Milk quality of Ayrshire breed cows (Prilutsky type) depending on a season and a keeping way. *Dairy Bulletin*. 2018;2(30):89-97.
12. Ablondi M, Summer A, Stocco G, Degano L, Vicario D, Stefanon B, Cipolat-Gotet C. Heritability and genetic correlations of total and differential somatic cell count with milk yield and composition traits in Italian Simmental cows. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(12):9071-9077. doi: 10.3168/jds.2023-23639
13. Artemieva O, Nikanova DA, Kositsin A, Lashneva I, Ignatieva LP, Sermyagin AA, Zinovieva NA. PSX-B-21 Diagnosis of early mastitis in dairy cows: Somatic cells and bacterial pathogen measuring. *Journal of Animal Science*. 2021;99(3):269-270. doi: 10.1093/jas/skab235.494
14. Cai Z, Iso-Touru T, Sanchez MP, Kadri N, Bouwman AC, Chitneedi PK, Sahana G, et al. Meta-analysis of six dairy cattle breeds reveals biologically relevant candidate genes for mastitis resistance. *Genetics Selection Evolution*. 2024;56(1):54. doi: 10.1186/s12711-024-00920-8
15. Chen H, Zhang Z, Zhang L, Wang J, Zhang M, Zhu B. miR-27a protects human mitral valve interstitial cell from TNF- α -induced inflammatory injury via up-regulation of NELL-1. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. 2018;51(6):e6997. doi: 10.1590/1414-431X20186997
16. Duchemin SI, Bovenhuis H, Megens HJ, Van Arendonk JAM, Visker MHPW. Fine-mapping of BTA17 using imputed sequences for associations with de novo synthesized fatty acids in bovine milk. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(11):9125-9135. doi: 10.3168/jds.2017-12965
17. Huang CH, Furukawa K, Kusaba N, Baba T, Kawakami J, Hagiya K. Genetic parameters for novel mastitis traits defined by combining test-day somatic cell score and differential somatic cell count in the first lactation of Japanese Holsteins. *Journal of Dairy Science*. 2024;107(6):3738-3752. doi: 10.3168/jds.2023-24399
18. Kaczorowski Ł, Powierska-Czarny J, Wolko Ł, Piotrowska-Cyplik A, Cyplik P, Czarny J. The influence of bacteria causing subclinical mastitis on the structure of the cow's milk microbiome. *Molecules*. 2022;27(6):1829. doi: 10.3390/molecules27061829
19. Kiser JN, Neibergs HL. Identifying loci associated with bovine corona virus infection and bovine respiratory disease in dairy and feedlot cattle. *Front Vet Sci*. 2021;8:679074. doi: 10.3389/fvets.2021.679074
20. Misztal I, Tsruta S, Strabel T, Auvray B, Druet T, Lee DH. BLUPF90 and related programs (BGF90). Proceedings of the 7th world congress on genetics applied to livestock production. France, Montpellier, 19-23 Aug. Communication. 2002;28-07(28):21-22.
21. Narayana SG, de Jong E, Schenkel FS, Fonseca PA, Chud TC, Powell D, Barkema HW, et al. Underlying genetic architecture of resistance to mastitis in dairy cattle: A systematic review and gene prioritization analysis of genome-wide association studies. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(1):323-351. doi: 10.3168/jds.2022-21923
22. Nazar M, Lu X, Abdalla IM, Ullah N, Fan Y, Chen Z, Yang Z, et al. Genome-wide association study candidate genes on mammary system-related teat-shape conformation traits in Chinese Holstein cattle. *Genes*. 2021;12(12):2020. doi: 10.3390/genes12122020
23. Ott CM. Primary Cilia. Arais IM, et al. *The Liver: Biology and Pathobiology*, 6 th edition. 2020:50-61. doi: 10.1002/9781119436812.ch5
24. Rakib MRH, Zhou M, Xu S, Liu Y, Khan MA, Han B, Gao J. Effect of heat stress on udder health of dairy cows. *Journal of Dairy Research*. 2020;87(3):315-321. doi: 10.1017/S0022029920000886
25. Ravi Kumar D, Nandhini PB, Joel Devadasan M, Sivalingam J, Mengistu D W, Verma A, Tantia MS, et al. Genome-wide association study revealed suggestive QTLs for production and reproduction traits in Indian Murrah buffalo. *3 Biotech*. 2023;13(3):100. doi: 10.1007/s13205-023-03505-2

26. Schwarz D, Kleinhans S, Reimann G, et al. Investigation of dairy cow performance in different udder health groups defined based on a combination of somatic cell count and differential somatic cell count. Preventive Veterinary Medicine. 2020;183:105123. doi: 10.1016/j.prevetmed.2020.105123
27. Shen J, James AW, Zara JN, Asatrian G, Khadarian K, Zhang JB, Soo C, et al. BMP2-induced inflammation can be suppressed by the osteoinductive growth factor NELL-1. Tissue engineering Part A. 2013;19(21-22):2390-2401. doi: 10.1089/ten.tea.2012.0519
28. Telek E, Karadi K, Kardos J, Kengyel A, Fekete Z, Halasz H, Lukacs A, et al. Conformational dynamics and functional characterization of the C-terminal tail of Myosin 16. Biophysical Journal. 2022;121(3-1):181a. doi:10.1016/j.bpj.2021.11.1831
29. Zhang Y, Xu Y, Chen B, Zhao B, Gao XJ. Selenium deficiency promotes oxidative stress-induced mastitis via activating the NF- κ B and MAPK pathways in dairy cow. Biological Trace Element Research. 2022;200(6):2716-2726. doi: 10.1007/s12011-021-02882-0

Информация об авторах:

Марина Владимировна Позовникова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики, Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», Московское шоссе, д. 55а, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, 196601, Россия. Тел.: +7-960-231-03-21.

Ольга Васильевна Тулинова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории генетики и разведения крупного рогатого скота, Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», Московское шоссе, д. 55а, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, 196601, Россия. Тел.: +7-921-305-80-06.

Ольга Константиновна Васильева, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории генетики и разведения крупного рогатого скота, Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», Московское шоссе, д. 55а, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, 196601, Россия. Тел.: +7-911-280-78-81.

Юрий Сергеевич Щербаков, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики, Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», Московское шоссе, д. 55а, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, 196601, Россия. Тел.: +7-999-524-47-84

Information about the authors:

Marina V Pozovnikova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher Laboratories of Molecular Genetics, Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, St. Petersburg, Tyarlevo, Moscow highway, 55a, 196601, tel.: +7-960-231-03-21.

Olga V Tulinova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher Laboratory of Genetics and Cattle Breeding, Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, St. Petersburg, Tyarlevo, Moscow highway, 55a, 196601, tel.: +7-921-305-80-06.

Olga K Vasileva, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher Laboratory of Genetics and Cattle Breeding, Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, St. Petersburg, Tyarlevo, Moscow highway, 55a, 196601, tel.: +7-911-280-78-81.

Yuriy S Shcherbakov, Cand. Sci. (Biology), Junior Researcher Laboratories of Molecular Genetics, Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, St. Petersburg, Tyarlevo, Moscow highway, 55a, 196601, tel.: +7-999-524-47-84

Статья поступила в редакцию 02.10.2024; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 02.10.2024; approved after reviewing 11.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 83-93.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 83-93.

Научная статья
УДК 636.088.5
doi:10.33284/2658-3135-107-4-83

**Влияние линейной принадлежности на показатели молочной продуктивности коров
голштинской породы различных уровней стрессустойчивости**

**Ольга Сергеевна Чеченихина¹, Николай Николаевич Меншиков², Алексей Владимирович Степанов³,
Екатерина Сергеевна Смирнова⁴, Вера Николаевна Синько⁵, Андрей Владимирович Шиловцев⁶**

^{1,2}Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

^{3,4,5,6}Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

¹olgachech@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9011-089X>

²nmenshikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5447-9410>

³alexeystepanow@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8523-5938>

⁴ekaterina-kazantseva@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2116-121X>

⁵vsinko71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9757-0824>

⁶a.shilovtsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0498-6068>

Аннотация. Один из перспективных методов разведения племенных животных, направленных на увеличение показателей продуктивности молочных стад, является отбор животных в зависимости от линейной принадлежности. Специалисты предприятий по племенной работе с крупным рогатым скотом молочного направления продуктивности включают в перечень показателей оценки животных уровень их стрессустойчивости. Цель исследований – оценка влияния линейной принадлежности на показатели молочной продуктивности коров голштинской породы различных уровней устойчивости к стрессам. Исследования проведены на коровах линий Вис Бэк Айдиал 1013415 и Рефлекшн Соверинг 198998 колхоза «Урал» Свердловской области (120 голов). При распределении коров на группы относительно уровней стрессоустойчивости оценивали коэффициент синхронности молокоотдачи исследуемых животных (Ксм). Уровень стрессоустойчивости у каждого животного определяли путём процентного соотношения Ксм к среднему значению группы. Низкий уровень стрессоустойчивости соответствовал 110,0 % и более; средний уровень – 100,0-109,0 %; высокий – менее 100,0 %. Установлено, что удой за 305 дней первой лактации выше в группах коров с высоким типом стрессоустойчивости в среднем на 7,1 %. При этом лишь у животных линии Рефлекшн Соверинг 198998 данная разница оказалась достоверной и составила 11,2 % (при $P \leq 0,001$). У особей, относящихся к линии Вис Бэк Айдиал 1013415, разница в пожизненном надое между коровами с низким и высоким уровнями устойчивости к стрессу составила 7,8 %, у особей линии Рефлекшн Соверинг 198998 – 20,9 % (при $P \leq 0,05$). Следовательно, можно предположить, что среди животных линии Рефлекшн Соверинг 198998 отбор коров по уровню устойчивости к стрессу будет более эффективен.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, линейная принадлежность, стресс, молокоотдача, удой, продуктивное долголетие

Для цитирования: Влияние линейной принадлежности на показатели молочной продуктивности коров голштинской породы различных уровней стрессустойчивости / О.С. Чеченихина, Н.Н. Меншиков, А.В. Степанов, Е.С. Смирнова, В.Н. Синько, А.В. Шиловцев // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 83-93. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-83>

Original article

The influence of line on indicators of dairy productivity of the Holstein cows with various levels of stress resistance

Olga S Chechenikhina¹, Nikolai N Menshchikov², Alexey V Stepanov³, Ekaterina S Smirnova⁴, Vera N Sinko⁵, Andrey V Shilovtsev⁶

^{1,2}Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

^{3,4,5,6}Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

¹olgachech@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9011-089X>

²nmenschikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5447-9410>

³alexeystepanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8523-5938>

⁴ekaterina-kazantseva@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2116-121X>

⁵vsinko71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9757-0824>

⁶a.shilovtsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0498-6068>

Abstract. The selection of animals depending on their line is one of the promising methods of rearing brood animals aimed at increasing the productivity of dairy herds. Specialists of enterprises engaged in breeding work with dairy cattle include the level of stress resistance in the list of animal assessment indicators. The purpose of the research is to assess the effect of linear dependence on the indicators of dairy productivity of Holstein cows of various levels of stress resistance. The studies were conducted on cows of the Vis Back Ideal 1013415 and Reflection Sovering 198998 lines of the Ural collective farm in the Sverdlovsk region (120 heads). Dividing cows into groups relative to stress resistance levels, the coefficient of synchronicity of milk yield of the studied animals (Ksm) was estimated. The level of stress resistance in each animal was determined by the percentage ratio of Ksm to the average value of the group. The low level of stress resistance corresponded to 110.0% or more; the average level was 100.0-109.0%; the high level was less than 100.0%. It was found that milk yield for 305 days of the first lactation was higher in groups of cows with a high type of stress resistance by an average of 7.1%. At the same time, only in animals of the Reflection Sovering 198998 line, this difference turned out to be significant and amounted to 11.2% (at $P \leq 0.001$). In cows belonging to the Vis Back Ideal 1013415 line, the difference in lifetime milk yield between cows with low and high levels of stress resistance was 7.8%, in individuals of the Reflection Sovering 198998 line - 20.9% (at $P \leq 0.05$). Consequently, it can be assumed that among the animals of the Reflection Sovering 198998 line, the selection of cows according to the level of resistance to stress will be more effective.

Keywords: cattle, lineage, stress, milk yield, productive longevity

For citation: Chechenikhina OS, Menshchikov NN, Stepanov AV, Smirnova ES, Sinko VN, Shilovtsev AV. The influence of line on indicators of dairy productivity of the Holstein cows with various levels of stress resistance. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):83-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-83>

Введение.

Молочная промышленность является одной из ведущих направлений экономики нашей страны. Государственные приоритеты в рамках продовольственного суверенитета России направлены на принятие мер по развитию молочной отрасли. К таким мерам относятся: модернизация оборудования, улучшение кормовой базы, технологий первичной обработки сырья и так далее. Немаловажную роль в этом процессе играет племенная работа с молочным скотом.

Отбор молочных коров в зависимости от линейной принадлежности, направленный на повышение основных показателей молочной продуктивности стада, является одним из перспективных методов разведения племенных животных (Лоретц О.Г. и др., 2024; Бакай Ф.Р. и др., 2023).

По данным учёных, отбор ценных в племенном отношении животных реализуется в целях закрепления наиболее желательных параметров, успешного формирования племенного ядра в стаде, а также для перспективы рождения ценного и здорового потомства. Учёт линейной принадлежности в эколого-кормовых условиях конкретного стада даёт возможность к тенденции увеличения эффективности селекционно-племенной работы (Хромова О.Л. и др., 2024).

Следует отметить, что всё чаще специалисты в племенных предприятиях по разведению молочных пород крупного рогатого скота учитывают среди всего перечня показателей отбора животных также уровень их устойчивости к стрессам. Племенные службы данный факт связывают с интенсивными технологиями, которые применяются в процессе производства молока. К сожалению, не все животные оказываются пригодными к данным технологиям по некоторым технологическим параметрам (Орлов Д.С., 2023; Хисамов Р.Р. и др., 2022; Шарипов Д.Р., 2023).

Оценка уровня стрессустойчивости коров осуществляется с учётом различных индикаторов процесса адаптации коров к интенсивным технологиям. Так, например, свою эффективность показали способы оценки стрессустойчивости путём учёта уровня гормонов в крови животных, рефлекса молокоотдачи, отношения удоя за первую минуту к разовому удою и других показателей (Карташов Л.П. и др., 2001; Чеченихина О.С., 2020; Чеченихина О.С. и др., 2024).

При этом целесообразной является оценка влияния происхождения животных на уровень их устойчивости к стрессам.

Цель исследования.

Проанализировать влияние линейной принадлежности на показатели молочной продуктивности коров голштинской породы различных уровней стрессустойчивости.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Коровы голштинской породы племенного стада Колхоза «Урал» Свердловской области (120 голов).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Исследования проводились по схеме, представленной на рисунке 1.

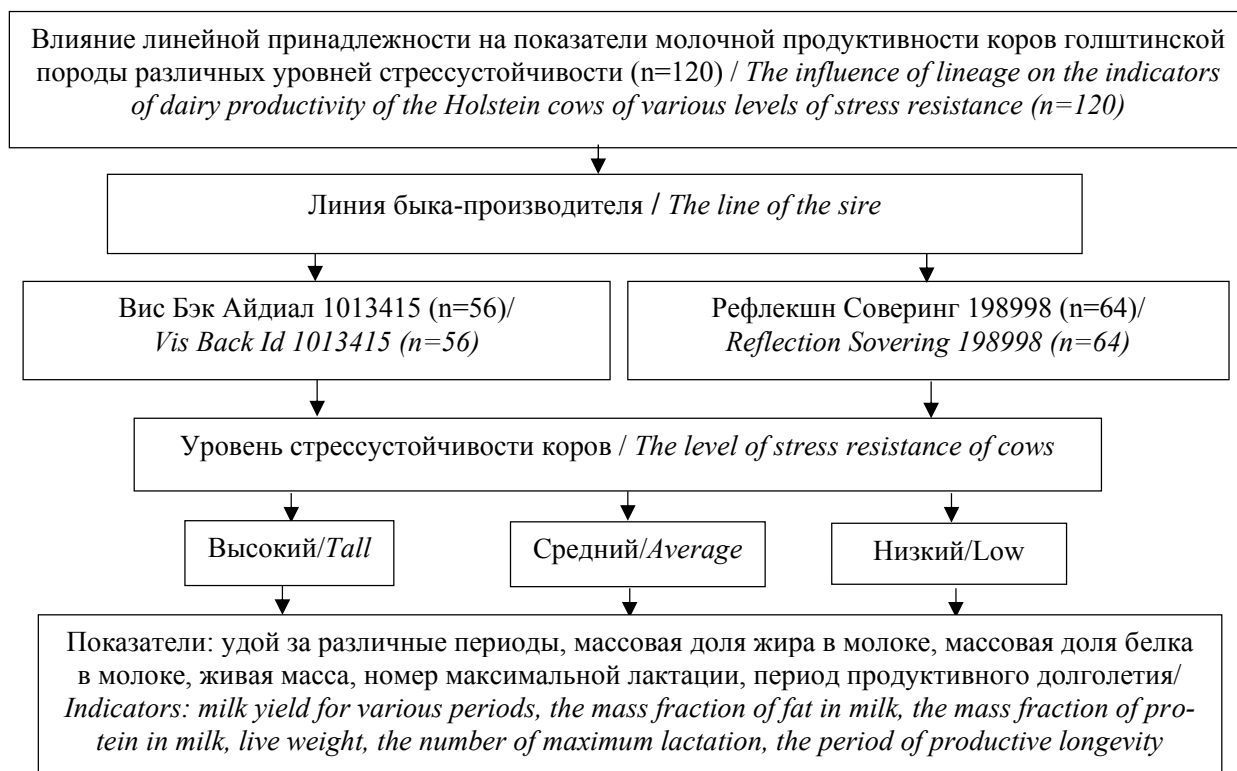


Рисунок 1. Схема эксперимента
Figure 1. Experimental scheme

При распределении коров на группы относительно уровней стрессоустойчивости оценивали коэффициент синхронности молокоотдачи исследуемых животных по формуле (Карташов Л.П. и др., 2001):

$$K_{см} = \frac{y_1}{y}, \text{ где} \quad (1)$$

$K_{см}$ – коэффициент синхронности молокоотдачи;

y_1 – наибольшая разница в количестве молока, зафиксированного при выдаивании за один цикл доения из каждой четверти вымени, кг;

y – разовый удой животного, кг.

Результаты оценивались в среднем за три доения. Уровень стрессоустойчивости у каждого животного определяли путём процентного соотношения $K_{см}$ к среднему значению группы. Низкий уровень стрессоустойчивости соответствовал 110,0 % и более; средний уровень – 100,0-109,0 %; высокий – менее 100,0 %.

Основные данные по уровню молочной продуктивности (удой за различные периоды, массовые доли жира и белка в молоке, живая масса и период продуктивного долголетия), исследуемых групп животных взяты из ИАС «Селекс» предприятия.

Кормление исследуемых групп животных разных линий реализовывалось по рационам, принятым на предприятии.

Оборудование и технические средства. Доение животных на ферме осуществлялось с помощью роботизированной доильной системы «Lely Astronaut A4». Показатели молочной продуктивности исследуемых коров измерялись автоматически доильным роботом за каждое доение.

Статистическая обработка. Анализ и обработка полученных в результате исследований данных осуществлялась с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» («Microsoft», США) с применением «Excel» («Microsoft», США), «Биостатистика» (Россия) с расчётом основных статистических и биометрических показателей. Пороги достоверности разницы оценивали по Стьюденту между максимальным и минимальным значениями показателей: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$.

Результаты исследования.

Установлено, что животных, имеющих высокий уровень стрессоустойчивости, больше в группе линии Рефлекшн Соверинг 198998 на 2,5 % по сравнению с группой линии Вис Бэк Айдиал 1013415 (рис. 2).

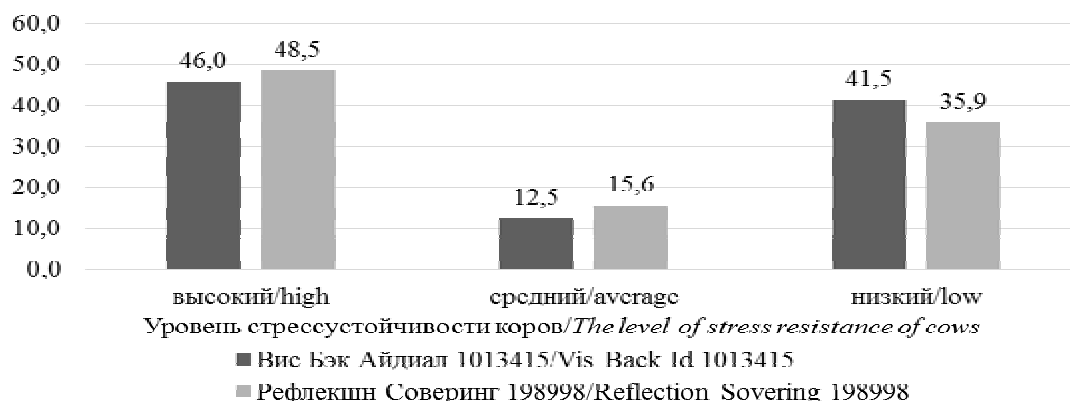


Рисунок 2. Количество коров различных линий в зависимости от уровня стрессоустойчивости, %
Figure 2. The number of cows of different lines depending on the level of stress resistance, %

Животных с низким уровнем стрессоустойчивости больше в группе линии Вис Бэк Айдиал 1013415 по сравнению с другой оцениваемой группой на 5,6 %.

Оценка показателей молочной продуктивности животных разных линий показала, что разница в удое за 100 дней первой лактации между коровами высокого и низкого уровней стрессоустойчивости составила 658,3 кг (14,5 %, $p \leq 0,001$) в группе линии Вис Бэк Айдиал 1013415 и 594,0 кг (13,2 %) при $p \leq 0,001$ – в группе линии Рефлекшн Соверинг 198998 (табл. 1).

Таблица 1. Молочная продуктивность за первую лактацию коров различных уровней стрессустойчивости в зависимости от линейной принадлежности, $\bar{X} \pm S_x$

Table 1. Milk productivity for the first lactation of cows of various levels of stress resistance, depending on the linear affiliation, $\bar{X} \pm S_x$

Показатель / Indicator	Уровень стрессустойчивости коров, линия / The level of stress resistance of cows, line		
	высокий/high	средний/average	низкий/low
Вис Бэк Айдиал 1013415 / Vis Back Ideal 1013415			
Удой, кг/Milk yield, kg за 100 дней / in 100 days	4529,5±93,1***	3938,0±269,1	3871,2±158,0
за 305 дней / in 305 days	9323,6±248,6	9223,1±368,4	9051,6±212,6
Массовая доля жира в молоке, % / The mass fraction of fat in milk, %	4,21±0,05	4,16±0,10	4,23±0,06
Массовая доля белка в молоке, % / Mass fraction of protein in milk, %	3,32±0,03	3,39±0,05	3,45±0,04***
Живая масса, кг/Live weight, kg	549,2±10,2	569,0±24,8	572,7±11,3
Рефлекшн Соверинг 198998 / Reflection Sovering 198998			
Удой, кг/Milk yield, kg за 100 дней / in 100 days	4490,4±99,2***	3916,1±130,1	3896,4±168,8
за 305 дней / in 305 days	10006,0±221,8***	9189,3±333,8	8886,2±151,2
Массовая доля жира в молоке, % / The mass fraction of fat in milk, %	4,07±0,04	4,13±0,05	4,16±0,05
Массовая доля белка в молоке, % / Mass fraction of protein in milk, %	3,26±0,03	3,29±0,03	3,30±0,04
Живая масса, кг/Live weight, kg	569,7±8,2	555,0±17,8	554,8±9,9

Примечание: здесь и далее * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$

Note: hereafter * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$; *** – $P \leq 0.001$

Удой за 305 дней первой лактации выше в группах коров с высоким типом стрессустойчивости в среднем на 685,9 кг (7,1 %). При этом лишь у животных линии Рефлекшн Соверинг 198998 данная разница оказалась достоверной при $P \leq 0,001$ и составила 1119,8 кг (11,2 %).

Достоверно значимой разницы в массовой доле жира в молоке между группами животных всех типов стрессустойчивости не выявлено. При этом в данной выборке отмечена тенденция снижения жирномолочности при повышении удоя коров. Массовая доля белка в молоке коров линии Вис Бэк Айдиал 1013415 достоверно выше в группе животных с низким уровнем стрессустойчивости по сравнению с высоким уровнем на 0,13 % (при $P \leq 0,001$).

Живая масса всех оцениваемых коров составила в среднем 552,6 кг без достоверной разницы между группами животных.

Период продуктивного долголетия исследуемых коров составил в среднем по оцениваемой выборке $2,2 \pm 0,08$ лактаций. При этом установлено, что у коров линии Вис Бэк Айдиал 1013415 данный показатель превышал на 0,3 лактации группу животных линии Рефлекшн Соверинг 198998 (табл. 2).

Таблица 2. Молочная продуктивность за период жизни коров различных уровней стрессоустойчивости в зависимости от линейной принадлежности, $\bar{X} \pm S_x$
Table 2. Milk productivity during the life of cows of various levels of stress resistance, depending on the linear affiliation, $\bar{X} \pm S_x$

Показатель / Indicator	Уровень стрессоустойчивости коров, линия / The level of stress resistance of cows, line		
	высокий/high	средний/average	низкий/low
Вис Бэк Айдиал 1013415 / Vis Back Ideal 1013415			
Период продуктивного долголетия, лактаций / The period of productive longevity, lactation	2,3±0,2	2,7±0,2	2,2±0,2
Удой пожизненный, кг / Lifetime milk yield, kg	21624,7±1030,0	20806,7±603,3	19943,4±1216,1
Массовая доля жира в молоке, % / The mass fraction of fat in milk, %	4,16±0,04	4,17±0,07	4,20±0,05
Массовая доля белка в молоке, % / Mass fraction of protein in milk, %	3,32±0,03	3,39±0,06	3,44±0,03**
Рефлекшн Соверинг 198998 / Reflection Sovering 198998			
Период продуктивного долголетия, лактаций / The period of productive longevity, lactation	2,1±0,1	2,2±0,3	2,1±0,2
Удой пожизненный, кг / Lifetime milk yield, kg	19906,8±1298,8*	19449,7±1546,1	15738,7±1470,0
Массовая доля жира в молоке, % / The mass fraction of fat in milk, %	4,09±0,03	4,20±0,07	4,02±0,19
Массовая доля белка в молоке, % / Mass fraction of protein in milk, %	3,27±0,02	3,31±0,04	3,17±0,15

Следует отметить, что в группах коров обеих оцениваемых линий период производственного использования выше у животных среднего уровня стрессоустойчивости по сравнению с низким и высоким уровнями в среднем на 0,5 лактаций (линия Вис Бэк Айдиал 1013415) и на 0,1 лактаций (линия Рефлекшн Соверинг 198998).

Количество молока, полученного от оцениваемых животных за период жизни, больше в группе линии Вис Бэк Айдиал 1013415 по сравнению с группой коров линии Рефлекшн Соверинг 198998 в среднем на 2406, 5 кг (11,6 %).

Значительное влияние стрессоустойчивости на молочную продуктивность и состав молока наблюдалось у линий крупного рогатого скота: Вис Бэк Айдиал 1013415 и Рефлекшн Соверинг 198998. В линии Вис Бэк Айдиал 1013415 коровы, обладающие низкой стрессоустойчивостью, дали на 1593,7 кг (на 7,8 %) молока меньше за всю свою жизнь по сравнению с их более выносливыми особями ($P \leq 0,05$). Эта разница была еще более выражена в линии Рефлекшн Соверинг 198998, где разница в надоях за всю жизнь достигла существенного значения – 1961,6 кг (20,9 %), что также является статистически значимым ($P \leq 0,05$). Эти результаты свидетельствуют о значительных экономических последствиях стрессоустойчивости молочного скота, подчеркивая важность селекции для повышения устойчивости к стрессу.

Кроме того, стрессоустойчивость также повлияла на состав молока. В линии Вис Бэк Айдиал 1013415 коровы с низкой стрессоустойчивостью дали молоко с более высоким содержанием жира (на 0,04 % больше) и белка (на 0,08 % больше) по сравнению с более выносливыми коровами. В группе коров линии Рефлекшн Соверинг 198998 у животных со средним уровнем стрессоустойчивости – на 0,15 % и 0,09 % соответственно.

Обсуждение полученных результатов.

По данным учёных, интенсивная технология производства молока на ферме способствует возникновению факторов, которые влекут за собой стрессовое состояние животных (Беседин Е.Н. и Иванов А.В., 2020; Курак А.С., 2022).

В исследованиях А.В. Писаренко установлено, что адаптация молочных коров чёрно-пёстрой породы к интенсификации производства зависит от степени реализации их генетического потенциала и уровня устойчивости к стрессу. А.В. Писаренко (2023) выявлена тенденция увеличения срока хозяйственного использования коров при повышении уровня их адаптации к стрессу, что коррелирует с данными, полученными в наши исследованиях.

Отбор по линейной принадлежности животных в целях повышения продуктивного долголетия стада показал свою эффективность в работах многих исследователей (Беленькая А.Е. и Ярмоц Г.А., 2020; Чучунов В.А. и др., 2022; Костомахин Н.М. и др., 2024). При этом не все работы отражают результаты оценки коров по уровню устойчивости к стрессам с одновременным учётом происхождения животных.

В ходе наших исследований было установлено, что особи, принадлежащие к линии Вис Бэк Айдиал 1013415, отличались более высокими показателями (как за первую лактацию, так и за период жизни. При этом животные, которые являются потомками быков линии Вис Бэк Айдиал 1013415 среднего уровня устойчивости к стрессу, дали больше молока за срок хозяйственного использования (20806,7 кг), имея продолжительнее период жизни (2,7 лактаций).

Следует отметить, что в группе коров линии Рефлекшн Соверинг 198998 разница в удое за различные периоды первой лактации и за период жизни статистически более достоверна между животными высокого и низкого уровней стрессоустойчивости, чем в группе коров линии Вис Бэк Айдиал 1013415. Можно предположить, что среди животных линии Рефлекшн Соверинг 198998 отбор коров по показателям устойчивости к стрессу будет более эффективен.

Заключение.

Удой за 305 дней первой лактации выше в группах коров с высоким типом стрессоустойчивости в среднем на 7,1 %. При этом лишь у животных линии Рефлекшн Соверинг 198998 данная разница оказалась достоверной и составила 11,2 % (при $P \leq 0,001$). У коров линии Вис Бэк Айдиал 1013415 разница в пожизненном удое между коровами с низким и высоким уровнями стрессоустойчивости составила 7,8 %, у коров линии Рефлекшн Соверинг 198998 – 20,9 % (при $p \leq 0,05$). Следовательно, среди животных линии Рефлекшн Соверинг 198998 отбор коров по уровню устойчивости к стрессу будет более эффективен.

Список источников

1. Бакай Ф.Р., Мухтаров А.М., Мехтиева К.С. Изменчивость показателей молочной продуктивности коров разных линий // Главный зоотехник. 2023. № 6(239). С. 3-10. [Bakai FR, Mukhtarov AM, Mekhtieva KS. Variability of indicators of dairy productivity of cows of different genealogical lines. Glavnyj zootechnik. 2023;6(239):3-10. (In Russ.)]. doi: 10.33920/sel-03-2306-01
2. Беленькая А.Е., Ярмоц Г.А. Сравнительная характеристика голштинских линий по продуктивным качествам // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2020. № 3(60). С. 133-137. [Belenkaya AE, Yarmots GA. Comparative characteris-

tics of holstein lines in terms of productive qualities. Vestnik Burjatskoj gosudarstvennoj sel'skhozajstvennoj akademii im. V.R. Filippova. 2020;3(60):133-137. (In Russ.). doi: 10.34655/bgsha.2020.60.3.020

3. Беседин Е.Н., Иванов А.В. Влияние стресса на молочную продуктивность. Методы повышения стрессоустойчивости коров в условиях промышленной технологии // Молочное и мясное скотоводство. 2020. № 8. С. 29-31. [Besedin EN, Ivanov AV. The effect of stress on milk productivity. Methods of increasing the stress resistance of cows in terms of industrial technology. Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding. 2020;8:29-31. (In Russ.).]

4. Влияние добровольной технологии доения на показатели продуктивности коров различных типов стрессоустойчивости / О.С. Чеченихина, Е.С. Смирнова, Е.В. Ражина, Н.Н. Меншиков // Молочнохозяйственный вестник. 2024. № 2(54). С. 128-140. [Chechenikhina OS, Smirnova ES, Razhina EV, Menshchikov NN. Influence of voluntary milking technology on productivity indicators of cows of different types of stress resistance. Molochnokhosyaystvenny vestnik. 2024;2(54):128-140. (In Russ.).] doi: 10.52231/2225-4269_2024_2_128

5. Костомахин Н.М., Габедова М.А., Воронкова О.А. Молочная продуктивность коров-первотелок голштинской породы в зависимости от линейной принадлежности // Главный зоотехник. 2024. № 7(252). С. 24-35. [Kostomakhin NM, Gabedova MA, Voronkova OA. Milk productivity of first-calf heifers of holstein breed depending on their genealogical lines origin. Glavnyj zootehnik. 2024;7(252):24-35. (In Russ.).] doi: 10.33920/sel-03-2407-03

6. Курак А.С. Молоко у коровы не только на языке. Часть 1. Стрессы у животных - актуальная проблема // Наше сельское хозяйство. 2022. № 10(282). С. 11-17. [Kurak AS. Moloko u korovy ne tol'ko na jazyke. Chast' 1. Stressy u zhivotnyh - aktual'naja problema. Nashe sel'skoe hozjajstvo. 2022;10(282):11-17. (In Russ.).]

7. Линейная принадлежность и продуктивное долголетие коров / В.А. Чучунов, В.А. Злепкин, Е.Б. Радзиевский, Т.В. Коноблей // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2022. № 25-1. С. 85-91. [Chuchunov VA, Zlepkin VA, Radzievskij EB, Konoblej TV. Linejnaja prinallezhnost' i produktivnoe dolgoletie korov. Aktual'nye problemy intensivnogo razvitija zhivotnovodstva. 2022;25-1:85-91. (In Russ.).]

8. Лоретц О.Г., Ражина Е.В., Смирнова Е.С. Продуктивные особенности коров голштинской породы разных генетических линий // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24. № 6. С. 779-791. [Loretts OG, Razhina EV, Smirnova ES. Productive features of Holstein cows of different genetic lines. Agrarnyj Bulletin of the Urals. 2024;24(6):779-791. (In Russ.).] doi: 10.32417/1997-4868-2024-24-06-779-791

9. Орлов Д.С. К истории молочного животноводства в Кемеровской области в 1970-е гг. // Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2023. № 1(27). С. 172-182. [Orlov DS. On the dairy farming history in the kemerovo region in the 1970s. Socio-economic and Humanitarian Journal. 2023;1(27):172-182. (In Russ.).] doi: 10.36718/2500-1825-2023-1-172-182

10. Писаренко А.В. Продуктивное долголетие и воспроизводительная способность коров в зависимости от уровня адаптации // Известия Горского государственного аграрного университета. 2023. Т. 60-3. С. 44-52. [Pisarenko AV. Productive longevity and reproductive ability of cows depending on the level of adaptation. Proceedings of Gorsky State Agrarian University. 2023;60-3:44-52. (In Russ.).] doi: 10.54258/20701047_2023_60_3_44

11. Происхождение и племенная ценность быков-производителей, от которых получены коровы с рекордной продуктивностью / О.Л. Хромова, Н.И. Абрамова, М.О. Селимян, Н.В. Зенкова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2024. № 2(71). С. 270-280. [Khromova OL, Abramova NI, Selimyan MO, Zenkova NV. He origin and breeding value of the breeding bulls from which cows with record productivity were obtained. Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2024;2(71):270-280. (In Russ.).] doi: 10.31677/2072-6724-2024-71-2-270-280

12. Способ оценки стрессоустойчивости коров в условиях эксплуатации роботов-дояров / Д.Р. Шарипов и др. // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2023. Т. 256, № 4. С. 312-316. [Sharipov DR, et al. Method for assessing stress resistance of cows under operating conditions of robotic milking. Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2023;256(4):312-316. (In Russ.)]. doi: 10.31588/2413_4201_1883_4_256_312
13. Способ оценки типа стрессоустойчивости коров по коэффициенту синхронности молокоотдачи четвертей вымени: пат. 2174751 Рос. Федерации / Л.П. Карташов и др. Заявл. 08.02.2000; опубл. 20.10.2001, Бюл. № 29. 7 с. [Kartashov LP, et al. Method for determining type of cow stress resistance by milk yield synchronism coefficient of udder quadrants: pat. 2174751 Ros. Federacii. Zayavl. 08.02.2000; opubl. 20.10.2001, Byul. № 29. 7 p. (In Russ.)].
14. Хисамов Р.Р., Загидуллин Л.Р., Шайдуллин Р.Р. Оценка и отбор коров по стрессоустойчивости для системы роботизированного доения // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2022. Т. 250, № 2. С. 266-271. [Khisamov RR, Zagidullin LR, Shaidullin RR. Evaluation and selection of cows by stress resistance for a robotic milking system. Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2022; 250(2):266-271. (In Russ.)]. doi: 10.31588/2413_4201_1883_2_250_266
15. Чеченихина О.С. Стрессоустойчивость крупного рогатого скота как фактор продуктивного долголетия // Вестник биотехнологии. 2020. № 4(25). С. 2. [Chechenikhina OS. Bovine stress tolerance as a factor of productive longevity. Bulletin of Biotechnology. 2020;4(25):2. (In Russ.)].

References

1. Bakai FR, Mukhtarov AM, Mekhtieva KS. Variability of indicators of dairy productivity of cows of different genealogical lines. Chief Zootechnician. 2023;6(239):3-10. doi: 10.33920/sel-03-2306-01
2. Belenkaya AE, Yarmots GA. Comparative characteristics of holstein lines in terms of productive qualities. Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov. 2020;3(60):133-137. doi: 10.34655/bgsha.2020.60.3.020
3. Besedin EN, Ivanov AV. The effect of stress on milk productivity. Methods of increasing the stress resistance of cows in terms of industrial technology. Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding. 2020;8:29-31.
4. Chechenikhina OS, Smirnova ES, Razhina EV, Menshchikov NN. Influence of voluntary milking technology on productivity indicators of cows of different types of stress resistance. Dairy Farming Bulletin. 2024;2(54):128-140. doi: 10.52231/2225-4269_2024_2_128
5. Kostomakhin NM, Gabedava MA, Voronkova OA. Milk productivity of first-calf heifers of holstein breed depending on their genealogical lines origin. Chief Zootechnician. 2024;7(252):24-35. doi: 10.33920/sel-03-2407-03
6. Kurak AS. Milk in cows is not only on the tongue. Part 1. Stress in animals is a topical issue. Our Agriculture. 2022;10(282):11-17.
7. Chuchunov VA, Zlepkin VA, Radzievskiy EB, Konobley TV. Linear affiliation and productive longevity of cows. Actual Problems of Intensive Development of Animal Husbandry. 2022;25-1:85-91.
8. Loretts OG, Razhina EV, Smirnova ES. Productive features of Holstein cows of different genetic lines. Agrarnyj Bulletin of the Urals. 2024;24(6):779-791. doi: 10.32417/1997-4868-2024-24-06-779-791
9. Orlov DS. On the dairy farming history in the kemerovo region in the 1970s. Socio-economic and Humanitarian Journal. 2023;1(27):172-182. doi: 10.36718/2500-1825-2023-1-172-182

10. Pisarenko AV. Productive longevity and reproductive ability of cows depending on the level of adaptation. Proceedings of Gorsky State Agrarian University. 2023;60-3:44-52. doi: 10.54258/20701047_2023_60_3_44
11. Khromova OL, Abramova NI, Selimyan MO, Zenkova NV. He origin and breeding value of the breeding bulls from which cows with record productivity were obtained. Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2024;2(71):270-280. doi: 10.31677/2072-6724-2024-71-2-270-280
12. Sharipov DR, et al. Method for assessing stress resistance of cows under operating conditions of robotic milking. Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2023;256(4):312-316. doi: 10.31588/2413_4201_1883_4_256_312
13. Kartashov LP, et al. Method for determining type of cow stress resistance by milk yield synchronism coefficient of udder quadrants: pat. 2174751 Ros. Federatsiya. Appl. 08.02.2000; publ. 20.10.2001, Byul. № 29. 7 p.
14. Khisamov RR, Zagidullin LR, Shaidullin RR. Evaluation and selection of cows by stress resistance for a robotic milking system. Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2022; 250(2):266-271. doi: 10.31588/2413_4201_1883_2_250_266
15. Chechenikhina OS. Bovine stress tolerance as a factor of productive longevity. Bulletin of Biotechnology. 2020;4(25):2.

Информация об авторах:

Ольга Сергеевна Чеченихина, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры биотехнологии и инжиниринга, Уральский государственный экономический университет, 620144, Уральский ФО, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, д. 62/45, тел.: +79122270251.

Николай Николаевич Менщиков, соискатель, Уральский государственный экономический университет, 620144, Уральский ФО, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, д. 62/45, тел.: +79199467333.

Алексей Владимирович Степанов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, Уральский государственный аграрный университет, 620000, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42, тел.: +79126920331.

Екатерина Сергеевна Смирнова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, Уральский государственный аграрный университет, 620000, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42, тел.: +79126649857.

Вера Николаевна Синько, старший преподаватель кафедры философии, Уральский государственный аграрный университет, 620000, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42, тел.: +79195806593.

Андрей Владимирович Шиловцев, кандидат исторических наук, доцент кафедры философии, Уральский государственный аграрный университет, 620000, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42, тел.: +79222225598.

Information about the authors:

Olga S Chechenikhina, Dr Sci. (Biology), Associate Professor, Professor of the Department of Biotechnology and Engineering, Ural State University of Economics, 62/45 8 Marta str./Narodnaya Volya, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620144, Ural Federal District, tel. +79122270251.

Nikolay N Menshchikov, applicant, Ural State University of Economics, 62/45 8 Marta str./Narodnaya Volya, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620144, Ural Federal District, tel. +79199467333.

Alexey V Stepanov, Cand. Sci (Agriculture), Associate Professor of the Department of Biotechnology and Food Products, Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht str, Yekaterinburg, 620000, Sverdlovsk region. +79126920331

Ekaterina S Smirnova, Cand. Sci (Agriculture), Associate Professor of the Department of Biotechnology and Food Products, Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht str, Yekaterinburg, 620000, Sverdlovsk region. +79126649857.

Vera N Sinko, Senior Lecturer at the Department of Philosophy, Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht str, Yekaterinburg, 620000, Sverdlovsk region. +79195806593.

Andrey V Shilovtsev, Cand. Sci. (Historical), Associate Professor of the Department of Philosophy, Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht str, Yekaterinburg, 620000, Sverdlovsk region. +79222225598.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 09.10.2024; approved after reviewing 02.12.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 94-105.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 94-105.

Научная статья
УДК 636.5:575.113
doi:10.33284/2658-3135-107-4-94

**Полногеномные ассоциативные исследования показателей цвета мяса
у кур f2 ресурсной популяции**

Анастасия Николаевна Ветох¹, Наталья Александровна Волкова², Полина Валентиновна Ларионова³,
Алан Юрьевич Джагаев⁴, Александра Сергеевна Абдельманова⁵, Наталия Анатольевна Зиновьева⁶
^{1,2,3,4,5,6}Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика

Л.К. Эрнста, Московская область, п. Дубровицы, Россия

¹anastezuya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2865-5960>

²natavolkova@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7191-3550>

³volpolina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5047-1888>

⁴alan_dz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7818-0142>

⁵preevetic@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>

⁶n_zinovieva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4017-6863>

Аннотация. Целью исследований являлся поиск SNP и идентификация генов-кандидатов, ассоциированных с цветовыми характеристиками мяса кур. Объектом исследований служили куры F2 ресурсной популяции, полученной посредством межпородного скрещивания двух пород, контрастных по показателям мясной продуктивности – русская белая и корниш. Полученная ресурсная популяция кур была фенотипирована в возрасте 42 дней по цвету мяса грудного отдела и бедренной части по цветовой шкале a^* , b^* и L^* с помощью спектрофотометра, а также генотипирована с использованием ДНК-чипа Illumina Chicken iSelect BeadChip 60k. В ходе проведенного GWAS было установлено 30 достоверно значимых SNP ($P \leq 0,0001$), ассоциированных с цветом мяса у кур F2 ресурсной популяции, в том числе связанных с цветовыми характеристиками грудной мышцы – 12 SNP, с показателями цвета бедренной части – 18 SNP. В области данных SNP было идентифицировано 214 генов, в том числе 10 генов в позициях данных SNP-*BRAF*, *ENO2*, *UBE3D*, *RGS6*, *ATP13A3*, *RHBDD1*, *MB21D2*, *BHLHE23*, *PIAS4*, *MLLT1*, локализованных на хромосомах GGA1, GGA3, GGA5, GGA9, GGA20 и GGA28. Полученные результаты имеют практическое значение для понимания молекулярно-генетических механизмов формирования и проявления признаков, определяющих цветовые характеристики мяса кур, и могут быть исследованы в дальнейшем для использования в геномной селекции кур, направленной на улучшение качественных показателей мяса.

Ключевые слова: куры, цвет мяса, SNP, гены-кандидаты, полногеномные ассоциативные исследования

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2023-2025 гг. ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (№ FGGN-2023-0002).

Для цитирования: Полногеномные ассоциативные исследования показателей цвета мяса у кур F2 ресурсной популяции / А.Н. Ветох, Н.А. Волкова, П.В. Ларионова, А.Ю. Джагаев, А.С. Абдельманова, Н.А. Зиновьева // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 94-105. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-94>

Original article

**Genome-wide association studies of meat color indicators
in the F2 chickens resource population**

Anastasia N Vetokh¹, Natalia A Volkova², Polina V Larionova³, Alan Yu Dzhagaev⁴, Alexandra S Abdelmanova⁵, Natalia A Zinovieva⁶

^{1,2,3,4,5,6} Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Dubrovitsy, Russia

¹anastezuya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2865-5960>

²natavolkova@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7191-3550>

³volpolina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5047-1888>

⁴alan_dz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7818-0142>

⁵preevetic@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>

⁶n_zinovieva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4017-6863>

Abstract. The aim of the study was to search for SNPs and identify candidate genes associated with color characteristics of chicken meat. The object of the research was F2 chickens of the resource population obtained through interbreeding of two breeds with contrasting meat productivity indicators - Russian White and Cornish. The obtaining resource population of chickens was phenotyped at the age of 42 days for breast and thigh meat color according to the a*, b* and L* color scale using a spectrophotometer, and genotyped using the Illumina Chicken iSelect BeadChip 60k DNA chip. The GWAS identified 30 significant SNPs ($P \leq 0.0001$) associated with meat color in F2 chickens of the resource population, including 12 SNPs associated with breast muscle color traits and 18 SNPs associated with thigh color parameters. The 214 genes were identified in the SNPs region, including 10 genes at the positions of these SNPs - *BRAF*, *ENO2*, *UBE3D*, *RGS6*, *ATP13A3*, *RHBDD1*, *MB21D2*, *BHLHE23*, *PIAS4*, and *MLLT1*, localized on chromosomes GGA1, GGA3, GGA5, GGA9, GGA20 and GGA28. The results have practical significance for understanding the molecular genetic mechanisms in the formation and manifestation of traits that determine the color characteristics of chicken meat and can be used in subsequent studies in genomic selection of chickens to improve the quality of meat.

Keywords: chickens, meat color, SNP, candidate genes, genome-wide association studies

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2023-2025 L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry (No. FGGN-2023-0002).

For citation: Vetokh AN, Volkova NA, Larionova PV, Dzhagaev AY, Abdelmanova AS, Zinovieva NA. Genome-wide association studies of meat color indicators in young F2 chickens resource population. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):94-105. (In Russ). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-94>

Введение.

Отрасль птицеводства за последние тридцать лет уверенно развивается, а производство и потреблении продукции, являющейся основным источником белка с высокой биологической ценностью и содержанием в них микроэлементов, таких как витамин А, тиамин, железо, фосфор и никотиновая кислота, особенно по сравнению с растительными белками, занимает лидирующие позиции в мясной индустрии (Тузиков Р.А. и др., 2023; Karunanayaka DS et al., 2016).

Качественные показатели мяса, такие как вид, цвет, влагоудерживающая способность и упругость, влияющие на производственные и потребительские характеристики готовой продукции, зависят как от внешних факторов – условий содержания и кормления, так и от индивидуальных – порода, возраст и пол животного (Дорохин Н.А., 2020; Kudryashova OA and Kudryashov LS, 2022).

Цвет мяса является индикатором практически всех физиологических, биохимических и технологических процессов и служит критерием при оценке качества продукта (Козырев И.В. и др., 2017). По нему судят о товарном виде мяса, степени работы определённых групп мышц, а так-

же о некоторых химических превращениях, которые могут происходить в мясе (Гречкина В.В. и Лебедев С.В., 2022). Радикальное изменение цвета свидетельствует о потере мясом свежести: бактериальное заражение поверхности обуславливает её обесцвечивание вплоть до приобретения сероватой окраски (Török Á et al., 2023). Для оценки цвета и установления его характеристик применяют органолептические и инструментальные методы. Инструментальный метод основан на измерении координат спектра, а самой популярной системой считается $L^*a^*b^*$, где L характеризует светлоту по спектру от тёмного к светлому, а – спектр от зелёного до пурпурного; b – спектр от голубого до жёлтого (Ветох А.Н. и др., 2023). Цвет мяса в том числе может зависеть от pH, характеризующий продукт как PSE (бледный, мягкий, эксудативный) или DFD (тёмное, твёрдое, сухое мясо) (Mashood Q et al., 2023). Птица – единственный вид животных, где мясо разделяют на тёмное и светлое, в зависимости от типа мускулатуры. Сырое мясо грудки кур имеет бледно-розовый цвет, а сырое мясо бёдер и ножек — тёмно-красное (Mir NA et al., 2017; Bowker B, 2017). При этом мясо птицы часто относят к категории PSE на основании высоких показателей цвета L^* и низкого уровня pH, что является проблемой для перерабатывающей промышленности (Che S et al., 2023). Формирование качественного мяса у цыплят-бройлеров определяется не только предубойными факторами, влияющими на кислотность, но и генетическими особенностями птицы (Alnahhas N et al., 2016; Волкова Н.А. и др., 2024). Это указывает на необходимость проведения генетического отбора для оценки степени изменчивости качественных показателей мяса кур. Одним из эффективных методов исследования наследственных факторов, влияющих на эти показатели, является использование локусов количественных признаков (QTL) (Allais S et al., 2019).

Цель исследования.

Поиск SNP и идентификация генов-кандидатов, ассоциированных с цветовыми характеристиками мяса кур.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Куры F2 модельной ресурсной популяции.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Исследование проводилось на базе ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста. Для получения F2 ресурсной популяции кур ($n=112$) использовали две породы, контрастные по показателям скорости роста и мясным качествам – русская белая (медленный рост, яичная порода) и корниш (быстрый рост, мясная порода). Содержание и кормление опытной птицы соответствовало возрастным нормам. Цыплята до 3-недельного возраста выращивались в брудерах с постепенным понижением температуры с $+34\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в первые часы после выхода из яйца) до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем переводились на напольное содержание. Во все периоды выращивания птица имела постоянный доступ к полнорационному промышленному комбикорму и свежей воде.

Куры F2 ресурсной популяции были фенотипированы по показателям, характеризующим цветовые характеристики мяса грудной и бедренной мышцы в возрасте 42 дней. Подготовку к убою и убой птицы проводили в соответствии с национальным стандартом Российской Федерации «Птица сельскохозяйственная для уоя. Технические условия» (ГОСТ Р 52837-2007). Голодная выдержка составляла не более 10 часов для сохранения показателей качества мяса в тушке. После уоя птицы проводили снятие оперения с предварительным ошпариванием тушек с последующей обвалкой для качественной оценки мяса.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы лаборатории клеточной инженерии и отдела популяционной генетики и генетических основ разведения животных ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Цветовые характеристики грудки и филе бедра измеряли с помощью портативного спектрофотометра CM-700d («Konica Minolta», Япония) по системе $L^*a^*b^*$ через 24 ч после уоя в пяти точках образца, определяя для каждого среднее значение по шкалам спектра.

Для выделения ДНК использовали пульпу пера. Экстракцию ДНК проводили с использованием набора Syntol для выделения ДНК из ткани животных (Syntol, Moscow, Россия). Концентрацию растворов ДНК определяли с использованием флуориметра Qubit 3.0 (Thermo Fisher Scientific, Wilmington, DE, США). Для проверки чистоты извлеченной ДНК соотношение OD260/280 было протестировано с использованием инструмента NanoDrop-2000 (Thermo Fisher Scientific).

Полногеномное генотипирование кур было выполнено с использованием ДНК-чипа Illumina Chicken iSelect BeadChip 60k. Контроль качества и фильтрацию данных генотипирования для каждого образца и каждого SNP выполняли в программной среде R с использованием программного пакета PLINK 1.9. Для выявления ассоциаций SNP с показателями роста и развития грудных мышц у кур F2 ресурсной популяции применяли регрессионный анализ в PLINK 1.9. Данные визуализировали в пакете qqman (<https://github.com/qqman>) с помощью языка программирования R (Turner SD, 2018).

Поиск генов-кандидатов, локализованных в области идентифицированных SNP ($\pm 0,2\text{Mb}$), проводили через средство просмотра геномных данных (Genome Data Viewer) в базе данных NCBI Gallus gallus (chicken) (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/>).

Статистическая обработка. Статистические показатели рассчитывали с использованием пакета анализа данных в Microsoft Office 365 по следующим параметрам: значение средних, стандартная ошибка, минимум (min), максимум (max), коэффициент вариации (CV).

Результаты исследования.

Результаты оценки цветовых характеристик мяса кур F2 ресурсной популяции в возрасте 42 дней представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика кур F2 ресурсной популяции по цветовым характеристикам мяса (n=112, возраст 42 дня)
 Table 1. Assessments of F2 chickens of the resource population by meat color characteristics (n=112, age 42 days)

Признак / Indicator	Спектр / Spectrum	Среднее / Average	Ошибка / Standard error	Min	Max	Cv, %
Цвет грудной мышцы / The breast muscle color	a	1,93	0,15	-0,31	6,79	73,9
	b	10,06	0,21	5,73	16,81	19,4
	L	52,6	0,41	42,41	62,28	7,4
Цвет бедренной мышцы / The thigh muscle color	a	5,57	0,29	0,37	11,77	49,2
	b	11,19	0,31	5,64	16,35	26,1
	L	53,27	0,54	28,10	65,60	9,6

Исследованная модельная ресурсная популяция кур характеризовалась значительной вариабельностью значений по отдельным спектрам цвета грудной и бедренной мышц. Высокий коэффициент изменчивости отмечался по показателям спектров цвета мяса a^* и b^* – до 73,9 %. Значения по спектру цвета мяса L^* не превышали 9,6 %.

Полученные данные фенотипической оценки ресурсной популяции кур были использованы для полногеномного ассоциативного анализа. Были выявлены участки генома, связанные с цветовыми характеристиками грудных и бедренных мышц у исследованной популяции кур.

Проведённый GWAS-анализ на уровне установленного порога достоверности $P \leq 0,0001$ выявил 12 значимых SNP, ассоциированных с цветом мяса грудного отдела и 18 SNP – с цветовыми характеристиками мяса бедренной части у кур исследованной F2 ресурсной популяции (табл. 2). Данные SNP были локализованы на 12 из 28 учтённых хромосом (рис. 1).

Таблица 2. Перечень достоверно значимых SNP ($P \leq 0,0001$), ассоциированных с цветовыми характеристиками мяса у кур F2 ресурсной популяции
Table 2. List of significant SNPs ($P \leq 0.0001$) associated with meat color characteristics from F2 chickens of the resource population

Признак / Indicator	Спектр / Spectrum	SNP	Хромосома / Chromosome	P
Цвет мяса грудного отде- ла / <i>The breast muscle color</i>	a*	GGaluGA280269	5	4,93E-05
		Gga_rs13756508	5	8,57E-05
		Gga_rs10729083	1	2,89E-05
	b*	Gga_rs13887556	1	4,58E-05
		Gga_rs13834498	1	7,15E-06
		Gga_rs13834451	1	7,55E-05
		GGaluGA086201	12	7,81E-05
		Gga_rs15321542	1	7,62E-05
	L*	Gga_rs15279200	1	1,46E-05
		Gga_rs14141917	2	1,96E-05
		Gga_rs14142291	2	2,73E-05
		GGaluGA219476	3	3,15E-05
Цвет мяса бед- ренной части / <i>The thigh mus- cle color</i>	a*	Gga_rs16142729	2	8,94E-06
		Gga_rs15894255	8	2,51E-05
		Gga_rs16741792	14	4,77E-10
		Gga_rs14276515	20	4,96E-05
		Gga_rs15175708	20	5,29E-05
		GGaluGA179133	20	5,45E-05
		Gga_rs15249589	28	2,66E-08
		GGaluGA000771	28	3,32E-05
	b*	Gga_rs16636092	8	5,93E-05
		Gga_rs14673106	9	2,32E-05
		Gga_rs14663418	9	2,63E-05
		GGaluGA339603	9	3,97E-06
		Gga_rs10731045	19	3,29E-05
	L*	Gga_rs14381780	3	3,88E-05
		Gga_rs14381814	3	3,88E-05
		Gga_rs15519416	4	2,69E-06
		GGaluGA266380	4	4,84E-05
		GGaluGA201366	28	3,06E-05

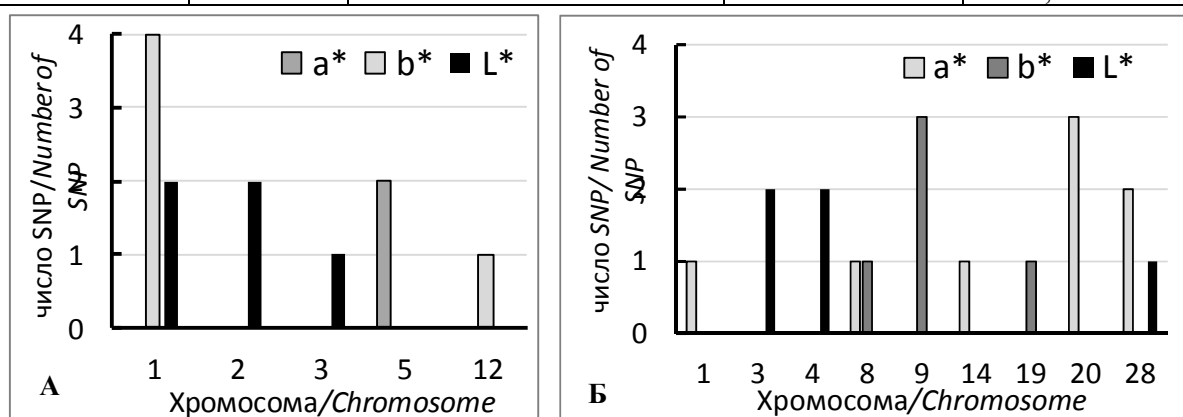


Рисунок 1. Распределение на хромосомах значимых SNP ($P \leq 0,0001$), ассоциированных с цветовыми характеристиками грудной (А) и бедренной (Б) мышц у кур F2 ресурсной популяции

Figure 1. Distribution of significant SNPs ($P \leq 0.0001$) on chromosomes associated with color characteristics of the breasts muscles (A) and thigh muscles (B) from F2 chickens of the resource population

Выявленные достоверно значимые SNP, связанные с цветовыми характеристиками мяса кур F2 ресурсной популяции, были использованы для аннотирования генов-кандидатов, ассоциированных с данными признаками (табл. 3). В области выявленных SNP было установлено 214 генов, в том числе в позициях данных SNP – 10 генов (*BRAF*, *ENO2*, *UBE3D*, *RGS6*, *ATP13A3*, *RHBDD1*, *MB21D2*, *BHLHE23*, *PIAS4*, *MLLT1*). Выявленные гены были локализованы на хромосомах GGA1, GGA3, GGA5, GGA9, GGA20 и GGA28.

Таблица 3. Перечень достоверно значимых генов-кандидатов ($P \leq 0,0001$), ассоциированных с показателями цвета мяса у кур F2 ресурсной популяции

Table 3. List of significant candidate genes ($P \leq 0.0001$) associated with meat color indicators in F2 chickens of the resource population

CHR	SNP	Позиция / Position	Ген ($\pm 0,2$ Mb) / Gene ($\pm 0,2$ Mb)
1	2	3	4
1	Gga_rs15321542	81524498	<i>TMEM39A</i> , <i>B4GALT4</i> , <i>B3GAT1L</i> , <i>gga-mir-3539</i> , <i>UPK1B</i> , <i>IGSF11</i>
1	Gga_rs15279200	56942229	<i>SLC37A3</i> , <i>RAB19</i> , <i>MKRN4P</i> , <i>DENND2A</i> , <i>ADCK2</i> , <i>NDUFB2</i> , <i>BRAF</i>* , <i>MRPS33</i> , <i>TMEM178B</i>
1	Gga_rs10729083	77961991	<i>PIANP</i> , <i>COPS7A</i> , <i>MLF2</i> , <i>LAG3</i> , <i>CD4</i> , <i>GPR162</i> , <i>P3H3</i> , <i>GNB3</i> , <i>CDCA3</i> , <i>USP5</i> , <i>TPII</i> , <i>LRRC23</i> , <i>ENO2</i>* , <i>CIH12ORF57</i> , <i>PTPN6</i> , <i>PHB2</i> , <i>EMG1</i> , <i>LPCAT3</i> , <i>C1S</i> , <i>C1R</i> , <i>RBP5</i> , <i>CLSTN3</i> , <i>PEX5</i>
1	Gga_rs13887556	78214849	<i>PHB2</i> , <i>EMG1</i> , <i>LPCAT3</i> , <i>C1S</i> , <i>C1R</i> , <i>RBP5</i> , <i>CLSTN3</i> , <i>PEX5</i> , <i>EPHA1</i> , <i>ZYX</i> , <i>FAM131B</i> , <i>CLCN1</i> , <i>CASP2</i> , <i>RAP1GAP1</i>
1	Gga_rs13834498	72389106	-
1	Gga_rs13834451	72475687	<i>MRPS35</i> , <i>MANSC4</i> , <i>KLHL42</i>
2	Gga_rs16142729	148496819	<i>LY6E</i> , <i>TOP1MT</i> , <i>RHPN1</i> , <i>MAFA</i> , <i>ZC3H3</i>
2	Gga_rs14141917	14639769	<i>ZNF438</i> , <i>SVIL</i> , <i>LY6E</i>
2	Gga_rs14142291	14941870	<i>LY6E</i> , <i>TOP1MT</i> , <i>RHPN1</i> , <i>MAFA</i> , <i>ZC3H3</i> , <i>JCAD</i> , <i>MTPAP</i> , <i>MAP3K8</i>
3	GGaluGA219476	43926780	-
3	Gga_rs14381780	78062830	<i>RWDD2A</i> , <i>PGM3</i> , <i>DOPIA</i> , <i>UBE3D</i>* , <i>TPBG</i> , <i>IBTK</i>
3	Gga_rs14381814	78078352	<i>RWDD2A</i> , <i>PGM3</i> , <i>DOPIA</i> , <i>UBE3D</i> , <i>TPBG</i> , <i>IBTK</i>
4	Gga_rs15519416	26013340	-
4	GGaluGA266380	76899770	<i>CIQTNF7</i> , <i>CPEB2</i>
5	GGaluGA280269	25928651	<i>PLA2G4F</i> , <i>VPS39</i> , <i>TMEM87A</i> , <i>GANC</i> , <i>CAPN3</i> , <i>ZNF106</i> , <i>SNAP23</i> , <i>LRRC57</i> , <i>HAUS2</i>
5	Gga_rs13756508	27013919	<i>RGS6</i>* , <i>SIPA1L1</i>
8	Gga_rs15894255	1624673	<i>SLC25A24</i> , <i>HENMT1</i> , <i>STXBP3</i> , <i>GPSM2</i> , <i>CLCC1</i> , <i>WDR47</i> , <i>CAMSAP2</i>
8	Gga_rs16636092	19372206	<i>GIPC2</i> , <i>DNAJB4</i> , <i>FUBP1</i> , <i>NEXN</i> , <i>MIGA1</i> , <i>USP33</i> , <i>ZZZ3</i> , <i>AK5</i> , <i>PIGK</i>
9	Gga_rs14673106	13020745	<i>APOD</i> , <i>PPP1R2</i> , <i>ACAP2</i> , <i>XXYLT1</i> , <i>FAM43A</i> , <i>LSG1</i> , <i>ATP13A3</i>* , <i>GP5</i> , <i>LRRC15</i> , <i>CPN2</i> , <i>HES1</i> , <i>OPA1</i>
9	Gga_rs14663418	9447587	<i>IRS1</i> , <i>RHBDD1</i>* , <i>MFF</i> , <i>MRPL44</i> , <i>AGFG1</i>

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
9	GGaluGA339603	13432903	<i>ATP13A4</i> , MB21D2* , <i>FGF12</i>
12	GGaluGA086201	12399550	<i>PDHB</i> , <i>KCTD6</i> , <i>ACOX2</i> , <i>FAM107A</i> , <i>FAM3D</i> , <i>CFAP20DC</i> , <i>FHIT</i>
14	Gga_rs16741792	11533591	-
19	Gga_rs10731045	6203277	<i>ERAL1</i> , <i>gga-mir-451</i> , <i>gga-mir-144</i> , <i>FLOT2</i> , <i>PHF12</i> , <i>SEZ6</i> , <i>PIPOX</i> , <i>MYO18A</i> , <i>CRYBA1</i> , <i>NUFIP2</i> , <i>TAOK1</i> , <i>GIT1</i> , <i>ANKRD13B</i> , <i>CORO6</i> , <i>SSH2</i> , <i>EFCAB5</i> , <i>NSRP1</i> , <i>SLC6A4</i> , <i>BLMH</i> , <i>TMIGD1</i> , <i>CPD</i>
20	Gga_rs14276515	8463752	<i>MRGBP</i> , <i>OGFR</i> , <i>COL9A3</i> , <i>TCFL5</i> , <i>DIDO1</i> , <i>gga-mir-6681</i> , <i>GID8</i> , <i>SLC17A9</i> , <i>gga-mir-6567</i> , <i>BHLHE23</i> , <i>gga-mir-1746</i>
20	Gga_rs15175708	8433471	<i>MRGBP</i> , <i>OGFR</i> , <i>COL9A3</i> , <i>TCFL5</i> , <i>DIDO1</i> , <i>gga-mir-6681</i> , <i>GID8</i> , <i>SLC17A9</i> , <i>gga-mir-6567</i> , <i>BHLHE23</i>
20	GGaluGA179133	8487502	<i>MRGBP</i> , <i>OGFR</i> , <i>COL9A3</i> , <i>TCFL5</i> , <i>DIDO1</i> , <i>gga-mir-6681</i> , <i>GID8</i> , <i>SLC17A9</i> , <i>gga-mir-6567</i> , BHLHE23* , <i>gga-mir-1746</i>
28	Gga_rs15249589	1540725	<i>GNA11</i> , <i>SIPR4</i> , <i>NCLN</i> , <i>CELF5</i> , <i>HSD11B1L</i> , <i>MICOS13</i> , <i>gga-mir-1774</i> , <i>FSD1</i> , <i>YJU2</i> , <i>gga-mir-6593</i> , <i>ZBTB7A</i> , PIAS4* , <i>EEF2</i> , <i>gga-mir-1434</i> , <i>NMRK2</i> , <i>ATCAY</i> , <i>NRTN</i> , <i>DUS3L</i> , <i>LARP6L</i> , <i>RFX2</i>
28	GGaluGA000771	3530918	<i>ADAMTSL5</i> , <i>THOP1</i> , <i>SGTA</i> , <i>SLC39A3</i> , <i>DIRAS1</i> , <i>GADD45B</i> , <i>MAP1S</i> , <i>FCHO1</i> , <i>B3GNT3</i> , <i>JAK3</i> , <i>SLC5A5</i> , <i>KCNN1</i> , <i>OCN</i> , <i>NR2F6</i> , <i>ANKLE1</i> , <i>ABHD8</i> , <i>MRPL34</i> , <i>DDA1</i> , <i>ANO8</i> , <i>GTPBP3</i> , <i>CILP2</i> , <i>NDUFA13</i> , <i>GATAD2A</i> , <i>MAU2</i> , <i>SUGP1</i> , <i>TM6SF2</i> , <i>HAPLN4</i> , <i>NCAN</i> , <i>NR2C2AP</i> , <i>RFXANK</i> , <i>BORCS8</i> , <i>gga-mir-1621</i> , <i>gga-mir-9-1</i>
28	GGaluGA201366	1779855	<i>ATCAY</i> , <i>NRTN</i> , <i>DUS3L</i> , <i>LARP6L</i> , <i>RFX2</i> , <i>ACSBG2</i> , MLLT1* , <i>ACER1</i> , <i>ANP32B</i> , <i>ZNF414</i> , <i>MYO1F</i> , <i>ADAMTS10</i> , <i>gga-mir-6615</i> , <i>ZAP70</i>

Примечание: CHR – номер хромосомы; $\pm 0,2\text{Mb}$ – гены, локализованные на расстоянии 200 000 пар оснований (п.о.) от позиции выявленных SNP; * – гены, локализованные в позиции выявленных SNP

Note: CHR – chromosome number; $\pm 0.2\text{Mb}$ – genes localized at a distance of 200,000 base pairs (bp) from the position of the identified SNPs; * – genes that are localized in the positions of the identified SNPs

Обсуждение полученных результатов.

Идентификация и картирование генов, детерминирующих проявление селекционно-значимых признаков у сельскохозяйственных птицы, является одной из ключевых задач геномной селекции, направленной на повышение эффективности птицеводства. В нашем исследовании изучены показатели цветовых характеристик мяса грудки и бедренной части у кур F2 ресурсной популяции. С учётом того, что в промышленном птицеводстве выращивание бройлеров на мясо проводят до возраста 42-63 дней, оценку показателей цвета мяса у кур исследуемой ресурсной популяции осуществляли в возрасте 42 дней.

Цвет мяса – важный показатель, определяющий товарные качества и потребительский спрос на мясо птицы. Данный показатель в определённой мере зависит от условий кормления и содержания птицы и является генетически детерминированным множеством QTL. Проведённые полногеномные ассоциативные исследования выявили достоверно значимые SNP и гены-кандидаты ($P \leq 0,0001$), ассоциированные с показателями цвета мяса у кур F2 ресурсной популяции,

в частности, с цветовыми характеристиками грудной мышцы – 12 SNP и 3 гена-кандидата (*BRAF*, *ENO2*, *RGS6*), с цветом мяса бедренной части – 18 SNP и 7 генов-кандидатов (*UBE3D*, *ATP13A3*, *RHBDD1*, *MB21D2*, *BHLHE23*, *PIAS4*, *MLLT1*).

Идентифицированные гены-кандидаты отвечают за биологический функционал организма, среди которых есть гомеостаз жирных кислот, биохимических процессов, врождённый иммунный ответ, развитие многоклеточных организмов и их органов, включая развитие ЦНС. Как известно, влияние на ЦНС, а именно – стресс сильно влияет на органолептические показатели мяса, поэтому развитие нервной системы играет немаловажную роль в формировании цветовых спектров мяса.

Поиск и анализ информационных источников показал, что из 10 выявленных в нашем исследовании генов-кандидатов для 1 гена – *ENO2* – была установлена его связь с цветом грудной мышцы (спектр L^*) у бычков породы нелор (Marín-Garzón NA et al., 2021). Для трёх установленных в нашем исследовании генов – *MB21D2*, *PIAS4* и *MLLT1* – была представлена их связь с показателями роста сельскохозяйственных животных и птицы. В частности, выявлены ассоциации гена *MB21D2* со среднесуточным приростом (Niu Q et al., 2021) и массой внутренних органов (An B et al., 2018) у крупного рогатого скота, гена *PIAS4* – с метаболизмом кур (Tian J et al., 2023), генов *PIAS4* и *MLLT1* – с живой массой кур в возрасте 42 и 63 дней (Volkova NA et al., 2024). Были установлены ассоциации гена *MB21D2* с иммунным ответом при вакцинации у кур (Walugembe M et al., 2019).

Таким образом, анализ открытых информационных источников подтвердил полученные нами данные о влиянии на цветовые характеристики мяса гена *ENO2*. Для других выявленных в нашей работе генов в ряде исследований показана их связь с селекционно-значимыми признаками у сельскохозяйственных животных и птицы. Для подтверждения влияния данных генов-кандидатов на цветовые характеристики мяса кур требуется проведение дальнейших исследований.

Заключение.

Выявлены достоверно значимые SNP ($P \leq 0,0001$), ассоциированные с цветом мяса у кур F2 ресурсной популяции в возрасте 42 недель. Установлено 12 значимых SNP, связанных с цветовыми характеристиками грудной мышцы и 18 SNP, ассоциированные с показателями цвета бедренной части. В области данных SNP идентифицировано 214 генов-кандидатов, в том числе 10 генов в позициях данных SNP – *BRAF*, *ENO2*, *UBE3D*, *RGS6*, *ATP13A3*, *RHBDD1*, *MB21D2*, *BHLHE23*, *PIAS4*, *MLLT1*, локализованные на хромосомах GGA1, GGA3, GGA5, GGA9, GGA20 и GGA28.

Полученные результаты имеют практическое значение для понимания молекулярно-генетических механизмов формирования и проявления признаков, определяющих цветовые характеристики мяса кур и могут быть использованы для дальнейшего изучения генетических маркеров, связанных с качественными характеристиками мяса кур, что позволит повысить и улучшить показатели качества мяса.

Список источников

1. ГОСТ Р 52837-2007. Птица сельскохозяйственная для убоя. Технические условия. Введ. 01.01.2009. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с. [GOST R 52837-2007. Ptica sel'skohozyajstvennaya dlya uboya. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 01.01.2009. Moscow: Standartinform; 2008:5 p. (In Russ.)].
2. Гречкина В.В., Лебедев С.В. Влияние Цамакса и Ветома на биохимические показатели крови и содержание минеральных веществ в организме цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 2. С. 118-129. [Grechkina VV, Lebedev SV. The effect of Tsamax and Vetom on the biochemical parameters of blood and the mineral content in the body of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(2):118-129. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-2-118>
3. Дорохин Н.А. Качественные характеристики мяса цыплят-бройлеров и факторы, влияющие на них: обзор // Сельскохозяйственный журнал. 2020. № 5(13). С. 59-64. [Dorokhin NA. Quality

characteristics of broiler chicken meat and their influencing factors: an overview. *Agricultural Journal*. 2020;5(13):59-64. (*In Russ.*).

4. Влияние биоминерального комплекса на рост, продуктивные качества цыплят-бройлеров / Р.А. Тузиков, С.В. Лебедев, М.С. Аринжанова, Е.В. Шейда // *Животноводство и кормопроизводство*. 2023. Т. 106. № 3. С. 138-147. [Tuzikov RA, Lebedev SV, Arinzhanova MS, Sheida EV. The influence of biomineral complex on the growth, productive traits in broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(3):138-147. (*In Russ.*). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-138>

5. Полногеномные ассоциативные исследования качества мяса по показателям цвета грудки у кур (*Gallus gallus* L.) / А.Н. Ветох, А.Ю. Джагаев, А.А. Белоус, Н.А. Волкова, Н.А. Зиновьева // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58. № 6. С. 1068-1078. [Vetokh AN, Dzhagaev AYU, Belous AA, Volkova NA, Zinovieva NA. Genome-wide association studies of chicken (*Gallus gallus* L.) breast meat color characteristics. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. 2023;58(6):1068-1078. (*In Russ.*). doi: 10.15389/agrobiology.2023.6.1068rus doi: 10.15389/agrobiology.2023.6.1068eng

6. Полногеномные ассоциативные исследования цветовых характеристик мяса кур / Н.А. Волкова, А.Н. Ветох, А.А. Белоус, Н.А. Зиновьева // *Ветеринария и кормление*. 2024. № 5. С. 22-26. [Volkova NA, Vetokh AN, Belous AA, Zinovieva NA. Genome-wide association studies of color characteristics of chicken meat. *Veterinaria i kormlenie*. 2024;5:22-26. (*In Russ.*). doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-5-5

7. Технологические свойства охлаждённой говядины различных цветовых классов / И.В. Козырев, Т.М. Миттельштейн, В.А. Пчелкина, А.Б. Лисицын // *Теория и практика переработки мяса*. 2017. Т. 2. № 2. С. 60-68. [Kozyrev IV, Mittelstein TM, Pchelkina VA, Lisitsyn AB. Technological properties of chilled beef of various color classes. *Theory and practice of meat processing*. 2017;2(2):60-68. (*In Russ.*). doi: 10.21323/2414-438X-2017-2-2-60-68

8. Allais S, Hennequet-Antier C, Berri C, Salles L, Demeure O, Le Bihan-Duval E. Mapping of QTL for chicken body weight, carcass composition, and meat quality traits in a slow-growing line. *Poultry Science*. 2019;98(5):1960-1967. doi: 10.3382/ps/pey549

9. Alnahhas N, Berr C, Chabault M, et al. Genetic parameters of white striping in relation to body weight, carcass composition, and meat quality traits in two broiler lines divergently selected for the ultimate pH of the pectoralis major muscle. *BMC Genet*. 2016;17:61. doi: 10.1186/s12863-016-0369-2

10. An B, Xia J, Chang T, Wang X, Miao J, Xu L, Zhang L, Gao X, Chen Y, Li J, et al. Genome-wide association study identifies loci and candidate genes for internal organ weights in Simmental beef cattle. *Physiological Genomics*. 2018;50(7):523-531. doi: 10.1152/physiolgenomics.00022.2018

11. Bowker B. Chapter 4 - Developments in our understanding of water-holding capacity. In: Petracci M, Berri C, editors. *Poultry Quality Evaluation*. Woodhead Publishing; 2017:77-113. doi: 10.1016/B978-0-08-100763-1.00004-0

12. Che S, Susta L, Barbut S. Effects of broiler chilling methods on the occurrence of pale, soft, exudative (PSE) meat and comparison of detection methods for PSE meat using traditional and Nix colorimeters. *Poultry Science*. 2023;102(10):102907. doi: 10.1016/j.psj.2023.102907

13. Karunanayaka DS, Jayasena DD, Jo C. Prevalence of pale, soft, and exudative (PSE) condition in chicken meat used for commercial meat processing and its effect on roasted chicken breast. *Journal of Animal Science Technology*. 2016;58:27. doi: 10.1186/s40781-016-0110-8

14. Kudryashova OA, Kudryashov LS. Influence of preslaughter stress on poultry meat. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2022;7(1):30-34. doi: 10.21323/2414-438X-2022-7-1-30-34

15. Marín-Garzón NA, Magalhães AFB, Mota LFM, Fonseca LFS, Chardulo LAL, Albuquerque LG. Genome-wide association study identified genomic regions and putative candidate genes affecting meat color traits in Nellore cattle. *Meat Science*. 2021;171:108288. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108288

16. Mashood Q, Karlsson A H, Wallenbeck A, Eriksson S, Johansson AM, Segerkvist KA. A review on pale, soft, and exudative (PSE)-like zones in pork: current knowledge on underlying factors and identification of knowledge gaps for further research. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*. 2023;1-10. doi: 10.1080/09064702.2023.2279079

17. Mir NA, Rafiq A, Kumar F, et al. Determinants of broiler chicken meat quality and factors affecting them: a review. *Journal of Food Science Technology*. 2017;54:2997-3009. doi: 10.1007/s13197-017-2789-z
18. Niu Q, Zhang T, Xu L, Wang T, Wang Z, Zhu B, Zhang L, Gao H, Song J, Li J, Xu L. Integration of selection signatures and multi-trait GWAS reveals polygenic genetic architecture of carcass traits in beef cattle. *Genomics*. 2021; 113(5):3325-3336. doi: 10.1016/j.ygeno.2021.07.025
19. Tian J, Zhu X, Wu H, Wang Y, Hu X. Serum metabolic profile and metabolome genome-wide association study in chicken. *Journal of Animal Science Biotechnology*. 2023;14(1):69. doi: 10.1186/s40104-023-00868-7
20. Török Á, Yeh CH, Menozzi D, et al. Consumers' preferences for processed meat: a best–worst scaling approach in three European countries. *Agricultural and Food Economics* 2023;11:33 doi: 10.1186/s40100-023-00277-4
21. Turner SD. QQman: an R package for visualizing GWAS results using Q-Q and Manhattan plots. *The Journal of Open Source Software*. 2018;3(25):731. doi: 10.21105/joss.00731
22. Volkova NA, Romanov MN, Vetokh AN, Larionova PV, Volkova LA, Abdelmanova AS, Sermyagin AA, Griffin DK, Zinovieva NA. Genome-wide association study reveals the genetic architecture of growth and meat production traits in a chicken F₂ resource population. *Genes*. 2024;15(10):1246. doi: 10.3390/genes15101246
23. Walugembe M, Mushi JR, Amuzu-Aweh EN, Chiwanga GH, Msoffe PL, Wang Y, Saelao P, Kelly T, Gallardo RA, Zhou H, Lamont SJ, Muhairwa AP, Dekkers JCM. Genetic analyses of tanzanian local chicken ecotypes challenged with newcastle disease virus. *Genes (Basel)*. 2019;10(7):546. doi: 10.3390/genes10070546

References

1. State Standard R 52837-2007. Slaughter poultry. Specifications approved. Implementation date 01.01.2009. Moscow: Standartinform; 2008:5 p.
2. Grechkina VV, Lebedev SV. The effect of Tsamax and Vetom on the biochemical parameters of blood and the mineral content in the body of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(2):118-129. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-2-118>
3. Dorokhin NA. Quality characteristics of broiler chicken meat and their influencing factors: an overview. *Agricultural Journal*. 2020;5(13):59-64.
4. Tuzikov RA, Lebedev SV, Arinzhanova MS, Sheida EV. The influence of biomineral complex on the growth, productive traits in broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(3):138-147. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-138>
5. Vetokh AN, Dzhagaev AY, Belous AA, Volkova NA, Zinovieva NA. Genome-wide association studies of chicken (*Gallus gallus* L.) breast meat color characteristics. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. 2023;58(6):1068-1078. doi: 10.15389/agrobiology.2023.6.1068eng
6. Volkova NA, Vetokh AN, Belous AA, Zinovieva NA. Genome-wide association studies of color characteristics of chicken meat. *Veterinary Medicine and Feeding*. 2024;5:22-26. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-5-5
7. Kozyrev IV, Mittelstein TM, Pchelkina VA, Lisitsyn AB. Technological properties of chilled beef of various color classes. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2017;2(2):60-68. doi: 10.21323/2414-438X-2017-2-2-60-68
8. Allais S, Hennequet-Antier C, Berri C, Salles L, Demeure O, Le Bihan-Duval E. Mapping of QTL for chicken body weight, carcass composition, and meat quality traits in a slow-growing line. *Poultry Science*. 2019;98(5):1960-1967. doi: 10.3382/ps/pey549
9. Alnahhas N, Berr C, Chabault M, et al. Genetic parameters of white striping in relation to body weight, carcass composition, and meat quality traits in two broiler lines divergently selected for the ultimate pH of the pectoralis major muscle. *BMC Genet*. 2016;17:61. doi: 10.1186/s12863-016-0369-2

10. An B, Xia J, Chang T, Wang X, Miao J, Xu L, Zhang L, Gao X, Chen Y, Li J, et al. Genome-wide association study identifies loci and candidate genes for internal organ weights in Simmental beef cattle. *Physiological Genomics*. 2018;50(7):523-531. doi: 10.1152/physiolgenomics.00022.2018
11. Bowker B. Chapter 4 - Developments in our understanding of water-holding capacity. In: Petracci M, Berri C, editors. *Poultry Quality Evaluation*. Woodhead Publishing; 2017:77-113. doi: 10.1016/B978-0-08-100763-1.00004-0
12. Che S, Susta L, Barbut S. Effects of broiler chilling methods on the occurrence of pale, soft, exudative (PSE) meat and comparison of detection methods for PSE meat using traditional and Nix colorimeters. *Poultry Science*. 2023;102(10):102907. doi: 10.1016/j.psj.2023.102907
13. Karunanayaka DS, Jayasena DD, Jo C. Prevalence of pale, soft, and exudative (PSE) condition in chicken meat used for commercial meat processing and its effect on roasted chicken breast. *Journal of Animal Science Technology*. 2016;58:27. doi: 10.1186/s40781-016-0110-8
14. Kudryashova OA, Kudryashov LS. Influence of preslaughter stress on poultry meat. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2022;7(1):30-34. doi: 10.21323/2414-438X-2022-7-1-30-34
15. Marín-Garzón NA, Magalhães AFB, Mota LFM, Fonseca LFS, Chardulo LAL, Albuquerque LG. Genome-wide association study identified genomic regions and putative candidate genes affecting meat color traits in Nellore cattle. *Meat Science*. 2021;171:108288. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108288
16. Mashood Q, Karlsson A H, Wallenbeck A, Eriksson S, Johansson AM, Segerkvist KA. A review on pale, soft, and exudative (PSE)-like zones in pork: current knowledge on underlying factors and identification of knowledge gaps for further research. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*. 2023;1-10. doi: 10.1080/09064702.2023.2279079
17. Mir NA, Rafiq A, Kumar F, et al. Determinants of broiler chicken meat quality and factors affecting them: a review. *Journal of Food Science Technology*. 2017;54:2997-3009. doi: 10.1007/s13197-017-2789-z
18. Niu Q, Zhang T, Xu L, Wang T, Wang Z, Zhu B, Zhang L, Gao H, Song J, Li J, Xu L. Integration of selection signatures and multi-trait GWAS reveals polygenic genetic architecture of carcass traits in beef cattle. *Genomics*. 2021; 113(5):3325-3336. doi: 10.1016/j.ygeno.2021.07.025
19. Tian J, Zhu X, Wu H, Wang Y, Hu X. Serum metabolic profile and metabolome genome-wide association study in chicken. *Journal of Animal Science Biotechnology*. 2023;14(1):69. doi: 10.1186/s40104-023-00868-7
20. Török Á, Yeh CH, Menozzi D, et al. Consumers' preferences for processed meat: a best-worst scaling approach in three European countries. *Agricultural and Food Economics* 2023;11:33 doi: 10.1186/s40100-023-00277-4
21. Turner SD. QQman: an R package for visualizing GWAS results using Q-Q and Manhattan plots. *The Journal of Open Source Software*. 2018;3(25):731. doi: 10.21105/joss.00731
22. Volkova NA, Romanov MN, Vetokh AN, Larionova PV, Volkova LA, Abdelmanova AS, Sermyagin AA, Griffin DK, Zinovieva NA. Genome-wide association study reveals the genetic architecture of growth and meat production traits in a chicken F₂ resource population. *Genes*. 2024;15(10):1246. doi: 10.3390/genes15101246
23. Walugembe M, Mushi JR, Amuzu-Aweh EN, Chiwanga GH, Msoffe PL, Wang Y, Saelao P, Kelly T, Gallardo RA, Zhou H, Lamont SJ, Muhairwa AP, Dekkers JCM. Genetic analyses of tanzanian local chicken ecotypes challenged with newcastle disease virus. *Genes (Basel)*. 2019;10(7):546. doi: 10.3390/genes10070546

Информация об авторах:

Анастасия Николаевна Ветох, научный сотрудник лаборатории клеточной инженерии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, г.о. Подольск, п. Дубровицы д. 60, тел.: +7 (4967) 65-11-63.

Наталья Александровна Волкова, доктор биологических наук, профессор РАН, руководитель лаборатории клеточной инженерии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, г.о. Подольск, п. Дубровицы д. 60, тел.: +7 (4967) 65-11-63.

Полина Валентиновна Ларионова, кандидат биологических наук, главный специалист лаборатории клеточной инженерии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: +7 (4967) 65-11-63.

Алан Юрьевич Джагаев, младший научный сотрудник лаборатории клеточной инженерии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: +7 (4967) 65-11-63.

Александра Сергеевна Абдельманова, доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональной и эволюционной геномики животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: +7 (4967) 65-11-63.

Наталья Анатольевна Зиновьева, доктор биологических наук, академик РАН, директор, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: +7 (4967) 65-11-63.

Information about the authors:

Anastasia N Vetokh, Researcher Of The Cell Engineering Laboratory, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-63.

Natalia A Volkova, Dr. Sci (Biology), Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the the cell engineering laboratory, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-63.

Polina V Larionova, Cand. Sci (Biology), Main Expert Of The Cell Engineering Laboratory, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-63.

Alan Yu Dzhagaev, Junior Researcher Of The Cell Engineering Laboratory, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-63.

Alexandra S Abdelmanova, Dr. Sci (Biology), senior researcher in the laboratory of functional and evolutionary genomics of animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-63.

Natalia A Zinovieva, Dr. Sci (Biology), Academician of Russian Academy of Sciences, Director, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +7 (4967) 65-11-63.

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; одобрена после рецензирования 26.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 01.10.2024; approved after reviewing 26.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 106-119.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 106-119.

Научная статья
УДК 639.3.03
doi:10.33284/2658-3135-107-4-106

Определение достоверности происхождения сибирского осетра на основе результатов микросателлитного анализа и коэффициентов генетического сходства

Николай Владимирович Бардуков¹, Амина Кумаровна Никипелова², Петр Ильич Отраднов³, Владислав Игоревич Никипелов⁴, Анна Александровна Белоус⁵

^{1,2,3,4,5}Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, Московская область, п. Дубровицы, Россия

¹bardukv-nikolaj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5497-2409>

²nikipelova_aminavij@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8248-7555>

³deriteronard@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1153-5815>

⁴vladnikipelovvij@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6411-2454>

⁵belousa663@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7533-4281>

Аннотация. В настоящем исследовании был разработан статистический подход к определению генетического сходства у тетраплоидных животных на примере сибирского осетра аквакультурного происхождения. Была определена целесообразность использования параметров генетического сходства для определения родственных отношений, в частности, для установления материнского и отцовского происхождения особей. По результатам анализа 7-ми микросателлитных локусов были получены генетические профили родительской популяции и их потомков. В результате валидационного исследования было выявлено, что группы предковых особей определяются корректно в среднем в 95,39 % случаев при разбросе значений от 79,17 до 100 % в разных экспериментальных выборках. Созданный алгоритм не всегда позволяет со 100 % точностью соотнести родительских особей и потомков, но может выявить генетически близкие группы внутри стада. Таким образом, разработанный подход имеет ряд перспектив для применения как в генетических исследованиях, так и в селекционном процессе.

Ключевые слова: сибирский осетр, микросателлитные локусы, аллели, тетраплоиды, генетическое сходство, матрица родства

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2024 гг. ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (№ FGGN-2022-0007).

Выпажаем благодарность коллективу ООО РТФ «Лиана» за проведение серии экспериментальных скрещиваний, выполненных в целях данного исследования.

Для цитирования: Определение достоверности происхождения сибирского осетра на основе результатов микросателлитного анализа и коэффициентов генетического сходства / Н.В. Бардуков, А.К. Никипелова, П.И. Отраднов, В.И. Никипелов, А.А. Белоус // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 106-119. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-106>

Original article

Determining the reliability of the origin of Siberian sturgeon based on the results of microsatellite analysis and genetic similarity coefficients

Nikolai V Bardukov¹, Amina K Nikipelova², Petr I Otradnov³, Vladislav I Nikipelov⁴, Anna A Belous⁵

^{1,2,3,4,5}Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Dubrovitsy, Russia

¹bardukv-nikolaj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5497-2409>

²nikipelova_aminavij@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8248-7555>

³deriteronard@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1153-5815>

⁴vladnikipelovvij@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6411-2454>

⁵belousa663@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7533-4281>

Abstract. In the present study, a statistical approach to determining genetic similarity in tetraploid animals was developed using the example of aquacultured Siberian sturgeon. The feasibility of using genetic similarity parameters to determine kinship relations, in particular, to establish the maternal and pa-

ternal origin of individuals, was determined. Genetic profiles of the parental population and their offspring were obtained by analyzing 7 microsatellite loci. As a result of the validation study, it was revealed that the ancestral groups of individuals were correctly determined on average in 95.39% of cases with a range of values from 79.17 to 100% in different experimental samples. The created algorithm does not always allow to correlate parental individuals and descendants with 100% accuracy, but it can identify genetically close groups within the herd. Thus, the developed approach has a number of prospects for application both in genetic studies and in the breeding process.

Keywords: Siberian sturgeon, microsatellite loci, alleles, tetraploids, genetic similarity, kinship matrix

Acknowledgments: the work was carried out in accordance with the research plan for 2022-2024. FSBSI L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry (No. FGGN-2022-0007).

We express our gratitude to the staff of RTF “Diana” Ltd. for conducting a series of experimental crosses performed for the purposes of this study.

For citation: Bardukov NV, Nikipelova AK, Otradnov PI, Nikipelov VI, Belous AA. Determining the reliability of the origin of Siberian sturgeon based on the results of microsatellite analysis and genetic similarity coefficients. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):106-119. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-106>

Введение.

Сибирский осётр (*Acipenser baerii* Brandt, 1869) привлекает большое внимание в сфере коммерческой аквакультуры благодаря высоким адаптационным способностям к условиям содержания, таким как плотность посадки, кормление, гидрохимические показатели, а также его экономической ценности, связанной с производством чёрной икры и высококачественного мяса. За последние 70 лет естественные популяции сибирского осетра значительно сократились из-за антропогенного влияния, включая перекрытие и уничтожение основных мест нереста, что привело к включению вида в Красную книгу МСОП и запрету на промышленный и любительский вылов, за исключением научно-исследовательских целей (Ruban GI and Mugue NS, 2022). В настоящее время основным источником продукции сибирского осетра является товарное осетроводство. В 1981 году впервые было сформировано маточное стадо сибирского осетра Ленской популяции на Конаковском осетровом заводе (Малютин В.С. и Рубан Г.И., 2009). В течение многих лет предприятие считалось главным поставщиком маточного поголовья сибирского осетра в России. Товарным выращиванием сибирского осетра активно занимаются во многих странах (Россия, Китай, Франция, Италия и т. д.) (Bronzi P et al., 2011).

В последние десятилетия сибирский осётр стал модельным объектом исследований в области аквакультуры, что способствовало развитию эффективных методов разведения и улучшению его выращивания в индустриальных условиях.

Повышение продуктивности и адаптационных характеристик сибирского осетра, содержащегося в условиях аквакультуры, невозможно без проведения генетического тестирования, как это сейчас происходит во всех областях животноводства, где в этих целях активно применяют различные молекулярно-генетические маркеры, которые позволяют предоставить данные, способствующие оптимизации процессов разведения и улучшению генетического потенциала сельскохозяйственных животных (Акопян Н.А. и др., 2019; Абдельманова А.С. и др., 2021; Додохов В.В., 2024). Успех генетического анализа напрямую зависит от выбора ДНК-маркера. В данной работе мы рассмотрим микросателлитные маркеры как наиболее подходящие для решения общих селекционных задач.

Микросателлиты представляют собой повторяющиеся короткие генетические элементы (2-6 нуклеотидов), различия между которыми обусловлены в основном числом повторов (Edwards A et al., 1991). Одним из главных достоинств микросателлитов является их кодоминантность, что позволяет чётко различать гетерозиготных и гомозиготных особей. Кроме того, микросателлитные локусы характеризуются высокой частотой мутаций, чем обусловлено наличие множества аллелей

в одном локусе. Использование микросателлитного анализа основано на полимеразной цепной реакции (ПЦР), которая требует небольшого объёма ДНК и не требует высокого её качества (Webster MS and Reichart L, 2005).

В осетроводстве внедрение этих маркеров произошло относительно недавно в целях мониторинга выпуска рыб в естественные водоёмы, а также определения видовой принадлежности особей осетровых и идентификации межвидовых гибридных форм (Мюге Н.С. и Барминцева А.Е., 2020). Сложность микросателлитного анализа у сибирского осетра заключается в строении его генома. Сибирский осётр является функциональным тетраплоидным видом (4n) с ~245 хромосомами (Havelka M et al., 2013). Эта уникальная черта геномов осетровых создаёт серьёзные проблемы для выполнения статистических расчётов – чтобы корректно вычислить значения популяционно-генетических показателей, нужно либо учитывать дозу каждого аллеля, либо адаптировать методику статистических расчётов (Cui X et al., 2022).

Способ определения числа копий аллелей описан в научной литературе (Барминцева А.Е., 2018), однако, современное программное обеспечение для анализа микросателлитных профилей – программы GeneMarker и GeneMapper – не позволяют произвести автоматический сбор этих данных и тому есть объективные причины.

Для правильной интерпретации данных дозы аллелей необходимо вручную просматривать каждый локус. Соотношение высоты пиков в исследуемом на генетическом анализаторе ПЦР-продукте является основным, но не единственным критерием для определения числа гомологичных хромосом в геноме, которые несут тот или иной аллель. Высота этих пиков будет зависеть также и от длины амплифицируемых аллелей, а в случае мультиплексирования ПЦР ситуация усложнится ещё сильнее вследствие конкурирования нескольких пар праймеров – то есть алгоритмы автоматического определения дозового соотношения аллелей должны учитывать множество коэффициентов, которые могут быть уникальны для каждого локуса. Соответственно, практическая реализация корректно работающей автоматической системы учёта весьма затруднительна. По этой причине получили развитие статистические методы, позволяющие работать с таблицами полиплоидных генотипов, заведомо содержащих неполную информацию – данные о дозах аллелей игнорируются за исключением гомозиготных вариантов и полных гетерозигот, где соотношение аллелей очевидно. Применение этого статистического подхода позволяет в достаточной степени автоматизировать процесс учёта генетических профилей и вполне объективно рассчитать основные популяционно-генетические показатели, такие как коэффициент инбридинга, генетическое разнообразие, генетические расстояния между группами. Для работы с таблицами аллелей, организованными по принципу игнорирования эффекта их дозы к настоящему моменту разработано множество программ и пакетов, таких как TETRASAT (Markwith SH et al., 2006), SPAGeDi (Hardy OJ and Vekemans X, 2002), R-пакет Polysat (Clark LV and Jasieniuk M, 2011), STRUCTURE (Pritchard JK et al., 2000).

Однако при возникновении задачи выявления родства – соотнесения профилей родителей и потомков, отсутствие информации о дозе аллелей сравниваемых представителей полиплоидных организмов может существенно усложнить её решение. С такой проблемой могут столкнуться селекционеры на осетровых заводах, на которых введена схема получения потомства, подразумевающая использование икры нескольких самок и оплодотворение её несколькими самцами. Данная практика позволяет повысить процент оплодотворения икры, но при этом невозможно соотнести родителей и потомков, что является важным аспектом селекционной работы, ключевым подходом которой служит оценка качества производителей по показателям их потомков.

Цель исследования.

Разработка и апробация метода выявления родственных взаимоотношений у тетраплоидных животных с помощью индивидуальных профилей микросателлитных маркеров, учитывающих дозу каждого аллеля на примере domestичированного сибирского осетра ленской популяции.

Материал и методы исследования.

Объект исследования. Сибирский осётр ленской популяции заводского происхождения.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Для определения точности расчёта родства родительских групп сибирского осетра, и их потомков, в общем количестве 200 особей, из них 14 производителей и 186 потомков, была проведена серия экспериментальных скрещиваний – для каждой группы потомков были известны родительские особи, от которых получали половые продукты. В шести группах оплодотворение икры проводили по стандартной схеме (смешивали половые продукты нескольких производителей). В последней, контрольной, седьмой группе потомство было получено исключительно от одной самки и одного самца. Характеристики экспериментальных групп представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика экспериментальных групп
 Table 1. Characteristics of experimental groups

№ группы / No group	Производители (№ по базе данных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ) / Sires (No in the data base of FSBSI FRC AH)	Количество те- стируемых по- томков / Number of progeny tested	Год полуече- ния / Year of receipt
1	♀2774, ♂2773, ♂2776, ♂2781	24	2024
2	♀2774, ♂2772, ♂2782, ♂2779	24	2024
3	♀2777, ♂2773, ♂2775, ♂2781	24	2024
4	♀2783, ♂2773, ♂2775, ♂2779	24	2024
5	♀2780, ♂2775, ♂2779, ♂2781, ♂2782	24	2024
6	♀2778, ♂2772, ♂2776, ♂2781	24	2024
7	♀2366, ♂2367	42	2023
Общее количе- ство / Total number	14	186	2023-2024

Оплодотворенную икру инкубировали в аппаратах Вейса, личинку отбирали сразу после выклева и фиксировали в спирте. Эта работа была выполнена на базе ООО РТФ «Диана» Вологодская область, Кадуйский район, рабочий поселок Кадуй. ДНК выделяли с помощью коммерческого набора «ДНК-ЭКСТРАН-2» (НПК «Синтол») согласно методике фирмы-производителя. В качестве материала для выделения ДНК использовали срез плавниковой ткани (у рыб-производителей) либо хвостовую часть (личинка). Генетический анализ производителей и потомков был выполнен при помощи следующих STR-маркеров: Agu38, An20, Aru18, Ls19, Ag49a, Agu37, Agu41 (Georgescu S et al., 2013; Kohlmann K et al., 2017; Kohlmann K et al., 2018; Zane L et al., 2002). Температурно-временные режимы и общая методика ПЦР представлены в ранее опубликованной работе (Бардуков Н.В. и др., 2023).

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы центра коллективного пользования научным оборудованием «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных» ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Фрагментный анализ выполняли на генетическом анализаторе НАНОФОР (НПК «Синтол», Россия). Дозу каждого аллеля тетраплоидных микросателлитных локусов определяли по методике, описанной в диссертаци-

онной работе Барминцевой А.Е. (Бардуков Н.В. и др., 2024), а также в методических рекомендациях по проведению молекулярно-генетической экспертизы племенного материала сибирского осетра (*Acipenser baerii*), разводимого в товарной аквакультуре (Барминцева А.Е., 2018). Результаты фрагментного анализа обрабатывали в программе GeneMarker (Version 3.0.1). Для обработки сформированных таблиц индивидуальных генетических профилей особей было разработано программное средство в виде R-скрипта, определяющее степень их генетического сходства (Заявка на патент № 2024669684). В рамках исследования реализованный подход тестировался на возможность определения происхождения тетраплоидных животных. Для создания программного кода использовался язык программирования R версии 4.4.0 (R Core Team, 2024) и среда разработки RStudio версии 2024.04.2+764 "Chocolate Cosmos". В рамках разработанного кода используются вспомогательные библиотеки corrplot, reshape2 и data.table.

Статистическая обработка. В основе работы программного модуля лежит формула, предполагающая определение количества совпадающих элементов, например, аллельных вариантов, в рамках каждого интервала (микросателлитного локуса) между всеми возможными парами особей:

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{c_{общ.}}{c} \right)}{m},$$

где i – пара особей, для которых определяется генетическое сходство,

m – количество микросателлитных локусов,

j – номер микросателлитного локуса,

$c_{общ.}$ – сумма совпадающих аллельных вариантов,

c – сумма длин интервалов (4 позиции аллеля у каждой особи, т. е. $c=8$ в данном исследовании).

Так, например, если предположить сравнение пары особей по двум микросателлитным локусам, то по локусу А скрипт обнаружит общий для обеих особей элемент «110», а по локусу В – общие элементы «112» и «120» (табл. 2).

Таблица 2. Пример таблицы микросателлитных профилей для пары особей
Table 2. Example of a table of microsatellite profiles for a pair of individuals

Номер особи / Individual number	Локус А / Loci A				Локус В / Loci B			
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
1	110	110	120	130	112	114	114	120
2	110	112	110	114	120	120	112	112

Таким образом, для рассматриваемой экспериментальной пары особей формула будет иметь вид:

$$k = \frac{\frac{4}{8} + \frac{6}{8}}{2} = 0,625$$

Подобное сравнение производилось для всех возможных пар особей в выборке, формируя в качестве промежуточных данных матрицу родства

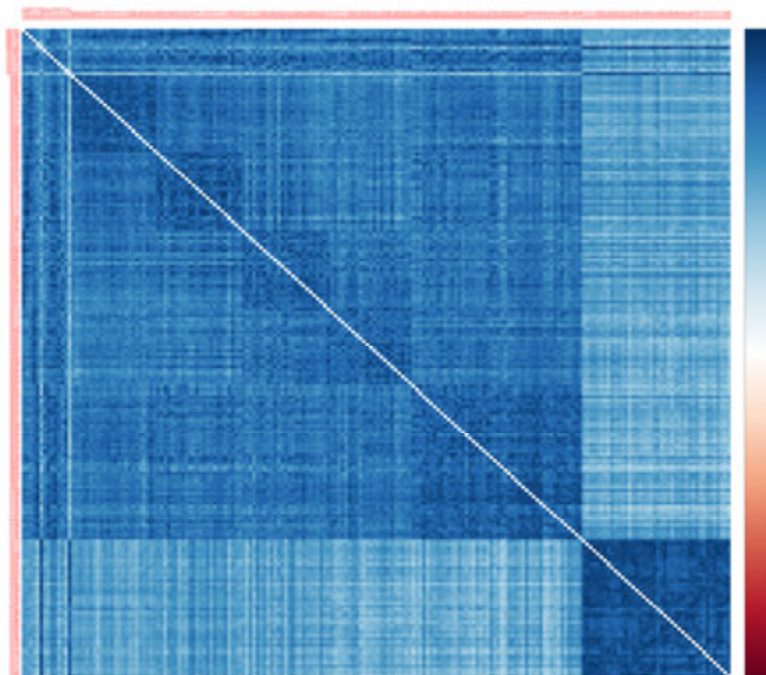
$$n \times n,$$

где n – количество образцов (особей) в обрабатываемой таблице.

Принципиальным моментом в подготовке первичных данных было введение меток для образцов, являющихся предками женского пола, предками мужского пола и потомками. Таким образом, при дальнейшем сопоставлении полученных результатов исключались случаи, в которых в качестве особей-предков женского и мужского пола могла определиться одна и та же.

Результаты исследования.

Посредством разработанного программного кода были обработаны данные микросателлитного анализа двухсот особей сибирского осетра – 14 производителей и 186 их потомков. В результате была получена матрица генетического сходства между проанализированными образцами, визуализированная в виде тепловой карты (рис. 1).



Примечание: ¹белый цвет – генетическое сходство равно 0, синий цвет – генетическое сходство равно 1; ²В первом визуальном различимом кластере (первые сверху строки и слева – столбцы) представлены особи-предки, все остальные – потомки

Note: ¹White colour – genetic similarity equals 0, blue colour – genetic similarity equals 1; ²The first visually distinguishable cluster (first rows from the top and columns from the left) represents ancestor individuals, all others are descendants

Рисунок 1. Тепловая карта¹ сходства особей² в исследованном массиве

Figure 1. Heat map¹ of the similarity of individuals² in the studied array

Рассматривая тепловую плеяду, можно заметить, что значения генетического сходства, полученные при попарном сравнении аллельных профилей протестированных образцов, хоть и формируют выраженные кластеры происхождения, которые можно наблюдать возле диагонали, тем не менее, насыщены статистическими шумами, чреватыми ложными результатами. Исходя из этого, было произведено нормирование полученных результатов в два этапа:

- на первом этапе из значений сходства каждой пары особей вычиталось среднее значение сходства по всему массиву,
- на втором этапе отрицательные значения коэффициента сходства приводились к нулю.

Нормирование по обозначенной процедуре позволило снизить статистические шумы, связанные со сходством особей между различными наблюдаемыми кластерами. Тепловая карта демонстрирует большую их выраженность, что позволяет, в первом приближении, судить о возможности применения разработанного подхода для определения происхождения особей. Результат, визуализированный в виде тепловой карты, представлен на рисунке 2.



Рисунок 2. Тепловая карта нормированного сходства особей в массиве
 Figure 2. Heat map of normalized similarity of individuals in the array

Финальным этапом, заложенным в функционал программного манускрипта, являлось формирование родословной в виде таблицы, состоящей из трёх столбцов: 1 – идентификатор потомка (столбец «offspring»), 2 – идентификатор женского предка («mother»), 3 – идентификатор мужского предка («father»). В выходных данных применялись англоязычные названия во избежание проблем кодировок, возникновение которых обычно связано с использованием кириллицы.

Для верификации, полученной в результате родословной, производилось сравнение с данными первичного учёта происхождения. Итогом верификации являлся показатель точности соотнесения особи-потомка к экспериментальной родительской группе, от которой он произошёл. Точность определялась по формуле:

$$Rel_G = \frac{n_{совп.}}{n},$$

где G – пол предка,

$n_{совп.}$ – количество предков пола G , совпавших с данными первичного учёта,

n – количество тестируемых потомков в группе.

В результате верификации полученной родословной была определена точность применённого подхода в отношении задачи выявления происхождения. Основные показатели представлены в таблице 3.

Верификация соотнесения потомков и родительских групп (от 2 до 5 производителей в каждой группе в зависимости от номера эксперимента, произведённого на основе обработки таблицы микросателлитных профилей, демонстрирует варьирующую результативность исследуемого подхода (табл. 3). Так, матери определялись в среднем с точностью в 95,39 % при разбросе значений в зависимости от группы от 79,17 до 100 %. Точность определения отцовского предка была ниже, чем определения материнского – при среднем значении в 87,01 % варьировала от 62,50 до 97,62 %. Но результаты превысили 50 % достоверности, в связи с чем, можно говорить о верности разработанного программного механизма.

Таблица 3. Результаты проведённого эксперимента
 Table 3. Results of the conducted experiment

№ группы / No group	Производители (№ по базе данных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ) / Sires (No in the data base of FSBSI FRC AH)	Количество тестируемых потомков / Number of progeny tested	Точность опре- деления, % / Accuracy of de- termination, %	
			женские предки / Female ancestors	мужские предки / Male ancestors
1	♀2774, ♂2773, ♂2776, ♂2781	24	95,83	95,83
2	♀2774, ♂2772, ♂2782, ♂2779	24	79,17	62,50
3	♀2777, ♂2773, ♂2775, ♂2781	24	100,00	79,17
4	♀2783, ♂2773, ♂2775, ♂2779	24	91,67	87,50
5	♀2780, ♂2775, ♂2779, ♂2781, ♂2782	24	91,67	87,50
6	♀2778, ♂2772, ♂2776, ♂2781	24	83,33	70,83
7	♀2366, ♂2367	42	100,00	97,62
Общее коли- чество / Total number	14	186	95,39	87,01

На следующем этапе была произведена проверка эффективности работы разработанного скрипта в качестве инструмента определения родительских пар для каждого потомка. Контрольное тестирование происходило по следующей схеме: профиль потомка, включающий информацию об аллелях семи микросателлитных локусов (с учётом дозы эффекта каждого аллеля) сравнивали с аналогичными профилями возможных родителей вручную. Для подтверждения происхождения особи от пары конкретных производителей исходили из правила, что по каждому из 7-ми локусов набор аллелей потомка обязательно должен состоять из двух аллелей матери и двух аллелей отца. При соблюдении этого условия происхождение подтверждалось.

Сравнение данным способом выполнили на экспериментальных группах № 1 и 2, показавших существенную разницу в степени достоверности соотнесения потомков с родительскими группами. Были получены следующие результаты. В экспериментальной группе № 1 в 87,5 % родительские пары были определены корректно, в то время как в группе № 2 только 45,8 % пар прошли проверку. Классическим сравнением микросателлитных профилей удалось установить родительские пары в 79,2 % в 1-й группе и в 87,5 % – во 2-й. Соответственно, для нескольких потомков однозначно определить родительские пары не удалось из-за близкого родства производителей, благодаря которому их генетические профили содержали высокий процент идентичных сочетаний аллелей. Второй причиной были вероятные ошибки в определении длин аллелей у некоторых особей-потомков.

Обсуждение полученных результатов.

В целом, традиционный способ работы с микросателлитными локусами в настоящее время позволяет более точно определять родительские пары и, самое важное, в случае успешной идентификации не допускает двойной трактовки результатов. Представленный в данной работе про-

граммный код может выдавать ошибочные результаты в случае высокой степени генетического сходства между производителями сибирского осетра, участвующими в нерестовой кампании, что говорит о необходимости его улучшения для дальнейшего машинного обучения. Но в то же время он имеет и неоспоримые преимущества. Во-первых, генерация матриц генетического сходства позволяет наглядно отобразить наличие генетически близких групп внутри тестируемого стада, что позволит селекционеру уйти от инбридинга при проведении нерестовых мероприятий или, при некоторой удаче, выявить особенность, характерную для какой-либо генетически-консолидированной группы особей, и таким образом связать некие фенотипические (физиологические, поведенческие) особенности с генотипом. Это открывает перспективы формирования таких селекционных единиц, как породы, типы и линии в рамках изучаемого вида. Во-вторых, применение матрицы генетического сходства – ключевой момент в оценке геномной ценности животных, реализованный в рамках методологии GBLUP (Genomic BLUP) (Meuwissen TH et al., 2001; Zhu S et al., 2021; Отраднов П.И. и др., 2023) и ssGBLUP (single-step GBLUP) (Aguilar I et al., 2010), неоднократно доказавших свою эффективность как инструмента оценки племенной ценности, имеющего ряд преимуществ по сравнению с оценкой, основанной исключительно на превосходстве фенотипических измерений особей. Данные методы позволяют учитывать не только наблюдаемые значения признаков, но и генетическую информацию, что существенно повышает точность оценки и ускоряет селекционный процесс. Важным аспектом является возможность прогнозирования племенной ценности животных в раннем возрасте, до проявления важных хозяйственно-полезных признаков. Применение подобной методологии в селекции осетровых рыб, характеризующихся длительным периодом роста и полового созревания, может стать значимым подспорьем для ведения эффективной селекционной работы. Использование геномных методов оценки позволит сократить интервал между поколениями, повысить интенсивность отбора и, как следствие, ускорить генетический прогресс в популяциях осетровых, что особенно важно для видов с длительным жизненным циклом, применение классических методов селекции к которым требует значительных временных затрат. Кроме того, геномная оценка может помочь в сохранении генетического разнообразия осетровых рыб, многие виды которых находятся под угрозой исчезновения, путём более точного подбора родительских пар и управления инбридингом.

Заключение.

Таким образом, представленный в настоящей статье способ расчёта генетического сходства, основанный на сравнении микросателлитных профилей тетраплоидных животных имеет хорошие перспективы для внедрения в селекционную работу с многими осетровыми видами рыб, характеризующимися тетраплоидными геномами. Применение данной разработки позволит повысить уровень селекционного процесса за счёт введения современных методов расчёта геномной оценки, что, в свою очередь, должно положительным образом сказаться на росте продуктивности одомашненных форм осетровых рыб.

Список источников

1. Барминцева А.Е. Филогеография и внутривидовой генетический полиморфизм сибирского осетра *Acipenser baerii* Brandt, 1869 в природе и аквакультуре: дис. ... канд. биол. наук. М., 2018. 145 с. [Barmintseva AE. Filogeografiya i vnutrividovoy geneticheskiy polymorfizm sibirskogo osetra *Acipenser baerii* Brandt, 1869 v prirode i akvakulture. [dissertation] Moscow; 2018:145 p. (In Russ.)].
2. Генетический анализ митохондриальной и ядерной ДНК свиней кемеровской породы / Н.А. Акопян, В.Р. Харзинова, С.М. Чыдым и др. // Животноводство и кормопроизводство. 2019. № 102(4). С. 132-137. [Akopyan NA, Kharzinova VR, Chydym SM et al. Genetic analysis of mitochondrial and nuclear DNA of Kemerovo pigs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(4):132-137. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-4-132

3. Додохов В.В. Полиморфизм микросателлитных локусов ДНК у домашних северных оленей эвенской породы // Животноводство и кормопроизводство. 2024. № 107(3). С. 70-78. [Dodokhov VV. Polymorphism of DNA microsatellite loci in domestic reindeer of the Even breed. Animal Husbandry and Fodder Production. 2024;107(3):70-78. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-3-70

4. Малютин В.С., Рубан Г.И. К истории рыбоводного освоения сибирского осетра *Acipenser baerii* реки Лена для целей акклиматизации и товарного выращивания // Вопросы ихтиологии. 2009. Т. 49. № 3. С. 389-395. [Malyutin VC, Ruban GI. On the history of fish husbandry of siberian sturgeon *Acipenser baerii* from the Lena river for acclimatization and commercial cultivation. Journal of Ichthyology. 2009;49(3):389-395. (In Russ.)].

5. Методические рекомендации по проведению молекулярно-генетической экспертизы племенного материала сибирского осетра (*Acipenser baerii*), разводимого в товарной аквакультуре / Н.В. Бардуков, А.К. Никипелова, В.И. Никипелов, А.А. Белоус, Н.А. Зиновьева. Дубровицы: ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, 2024. 32 с. [Bardukov NV, Nikipelova AK, Nikipelov VI, Belous AA, Zinovieva NA. Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu molekularno-geneticheskoi ekspertizy plemennogo materiala sibirskogo osetra (*Acipenser baerii*), razvodimogo v tovarnoi akvakulture. Dubrovitsy: FGBNU FIC VIZH im. L.K. Ernsta; 2024:32 p. (In Russ.)].

6. Мюге Н.С., Барминцева А.Е. Геномные исследования для сохранения осетровых: анализ наследования полиплоидных локусов и разработка панели маркеров для идентификации гибридов осетровых и продукции из них // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2020. № 2(106). С. 78-87. [Mugue NS, Barmintseva AE. Genomic research for sturgeon conservation: analysis of the inheritance of polyploid loci and the development of a marker panel to identify sturgeon hybrids and their products. Russian Foundation for Basic Research Journal. 2020;2(106):78-87. (In Russ.)]. doi: 10.22204/2410-4639-2020-106-02-78-87

7. Отрадных П.И., Рудиянов Д.М., Белоус А.А. Валидация оценок племенной ценности свиной породы дюрок по признакам кормового поведения // Свиноводство. 2023. № 5. С. 22-26. [Otradnov PI, Rudiyanov DM, Belous AA. Validation of breeding value estimates for duroc pigs by feeding behavior traits. Svinivodstvo. 2023;5:22-26. (In Russ.)]. doi: 10.37925/0039-713X-2023-5-22-26

8. Полногеномное исследование ассоциаций SNP с высотой в холке в популяциях локальных и трансграничных пород крупного рогатого скота в России / А.С. Абдельманова, М.С. Форнара, Н.В. Бардуков и др. // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56. № 6. С. 1111-1122. [Abdel'manova AS, Fornara MS, Bardukov NV, et al. Whole genome study of single nucleotide polymorphisms' associations with withers height in local and transboundary breeds in Russia. Selskokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]. 2021;56(6):1111-1122. (In Russ.)]. doi: 10.15389/agrobiology.2021.6.1111rus doi: 10.15389/agrobiology.2021.6.1099eng

9. Разработка мультиплексной панели микросателлитов для генетической паспортизации сибирского осетра (*Acipenser baerii*) / Н.В. Бардуков, А.К. Никипелова, А.А. Белоус, Н.А. Зиновьева // Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58. № 6. С. 1057-1067. [Bardukov NV, Nikipelova AK, Belous AA, Zinovieva NA. Development of multiplex panel of microsatellites for genetic studies of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) bred in commercial aquaculture. Selskokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural biology]. 2023;58(6):1057-1067. (In Russ.)]. doi: 10.15389/agrobiology.2023.6.1057rus doi: 10.15389/agrobiology.2023.6.1057eng

10. Aguilar I, Misztal I, Johnson DL, Legarra A, et al. Hot topic: a unified approach to utilize phenotypic, full pedigree, and genomic information for genetic evaluation of Holstein final score. Journal of Dairy Science. 2010;93(2):743-752. doi: 10.3168/jds.2009-2730

11. Bronzi P, Rosenthal H, Gessner J. Global sturgeon aquaculture production: an overview. Journal of Applied Ichthyology. 2011;27:169-175. doi: 10.1111/j.1439-0426.2011.01757.x

12. Clark LV, Jasieniuk M. POLYSAT: an R package for polyploid microsatellite analysis. Molecular Ecology Resources. 2011;11(3):562-566. doi: 10.1111/j.1755-0998.2011.02985.x

13. Cui X, Li C, Qin S, Huang Z, Gan B, Jiang Z, Huang X, Yang X, Li Q, Xiang X, Chen J, Zhao Y, Rong J. High-throughput sequencing-based microsatellite genotyping for polyploids to re-

solve allele dosage uncertainty and improve analyses of genetic diversity, structure and differentiation: A case study of the hexaploidy *Camellia oleifera*. *Molecular Ecology Resources*. 2022;22(1):199-211. doi: 10.1111/1755-0998.13469

14. Edwards A, Civitello A, Hammond HA, Caskey CT. DNA typing and genetic mapping with trimeric and tetrameric tandem repeats. *American Journal of Human Genetics*. 1991;49(4):746-75.

15. Georgescu SE, Canareica O, Popa G, Dudu A, Costache M. Characterization of five microsatellites in the Siberian sturgeon *Acipenser baerii* from aquaculture. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2013;46(1):95-98.

16. Hardy OJ, Vekemans X. SPAGeDi: a versatile computer program to analyse spatial genetic structure at the individual or population levels. *Molecular Ecology Notes*. 2002;2:618-620. doi: 10.1046/j.1471-8286.2002.00305.x

17. Havelka M, Hulak M, Bailie DA, Prodohl PA, Flajshans M. Extensive genome duplications in sturgeons: New evidence from microsatellite data. *Journal of Applied Ichthyology*. 2013;29:704-708. doi: 10.1111/jai.12224

18. Kohlmann K, Kersten P, Geßner J, Eroglu O, Firidin S, Ciorpac M, Suciu R. Validation of 12 species-specific, tetrasomic microsatellite loci from the Russian sturgeon, *Acipenser gueldenstaedtii*, for genetic broodstock management. *Aquaculture International*. 2018;26:1365-1376. doi: 10.1007/s10499-018-0290-y

19. Kohlmann K, Kersten P, Geßner J, Onara D, Taflan E, Radu S. New microsatellite multiplex PCR sets for genetic studies of the sterlet sturgeon, *Acipenser ruthenus*. *Environmental Biotechnology*. 2017;13:11-17. doi: 10.14799/ebms285

20. Markwith SH, Stewart DJ, Dyer JL. TETRASAT: A program for the population analysis of allotetraploid microsatellite data. *Molecular Ecology Notes*. 2006;6:586-589.

21. Meuwissen TH, Hayes BJ, Goddard ME. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker map. *Genetics*. 2001;157(4):1819-1829. doi: 10.1093/genetics/157.4.1819

22. Pritchard JK, Stephens M, Donnelly P. Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*. 2000;155(2):945-959. doi: 10.1093/genetics/155.2.945

23. R Core Team. [Internet] R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Austria, Vienna, 2024. Available from: <https://www.R-project.org/> (accessed 22.09.2024)

24. Ruban GI, Mugue NS. [Internet] *Acipenser baerii*. The IUCN Red List of Threatened Species. 2022: e.T244A156718817. Available from: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2022-1.RLTS.T244A156718817.en> (accessed 10.09.2024)

25. Webster MS, Reichart L. Use of microsatellites for parentage and kinship analyses in animals. *Methods in Enzymology*. 2005;395:222-238. doi: 10.1016/S0076-6879(05)95014-3

26. Zane L, Patarnello T, Ludwig A, et al. Isolation and characterization of microsatellites in the Adriatic sturgeon (*Acipenser naccarii*). *Molecular Ecology Notes*. 2002;2(4):586-588. doi: 10.1046/j.1471-8286.2002.00328.x.

27. Zhu S, Guo T, Yuan C, Liu J, et al. Evaluation of Bayesian alphabet and GBLUP based on different marker density for genomic prediction in Alpine Merino sheep. *G3 Genes/Genomes/Genetics*. 2021;11(11). doi: 10.1093/g3journal/jkab206

References

1. Barmintseva AE. Phylogeography and intraspecific genetic polymorphism of the Siberian sturgeon *Acipenser baerii* Brandt, 1869 in nature and aquaculture. [dissertation] Moscow; 2018:145 p.

2. Akopyan NA, Kharzinova VR, Chydym SM et al. Genetic analysis of mitochondrial and nuclear DNA of Kemerovo pigs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;4(102):132-137. doi: 10.33284/2658-3135-102-4-132

3. Dodokhov VV. Polymorphism of DNA microsatellite loci in domestic reindeer of the Even breed. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(3):70-78. doi: 10.33284/2658-3135-107-3-70
4. Malyutin VC, Ruban GI. On the history of fish husbandry of siberian sturgeon *Acipenser baerii* from the Lena river for acclimatization and commercial cultivation. *Journal of Ichthyology*. 2009;49(3):389-395.
5. Bardukov NV, Nikipelova AK, Nikipelov VI, Belous AA, Zinovieva NA. Methodological recommendations for molecular genetic expertise of pedigree material of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) bred in commercial aquaculture. *Dubrovitsy: FSBSI FRC AH named after L.K. Ernst*; 2024:32 p.
6. Mugue NS, Barmintseva AE. Genomic research for sturgeon conservation: analysis of the inheritance of polyploid loci and the development of a marker panel to identify sturgeon hybrids and their products. *Russian Foundation for Basic Research Journal*. 2020;2(106):78-87. doi: 10.22204/2410-4639-2020-106-02-78-87
7. Otradnov PI, Rudiyanov DM, Belous AA. Validation of breeding value estimates for duroc pigs by feeding behavior traits. *Pigbreeding*. 2023;5:22-26. doi: 10.37925/0039-713X-2023-5-22-26
8. Abdel'manova AS, Fornara MS, Bardukov NV, et al. Whole genome study of single nucleotide polymorphisms' associations with withers height in local and transboundary breeds in Russia. *Selskokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. 2021;56(6):1111-1122. doi: 10.15389/agrobiology.2021.6.1099eng
9. Bardukov NV, Nikipelova AK, Belous AA, Zinovieva NA. Development of multiplex panel of microsatellites for genetic studies of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) bred in commercial aquaculture. *Selskokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural biology]*. 2023;58(6):1057-1067. doi: 10.15389/agrobiology.2023.6.1057eng
10. Aguilar I, Misztal I, Johnson DL, Legarra A, et al. Hot topic: a unified approach to utilize phenotypic, full pedigree, and genomic information for genetic evaluation of Holstein final score. *Journal of Dairy Science*. 2010;93(2):743-752. doi: 10.3168/jds.2009-2730
11. Bronzi P, Rosenthal H, Gessner J. Global sturgeon aquaculture production: an overview. *Journal of Applied Ichthyology*. 2011;27:169-175. doi: 10.1111/j.1439-0426.2011.01757.x
12. Clark LV, Jasieniuk M. POLYSAT: an R package for polyploid microsatellite analysis. *Molecular Ecology Resources*. 2011;11(3):562-566. doi: 10.1111/j.1755-0998.2011.02985.x
13. Cui X, Li C, Qin S, Huang Z, Gan B, Jiang Z, Huang X, Yang X, Li Q, Xiang X, Chen J, Zhao Y, Rong J. High-throughput sequencing-based microsatellite genotyping for polyploids to resolve allele dosage uncertainty and improve analyses of genetic diversity, structure and differentiation: A case study of the hexaploidy *Camellia oleifera*. *Molecular Ecology Resources*. 2022;22(1):199-211. doi: 10.1111/1755-0998.13469
14. Edwards A, Civitello A, Hammond HA, Caskey CT. DNA typing and genetic mapping with trimeric and tetrameric tandem repeats. *American Journal of Human Genetics*. 1991;49(4):746-75.
15. Georgescu SE, Canareica O, Popa G, Dudu A, Costache M. Characterization of five microsatellites in the Siberian sturgeon *Acipenser baerii* from aquaculture. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2013;46(1):95-98.
16. Hardy OJ, Vekemans X. SPAGeDi: a versatile computer program to analyse spatial genetic structure at the individual or population levels. *Molecular Ecology Notes*. 2002;2:618-620. doi: 10.1046/j.1471-8286.2002.00305.x
17. Havelka M, Hulak M, Bailie DA, Prodohl PA, Flajshans M. Extensive genome duplications in sturgeons: New evidence from microsatellite data. *Journal of Applied Ichthyology*. 2013;29:704-708. doi: 10.1111/jai.12224
18. Kohlmann K, Kersten P, Geßner J, Eroglu O, Firidin S, Ciorpac M, Suciu R. Validation of 12 species-specific, tetrasomic microsatellite loci from the Russian sturgeon,

- Acipenser gueldenstaedtii*, for genetic broodstock management. Aquaculture International. 2018;26:1365-1376. doi: 10.1007/s10499-018-0290-y
19. Kohlmann K, Kersten P, Geßner J, Onara D, Taflan E, Radu S. New microsatellite multiplex PCR sets for genetic studies of the sterlet sturgeon, *Acipenser ruthenus*. Environmental Biotechnology. 2017;13:11-17. doi: 10.14799/ebms285
20. Markwith SH, Stewart DJ, Dyer JL. TETRASAT: A program for the population analysis of allotetraploid microsatellite data. Molecular Ecology Notes. 2006;6:586-589.
21. Meuwissen TH, Hayes BJ, Goddard ME. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker map. Genetics. 2001;157(4):1819-1829. doi: 10.1093/genetics/157.4.1819
22. Pritchard JK, Stephens M, Donnelly P. Inference of population structure using multilocus genotype data. Genetics. 2000;155(2):945-959. doi: 10.1093/genetics/155.2.945
23. R Core Team. [Internet] R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Austria, Vienna, 2024. Available from: <https://www.R-project.org/> (accessed 22.09.2024)
24. Ruban GI, Mugue NS. [Internet] *Acipenser baerii*. The IUCN Red List of Threatened Species. 2022: e.T244A156718817. Available from: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2022-1.RLTS.T244A156718817.en> (accessed 10.09.2024)
25. Webster MS, Reichart L. Use of microsatellites for parentage and kinship analyses in animals. Methods in Enzymology. 2005;395:222-238. doi: 10.1016/S0076-6879(05)95014-3
26. Zane L, Patarnello T, Ludwig A, et al. Isolation and characterization of microsatellites in the Adriatic sturgeon (*Acipenser naccarii*). Molecular Ecology Notes. 2002;2(4):586-588. doi: 10.1046/j.1471-8286.2002.00328.x.
27. Zhu S, Guo T, Yuan C, Liu J, et al. Evaluation of Bayesian alphabet and GBLUP based on different marker density for genomic prediction in Alpine Merino sheep. G3 Genes/Genomes/Genetics. 2021;11(11). doi: 10.1093/g3journal/jkab206

Информация об авторах:

Николай Владимирович Бардуков, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60, тел.: +79850404028.

Амина Кумаровна Никипелова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60, тел.: +79850404028.

Петр Ильич Отраднов, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60, тел.: +79850404028.

Владислав Игоревич Никипелов, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60, тел.: +79850404028.

Анна Александровна Белоус, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60, тел.: +79850404028.

Information about the authors:

Nikolai V Bardukov, Researcher, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +79850404028.

Amina K Nikipelova, Junior Researcher, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +79850404028.

Petr I Otradnov, Junior Researcher, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +79850404028

Vladislav I Nikipelov, Junior Researcher, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +79850404028.

Anna A Belous, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Podolsk, Dubrovitsy, 60, 142132, tel.: +79850404028.

Статья поступила в редакцию 11.10.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 11.10.2024; approved after reviewing 21.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА, КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ И ЭКОНОМИКА В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 637.5

doi:10.33284/2658-3135-107-4-120

**Взаимосвязь некоторых показателей состава и качества мяса бычков
абердин-ангусской породы**

**Надежда Владимировна Боголюбова¹, Никита Сергеевич Колесник², Павел Дмитриевич Лахонин³,
Николай Петрович Елаткин⁴, Александр Александрович Николаев⁵**

^{1,2,3,5}Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста,
Московская область, п. Дубровицы, Россия

⁴ООО «Мираторг-генетика», Москва, Россия

¹652202@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0520-7022>

²kominisiko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4267-5300>

³Lakhonin.99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7354-0337>

⁴n.elatkin@agrohold.ru

⁵alexandraces@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9355-3285>

Аннотация. Научно-практическое значение имеет изучение вопросов формирования состава и качества животноводческой продукции. В связи с этим целью исследований являлось определение биологических маркеров, характеризующих качественные показатели мышечной ткани крупного рогатого скота абердин-ангусской породы. Объектом исследований являлись пробы мышечной ткани длиннейшей мышцы спины бычков (n=157). Определены показатели химического, минерального, аминокислотного составов, качественные показатели мяса и подсчитаны корреляции между ними. Показатель кислотности (рН 24) положительно коррелировал с содержанием в мясе хрома. Отмечены положительные корреляции влагоудерживающей способности (ВУС) с содержанием влаги, протеина, золы, кальция, фосфора, хрома, фенилаланина и отрицательные – с содержанием жира и аргинина. Суммарное количество водорастворимых антиоксидантов (СКВА) положительно коррелирует с содержанием влаги, золы, макро- и микроэлементов, цистеина, пролина и отрицательно – с содержанием жира и некоторых аминокислот. Полученные результаты позволяют делать вывод о формировании качественных показателей сырья, что поможет в разработке способов регуляции и прижизненного формирования качественной продукции отечественного скотоводства.

Ключевые слова: бычки, абердин-ангусская порода, химический состав, аминокислотный состав, качество мяса, корреляции

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2024 гг. ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (№ FGGN-2022-0011).

Для цитирования: Взаимосвязь некоторых показателей состава и качества мяса бычков абердин-ангусской породы / Н.В. Боголюбова, Н.С. Колесник, П.Д. Лахонин, Н.П. Елаткин, А.А. Николаев // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 120-132. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-120>

The relationship of some indicators of composition and quality of meat of the Angus bulls

**Nadezhda V Bogolyubova¹, Nikita S Kolesnik², Pavel D Lakhonin³, Nikolai P Elatkin⁴,
Alexander A Nikolaev⁵**

^{1,2,3,5}Federal Research Center for Animal Husbandry - VIZh named after Academician L.K. Ernst,
Moscow region, Dubrovitsy, Russia

⁴Miratorg-Genetics LLC, Moscow, Russia

¹652202@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0520-7022>

²kominisiko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4267-5300>

³Lakhonin.99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7354-0337>

⁴n.elatkin@agrohold.ru

⁵alexandraces@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9355-3285>

Abstract. The study of the formation of the composition and quality of livestock products is of scientific and practical importance. In this regard, the aim of the research was to determine the biological markers characterizing the quality indicators of muscle tissue of the Angus cattle. The object of the study was muscle samples of the rib eye of the Angus bulls (n = 157). The indicators of chemical, mineral, amino acid composition, quality indicators of meat were determined and correlations between them were calculated. pH 24 positively correlated with the content of chromium in meat. Positive correlations of water-holding capacity of meat (WHC) with the content of moisture, protein, ash, calcium, phosphorus, chromium, phenylalanine and negative ones with the content of fat and arginine were noted. Total amount of water-soluble antioxidants (TAWSA) positively correlates with the content of moisture, ash, macro- and microelements, cysteine, proline and negatively with the content of fat and some amino acids. The obtained results allow us to draw a conclusion about the formation of quality indicators of raw materials, which will help in developing methods for regulating and intravital formation of high-quality products of domestic cattle breeding.

Keywords: bulls, Angus breed, chemical, amino acid composition, meat quality, correlations

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2022-2024 L.K. Ernst Federal Research Center Directorate (No. FGGN-2022-0011).

For citation: Bogolyubova NV, Kolesnik NS, Lakhonin PD, Elatkin NP, Nikolaev AA. The relationship of some indicators of composition and quality of meat of the Angus bulls. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):120-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-120>

Введение.

На сегодняшний день наблюдается рост потребления мяса во всех странах мира, включая Россию, что приводит к интенсификации животноводства (Karau A and Grayson I, 2014). В этих условиях всё большее значение приобретает усиление контроля за качеством получаемой продукции. Это вызвано и ускорением роста животных под влиянием различных биологически активных веществ (БАВ), и применением новых технологий производства (Кабанов В.Д. и др., 2019; Отаров А.И. и др., 2023). Проблемам качества и свойствам мясного сырья посвящено достаточное количество исследований отечественных и зарубежных специалистов (Алексеева Е.И. и др., 2022; Алексеева Е.И. и Суханова С.Ф., 2017; Zhang Y et al., 2024; Abou-Kassem DE et al., 2022).

Пищевая ценность мясных продуктов определяется химическим составом – содержанием белков, жиров, углеводов, экстрактивных веществ, витаминов, минеральных соединений (Калюжная Т.В. и др., 2023; Вострикова Н.Л. и др., 2013). В частности, говядина служит хорошим источником белка высокой биологической ценности и незаменимых аминокислот (АК), витаминов (А, В2, В6, В12, пантотеновая кислота и ниацин) и минеральных веществ (железо, цинк, фосфор и селен) (Бородина О.В. и Шмат Е.В., 2017; Фролов А. Н. и др., 2022). Кроме того, говядина является

источником других биологически активных веществ (таких как конъюгированная линолевая кислота и незаменимые омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты) и содержит эндогенные антиоксиданты (такие как кофермент Q10, глутатион, липоевая кислота и т.д.) (Salami SA et al., 2021). Наличие в мясных продуктах полиненасыщенных жирных кислот, которые организм человека синтезировать не способен, позволяет отнести говядину к важным компонентам сбалансированного питания.

Однако биологическая и пищевая ценность мяса в большей степени определяется содержанием в его составе незаменимых аминокислот (Джуламанов К.М. и др., 2020). Белки мяса являются наиболее ценным компонентом, составляющим 95 % всех азотистых веществ в организме. Аминокислотный состав белков говядины по своей биологической ценности превосходит все виды мясного сырья, и в первую очередь, по сбалансированности состава незаменимых аминокислот и уровню усвоения белка (Алексеева Е.И. и Лещук Т.Л., 2022). Кроме того, количественное содержание и физико-химические свойства белковых веществ под воздействием воды, электролитов, pH среды, окислителей и восстановителей, температурного фактора и т. д. определяют поведение пищевых систем, что играет важную роль в формировании функционально-технологических свойств сырья и готовых мясных продуктов. Технологическое значение белков в производстве мясных продуктов тесно связано с особенностями их химического строения, в том числе аминокислотного состава.

Более того, белки мышечной ткани обуславливают также важнейшие свойства мяса в целом (консистенцию, вкус, цвет). Вкус высококачественной спелой говядины является результатом ферментативных реакций, которые происходят во время гидролиза белков и распада липидов (Dong F et al., 2024). После гидролиза белка полипептиды или свободные аминокислоты приобретают характерный пищевой вкус и могут непосредственно усваиваться организмом человека с образованием таких питательных веществ, как токоферол и фолиевая кислота (Bi YZ et al., 2022). Свободные АК как важный показатель оценки пищевой ценности и вкусовых характеристик мяса синергически обогащают общие вкусовые характеристики мяса за счёт своего состава, разнообразия и содержания (Jiang S et al., 2023). Например, белковые аминокислоты аланин, серин, треонин обладают слегка сладким вкусом, тогда как глицин, валин и пролин – более сладким. Аргинин, метионин, лейцин, фенилаланин обладают слегка горьким, а изолейцин, триптофан, гистидин и лизин – горьким вкусом. В составе мышц больше всего содержится глутаминовой кислоты и глутамина, которые и придают «мясной вкус» мясу (Dong F et al., 2024). Стоит отметить, что различные соотношения аминокислот могут привести к синергетическому усилению или подавлению вкуса (Pal Choudhuri S et al., 2015).

Актуальной научной проблемой является фундаментальное изучение факторов, способствующих формированию качества мясной продукции, посредством комплексного подхода, включающего поиск новых функциональных элементов питания, консолидации фенотипических, молекулярно-генетических, биохимических, микробиологических, гормональных механизмов гомеостаза в организме сельскохозяйственных животных. Проблемам качества и свойствам мяса посвящено достаточное количество исследований отечественных и зарубежных специалистов (Abubakar AA et al., 2021; Семенова А.А. и др., 2023; Белоус А.А. и др., 2024), но недостаточно данных о взаимосвязи химического, минерального и аминокислотного составов с качественными характеристиками мышечной ткани бычков абердин-ангусской породы, что имеет научно-практическое значение в вопросе прижизненного формирования качества животноводческой продукции.

Цель исследования.

Определение биологических маркеров, характеризующих качественные показатели мышечной ткани крупного рогатого скота абердин-ангусской породы.

Материалы и методы исследования.

Объект исследований. Пробы мышечной ткани, полученные из длиннейшей мышцы спины бычков абердин-ангусской породы.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Исследование одобрено комиссией по биоэтике Федерального исследовательского центра животноводства им. Л.К. Эрнста (протокол № 2022-11/1 от 14 ноября 2022 г.).

Схема эксперимента. Отбор средних проб мышечной ткани проводился на базе мясоперерабатывающего комбината ООО «Мираторг-генетика». Пробы мяса ($n=157$) подвергались исследованию химического состава и качества по нижеприведённым методикам.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнялись в отделе физиологии и биохимии с/х животных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Измерение температуры и pH мышечных тканей проведено с помощью прибора Testo 205 («Testo SE & Co. KGaA», Германия). Значения кислотности (pH) через 24 часа после убоя животного определяли в охлажденном мясе. В образцах мяса установлена влагоудерживающая способность методом прессования Грау-Гамма в модификации В. Воловинской. Химический состав мяса определён по следующим методикам: воздушно-сухое вещество (по ГОСТ 33319-2015), содержание жира (по ГОСТ 23042-2015), содержание золы (по ГОСТ 31727-2012), содержание протеина (расчетным методом), содержание кальция (по ГОСТ Р 55573-2013), фосфора (по ГОСТ 9794-2015), магния (по ГОСТ 33424-2015), суммарное содержание водорастворимых антиоксидантов (СКВА) проведено амперометрическим методом на приборе «ЦветЯуза-01-АА» с амперометрическим детектором («Химавтоматика», Россия).

Содержание меди, цинка и хрома в образцах ткани определяли на атомно-адсорбционном спектрометре (с электротермической атомизацией) ZEE nit 650 P (AnalytikJena AG). Пробоподготовку осуществляли с помощью системы микроволновой пробоподготовки Milestone Ethos Easy.

Определение общего содержания аминокислот проводилось методом ионообменной хроматографии с постколоночной дериватизацией проб нингидрином. Для подготовки проб использовали кислотный гидролиз (за исключением триптофана) в растворе 6 молярной соляной кислоты, с добавлением норлейцина в качестве внутреннего стандарта. Гидролиз производили при $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24 ч. Анализ выполняли на системе высокоэффективной жидкостной хроматографии (HPLC) Shimadzu LC-20 Prominence (Япония), с реакционным модулем для пост-колоночной дериватизации нингидрином APM-1000 (Sevko&Co, Россия), оснащённый абсорбционным детектором ($\lambda_{\text{abs}}=440\text{ нм}$, 570 нм) и колонкой с ионообменной смолой $4,6\times 150\text{ мм}$ (Sevko&Co, Россия). Используются готовые буферные растворы (Sevko&Co, Россия). Расчёт концентрации выполнялся по стандартному образцу аминокислот (Sykam, Германия).

Статистическая обработка. Математическую и статистическую обработку результатов проводили с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel 2013» («Microsoft», США) и обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США) с использованием методов однофакторного дисперсионного, корреляционного анализов. Данные проверялись на нормальность распределения по критериям Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Уилка. Рассчитывались коэффициенты корреляции по Пирсону, t- критерий Стьюдента. Различия считали значимыми при $P\leq 0,05$.

Результаты исследования.

Проведённый анализ полученных данных показывает, что химический состав мышечной ткани коррелирует с некоторыми индикаторами качества (табл. 1). Так, установлена положительная корреляция средней степени между влагоудерживающей способностью мяса и содержанием влаги (0,529), очень слабые корреляции – между ВУС и содержанием протеина (0,230) и золы (0,295) в мышцах. Отрицательная корреляция средней степени найдена между ВУС и содержанием жира (-0,533). СКВА положительно коррелирует с содержанием влаги (0,284), золы (0,472) и отрицательно – с содержанием жира (-0,298).

Таблица 1. Корреляции химического состава и некоторых качественных показателей мышечной ткани (n=157)

Table 1. Correlations of chemical composition and some qualitative indicators of muscle tissue (n=157)

Показатель/ Indicator	pH-24	p-value	ВУС, % /WHC, %	p-value	СКВА, мг/г/ TAWSA, mg/g	p-value
Содержание влаги, %/ Moisture content, %	0,088	0,245	0,529	0,0001	0,284	0,0001
Содержание жира, %/ Fat content, %	-0,087	0,253	-0,533	0,001	-0,298	0,0002
Содержание протеина, %/ Protein content, %	0,027	0,719	0,230	0,002	0,127	0,098
Содержание золы, %/ Ash content, %	0,077	0,311	0,295	0,0001	0,472	0,0001

Примечание: ВУС – влагоудерживающая способность мяса, СКВА – суммарное содержание водорастворимых антиоксидантов. Здесь и далее – полужирным курсивом выделены статистически значимые корреляции

Note: WHC – water-holding capacity of meat, TAWSA – total amount of water-soluble antioxidants.

From here on, statistically significant correlations are highlighted in bold italics

Обнаружены корреляции некоторых показателей качества мяса и содержания в нём минеральных компонентов (табл. 2). Так, pH 24 и содержание хрома достоверно и положительно коррелируют между собой (0,171). Положительные корреляции обнаружены между ВУС и содержанием кальция (0,358), фосфора (0,319), магния (0,329) и хрома (0,242). Установлено, что уровень СКВА положительно коррелировал практически со всеми определяемыми макро- и микроэлементами в мышечной ткани, кроме цинка: корреляция СКВА и содержание кальция составила 0,425, фосфора – 0,256, магния – 0,195, меди – 0,294 и хрома – 0,227.

Таблица 2. Корреляции минерального состава и некоторых качественных показателей мышечной ткани (n=157)

Table 2. Correlations of mineral composition and some qualitative indicators of muscle tissue (n=157)

Показатель/ Indicator	pH-24	p-value	ВУС, %/ WHC, %	p-value	СКВА, мг/г/ TAWSA, mg/g	p-value
Содержание кальция, %/ Calcium content, %	0,0397	0,601	0,358	0,0001	0,425	0,0001
Содержание фосфора, %/ Phosphorus content, %	0,124	0,10	0,319	0,0002	0,256	0,001
Содержание магния, %/ Magnesium content, %	0,065	0,391	0,329	0,0001	0,195	0,011
Содержание цинка, мг/кг CB/ Zinc content, mg/kg DM	-0,029	0,700	-0,01	0,858	-0,010	0,898
Содержание меди, мг/кг CB/ Copper content, mg/kg DM	-0,081	0,286	-0,004	0,957	0,294	0,0002
Содержание хрома, мг/кг CB / Chromium content, mg/kg DM	0,171	0,023	0,242	0,001	0,227	0,003

Примечание: ВУС – влагоудерживающая способность мяса, СКВА – суммарное содержание водорастворимых антиоксидантов, СВ – сухое вещество

Note: WHC – water-holding capacity of meat, TAWSA – total amount of water-soluble antioxidants,

DM - dry matter

Интересными, на наш взгляд, являются установленные корреляции между содержанием в мышечной ткани отдельных аминокислот и уровнем СКВА (табл. 3). Все обнаруженные достоверные корреляции носили отрицательный характер, кроме таковой между СКВА и содержанием пролина (0,540), цистеина (0,273). Заслуживают внимания корреляции между СКВА и содержанием в мясе аспарагиновой (-0,216), глутаминовой (-0,347) кислот, глицина (-0,361), аланина (-0,310), валина (-0,415), изолейцина (-0,331), лейцина (-0,473), гистидина (-0,376), лизина (-0,484), аргинина (-0,440).

Таблица 3. Корреляции аминокислотного состава и некоторых качественных показателей мышечной ткани (n=157)

Table 3. Correlations of amino acid composition and some qualitative indicators of muscle tissue (n=157)

Показатель/ Indicator	pH-24	p-value	ВУС, %/ WHC, %	p-value	СКВА, мг/г/ TAWSA, mg/g	p-value
Аспарагиновая кислота, г/100 г белка/ Aspartic acid, g/100 g protein	-0,228	0,003	-0,022	0,781	-0,216	0,004
Треонин, г/100 г белка/ Threonine, g/100 g protein	-0,037	0,638	0,057	0,465	-0,116	0,139
Серин, г/100 г белка/ Serine, g/100 g protein	-0,04	0,653	-0,080	0,338	-0,079	0,316
Глутаминовая кислота, г/100 г белка/ Glutamic acid, g/100 g protein	-0,057	0,466	-0,028	0,718	-0,347	0,0001
Глицин, г/100 г белка/ Glycine, g/100 g protein	-0,0028	0,972	-0,076	0,334	-0,361	0,0001
Аланин, г/100 г белка/ Alanine, g/100 g protein	-0,029	0,712	-0,061	0,437	-0,310	0,0001
Цистеин, г/100 г белка/ Cysteine, g/100 g protein	-0,073	0,351	0,085	0,269	0,273	0,0001
Валин, г/100 г белка/ Valine, g/100 g protein	-0,011	0,887	-0,102	0,193	-0,415	0,0001
Метионин, г/100 г белка/ Methionine, g/100 g protein	0,470	0,0001	-0,027	0,736	0,016	0,839
Изолейцин, г/100 г белка/ Isoleucine, g/100 g protein	-0,011	0,989	-0,079	0,316	-0,331	0,0001
Лейцин, г/100 г белка/ Leucine, g/100 g protein	0,016	0,984	-0,059	0,454	-0,473	0,0001
Тирозин, г/100 г белка/ Tyrosine, g/100 g protein	-0,038	0,628	-0,071	0,365	-0,006	0,936
Фенилаланин, г/100 г белка/ Phenylalanine, g/100 g protein	0,043	0,588	0,191	0,014	0,142	0,069
Гистидин, г/100 г белка/ Histidine, g/100 g protein	0,032	0,682	0,100	0,202	-0,376	0,0001
Лизин, г/100 г белка/ Lysine, g/100 g protein	0,01	0,899	-0,039	0,617	-0,484	0,0001
Аргинин, г/100 г белка/ Arginine, g/100 g protein	0,038	0,63	-0,193	0,013	-0,440	0,0001
Пролин, г/100 г белка/ Proline, g/100 g protein	-0,013	0,867	0,122	0,877	0,540	0,0001

В меньшей степени обнаружены значимые корреляции между другими определяемыми показателями качества мяса. Так, в отношении ВУС обнаружены корреляции между этим показателем и содержанием фенилаланина (0,191) и аргинина (-0,193).

Обсуждение полученных результатов.

В описании качественных показателей мышечной ткани мы остановили свой выбор на pH 24, влагоудерживающей способности и суммарном содержании водорастворимых антиоксидантов (СКВА).

Известно, что pH мышечной ткани определяет технологические, микробиологические и товарные характеристики продуктов из мяса (Кудряшов Л.С. и Кудряшова О.А., 2012) и является показателем для выявления сырья с аномальным характером автолиза (Кудряшов Л.С., 1992). При этом конечное значение pH – наиболее убедительный показатель качества мяса (Горлов Н.Ф. и др., 2016). Мясо с конечным pH в диапазоне 5,5-5,7 демонстрирует наиболее желательные качественные характеристики среди большинства видов мясных животных, и отклонение от этого диапазона в любом направлении наносит ущерб качеству (Matarneh SK et al., 2021). Таким образом, понимание механизмов, контролирующих pH в тканях мышцы после созревания, является ключом к производству высококачественного мяса. Кроме этого, есть мнение, что данный показатель следует рассматривать в совокупности с ВУС, цветом и консистенцией. По мнению некоторых исследователей, существует высокая степень корреляции между pH 24 и водосвязывающей способностью (Горлов Н.Ф. и др., 2016).

В наших исследованиях pH через 24 часа после убоя положительно коррелировал с содержанием в мясе хрома. Другие авторы также отмечали снижение кислотности мышечной ткани при скармливании наночастиц хрома. Химический состав мышечной ткани определяет её общие биохимические и функциональные свойства и, следовательно, её качество.

Влагоудерживающая способность мяса наряду с pH является одним из основных показателей качества мяса, который характеризует способность удерживать воду в мышечных волокнах при созревании и последующей переработке. Важность этого показателя заключается в определении функционально-технологических и кулинарных свойств мяса (Козликин А.В. и др., 2019). В наших исследованиях отмечены положительные корреляции ВУС с содержанием влаги, протеина, золы, кальция, фосфора, хрома, фенилаланина и отрицательные – с содержанием жира и аргинина. На ВУС наибольшее влияние оказало содержание влаги, протеина и минеральных компонентов. Белки за счёт большого количества гидрофильных групп в своём составе активно связывают молекулы воды, чем и объясняется положительная взаимосвязь между ВУС и содержанием протеина, а также ВУС и содержанием влаги в мышечной ткани. По мере развития окоченения влагосвязывающая способность мяса уменьшается за счёт накопления кислых продуктов (молочной, пировиноградной, ортофосфорной кислот и пр.), что приводит к значительному снижению pH. Интервал между pH среды и изоэлектрической точкой белков мяса уменьшается, вследствие чего уменьшается число ионизированных групп и влагоудерживающая способность белков.

СКВА относится к комплексным совокупным показателям, характеризующим общее содержание в мышечной ткани водорастворимых антиоксидантов. К последним относятся те компоненты, которые осуществляют свою защитную функцию в цитозоле клеток, межклеточной жидкости. Это, в частности, аскорбиновая, лимонная, никотиновая кислоты, серосодержащие соединения (цистеин, гомоцистеин, липоевая кислота, бензойная кислота), фенольные соединения, флавоноиды и др. Изучение антиоксидантного потенциала мясных продуктов актуально, поскольку они являются важным источником бионутриентов для человека и определяют здоровье основного потребителя. Мясо и мясные продукты в составе рациона питания современного человека вносят важный вклад в антиоксидантный статус организма. При этом актуальным является выявление биомаркеров химического состава мышечной ткани, которые связаны с содержанием антиоксидантов, что и определило одну из задач наших исследований. Проведённый Лебедевой С.Н. и Жамсарановой С.Д. (2016) анализ показал, что максимальное содержание СКВА отмечено в баранине, на 2 месте – конина, на 3 – свинина, на 4 – говядина.

В наших исследованиях СКВА положительно коррелирует с содержанием влаги, золы, макро- и микроэлементов, цистеина, пролина и отрицательно – с содержанием жира и некоторых аминокислот. По мнению некоторых авторов, цистеин обладает заметной антиоксидантной активностью, что объясняет прямую зависимость содержания этой аминокислоты в мышечной ткани и СКВА (Арутюнянц А.А. и др., 2012). Пролин также способен окисляться несколько лучше других аминокислот, поскольку содержит вторичный азот в алифатическом цикле (Савина А.А. и др., 2020), что также объясняет найденную положительную корреляцию со СКВА (0,540). По мнению Арутюнянц А.А. с коллегами (2012), гистидин и лизин также являются растворимыми аминокислотами, имеющими высокую антиоксидантную активность. Такой вывод авторы сделали на основании изучения циклических вольтамперограмм. Согласно нашим результатам, корреляция между количеством гистидина и лизина и СКВА отрицательная. Возможно, амперометрический метод определения антиоксидантов не позволяет в полной мере оценить весь спектр составляющих водорастворимых антиокислительных компонентов и требует использование дополнительных методов. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Медь играет важную роль в антиоксидантной защите организма, являясь составной частью церулоплазмينا, входящего в состав СКВА, что определяет положительную корреляцию между этими показателями (0,294).

Заключение.

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что химический, минеральный и аминокислотный составы мышечной ткани оказывают заметное влияние на качество сырья, определяющего функционально-технологические и кулинарные свойства говядины.

Отмечены положительные корреляции ВУС с содержанием влаги, протеина, золы, кальция, фосфора, хрома, фенилаланина и отрицательные – с содержанием жира и аргинина. СКВА положительно коррелирует с содержанием влаги, золы, макро- и микроэлементов, цистеина, пролина и отрицательно – с содержанием жира и некоторых аминокислот.

Полученные результаты позволяют делать вывод о формировании качественных показателей сырья, что поможет в разработке способов регуляции и прижизненного формирования качественной продукции отечественного скотоводства.

Список источников

1. Алексеева Е.И., Суханова С.Ф. Качество мяса, полученного от животных герефордской и абердин-ангусской пород // Инновации и продовольственная безопасность. 2017. № 4. С. 20-25. [Alekseeva EI, Sukhanova SF. The quality of meat obtained from animals of the Gereford and Aberdin-angus breeds. Innovations and Food Security. 2017;4:20-25. (In Russ.)].
2. Аминокислотный состав говядины, полученной от скота специализированных мясных пород / Е.И. Алексеева, Т.Л. Лещук, Н.А. Лушников, Н.М. Костомахин // Главный зоотехник. 2022. № 8 (229). С. 3-10. [Alekseeva EI, Leshchuk TL, Lushnikov NA, Kostomakhin NM. Amino acid composition of beef obtained from cattle of beef breeds. Glavnyj zootehnik. 2022;8(229):3-10. (In Russ.)]. doi: 10.33920/sel-03-2208-01
3. Амперометрическое детектирование антиоксидантной активности модельных и биологических жидкостей / А.А. Савина и др. // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2020. Т. 61. №. 6. С. 429-437. [Savina AA, et al. Amperometric detection of antioxidant activity of model and biological fluids. Moscow University Chemistry Bulletin. 2020;61(6):429-437. (In Russ.)].
4. Арутюнянц А.А., Лохов Р.Е., Саламова Н.А. Изучение антиоксидантной активности аминокислот // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19. № 1. С. 169-171. [Arutyunyants AA, Lokhov RE, Salamova NA. The study of antioxidant activity of amino acids. Bashkir Chemical Journal. 2012;19(1):169-171. (In Russ.)].

5. Бородина О.В., Шмат Е.В. Характеристика пищевой ценности говядины и свинины // Перспективы производства продуктов питания нового поколения: материалы Всерос. науч.-практ. конф., (г. Омск, 13-14 апр. 2017 г.). Омск: ОГАУ им. П.А. Столыпина, 2017. С. 524-526. [Borodina OV, Shmat EV. Characteristics of nutrition value of beef and pork (Conference proceedings). Perspektivy proizvodstva produktov pitaniya novogo pokoleniya: materialy Vserossijskoj nauch.-prakt. konf., (g. Omsk, 13-14 apr. 2017 g.). Omsk: OGAU im. P.A. Stolypina; 2017:524-526. (In Russ.)].
6. Влияние разных технологий содержания на качественные показатели мяса чистопородных и помесных бычков / А.И. Отаров и др. // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 2. С. 52-62. [Otarov AI et al. The influence of different keeping technologies on meat quality indicators of purebred and crossbred bulls. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023; 106(2):52-62. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-2-52
7. Горлов Н.Ф., Тихонов С.Л., Тихонова Н.В. Стрессоустойчивость как фактор формирования качества мяса с нехарактерным ходом автолиза // Индустрия питания. 2016. № 1(1). С. 44-53. [Gorlov NF, Tikhonov SL, Tikhonova NV. The quality of the meat from an uncharacteristic course of autolysis and stress. Food Industry. 2016;1(1):44-53. (In Russ.)].
8. ГОСТ 33319-2015. Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли влаги. Введ. 2016-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. 9 с. [GOST 33319-2015. Myaso i myasnye produkty. Metod opredeleniya massovoj doli vlagi; vved. 2016-07-01. Moscow: Standartinform; 2018:9. (In Russ.)].
9. ГОСТ 23042-2015. Мясо и мясные продукты. Методы определения жира. Введ. 2017-01-01. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с. [GOST 23042-2015. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya zhira; vved. 2017-01-01. Moscow: Standartinform; 2016:11. (In Russ.)].
10. ГОСТ 31727-2012. Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли общей золы. Введ. 2013-07-01. М.: Стандартинформ, 2013. 12 с. [GOST 31727-2012. Myaso i myasnye produkty. Metod opredeleniya massovoj doli obshchej zoly; vved. 2013-07-01. Moscow: Standartinform; 2013:12. (In Russ.)].
11. ГОСТ Р 55573-2013 Мясо и мясные продукты. Определение кальция атомно-абсорбционным и титриметрическим методами. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с. [GOST R 55573-2013 Myaso i myasnye produkty. Opredelenie kal'ciya atomno-absorbcionnym i titrimetricheskimi metodami; vved. 2015-01-01. Moscow: Standartinform; 2014:12. (In Russ.)].
12. ГОСТ 9794-2015. Продукты мясные. Методы определения содержания общего фосфора. Введ. 2017-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с. [GOST 9794-2015. Produkty myasnye. Metody opredeleniya sodержaniya obshchego fosfora; vved. 2017-01-01. Moscow: Standartinform; 2019:12. (In Russ.)].
13. ГОСТ 33424-2015. Мясо и мясные продукты. Определение магния методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии. Введ. 2016-07-01. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с. [GOST 33424-2015. Myaso i myasnye produkty. Opredelenie magniya metodom plamennoj atomno-absorbcionnoj spektrometrii; vved. 2016-07-01. Moscow: Standartinform; 2016:11. (In Russ.)].
14. Джуламанов К.М., Макаев Ш.А., Герасимов Н.П. Влияние генотипов быков по генам CAPN1, CAST и TG5 на аминокислотный и жирнокислотный составы мяса у потомков казахской белоголовой породы // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 4. С. 74-84. [Dzhulamanov KM, Makaev ShA, Gerasimov NP. Influence of bull genotypes by genes CAPN1, CAST and TG5 on amino acid and fatty acid compositions of meat in descendants of the Kazakh white-headed breed. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(4):74-84. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-74
15. Динамика химического состава и технологических свойств мяса / А.В. Козликин и др. // Ветеринарная патология. 2019. № 2(68). С. 80-85. [Kozlikin AV, et al. Dynamics of chemical composition and technological properties of meats. Russian Journal of Veterinary Pathology. 2019;2(68):80-85. (In Russ.)].

16. Идентификация генов, ассоциированных с цветовыми характеристиками мясной и жировой ткани скота абердин-ангусской породы / А.А. Белоус и др. // Аграрная наука. 2024. № 6. С. 68-76. [Belous AA, et al. Identification of genes associated with color characteristics of meat and fat tissue of aberdeen-angus cattle. Agrarian Science. 2024;6:68-76. (*In Russ.*)]. doi: 10.32634/0869-8155-2024-383-6-68-76
17. Изменение аминокислотного состава говядины при концентратном откорме крупного рогатого скота / В.Д. Кабанов и др. // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 3. С. 63-37. [Kabanov VD, et al. Change in amino acids compositions of beef with concentrated fattening of cattle. Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2019;3:63-67. (*In Russ.*)]. doi: 10.30850/vrsn/2019/3/63-67
18. Изучение полноценности белков в разных типах мышц говядины / Н. Л. Вострикова и др. // Все о мясе. 2013. № 2. С. 34-38. [Vostrikova NL, et al. Investigations of proteins' usefulness in the different types of beef's muscles. Vsyo o Myase. 2013;2:34-38. (*In Russ.*)].
19. Калюжная Т.В., Орлова Д.А., Карпенко Л.Ю. Зависимость пищевой ценности мяса от категории качества // Международный вестник ветеринарии. 2023. № 2. С. 156-160. [Kalyuzhnaya TV, Orlova DA, Karpenko LYu. Dependence of the nutritional value of meat on the quality category. International Bulletin of Veterinary Science. 2023;2:156-160. (*In Russ.*)]. doi: 10.52419/issn2072-2419.2023.2.156
20. Кудряшов Л.С. Созревание и посол мяса. Кемерово: Кузбассвуиздат, 1992. 206 с. [Kudryashov LS. Sozrevanie i posol mjasa. Kemerovo: Kuzbassvuzdat; 1992:206 p. (*In Russ.*)].
21. Кудряшов Л.С., Кудряшова О.А. Влияние стресса животных на качество мяса // Мясная индустрия. 2012;1:8-11. [Kudryashov LS, Kudryashova OA. Vliyanie stressa zhivotnyh na kachestvo mjasa. Meat Industry. 2012;1:8-11. (*In Russ.*)].
22. Лебедева С.Н., Жамсаранова С.Д. Оценка антиоксидантного потенциала мясных продуктов и сырья // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2016. № 3(60). С. 39-45. [Lebedeva SN, Zhamsaranova SD. The assessment of antioxidant potential of meat products. Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management. 2016;3(60):39-45. (*In Russ.*)].
23. Микроструктура мышечной ткани у гибридных свиней (*Sus scrofa domesticus* L.) при интенсивном откорме под влиянием адаптогенов / А.А. Семенова и др. // Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58. №2. С. 355-372. [Semenova AA, et al. Effect of adaptogens on muscle tissue microstructure of hybrid pigs (*Sus scrofa domesticus* L.) during intensive fattening. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2023;58(2):355-372. (*In Russ.*)]. doi: 10.15389/agrobiology.2023.2.355rus doi: 10.15389/agrobiology.2023.2.355eng
24. Оценка продуктивных качеств и элементного статуса бычков калмыцкой породы различных генотипов по гену гормона роста / А.Н. Фролов и др. // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 1. С. 62-73. [Frolov AN et al. Assessment of the productive qualities and elemental status of bulls (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):62-73. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-62
25. Abou-Kassem DE, et al. Influences of total sulfur amino acids and photoperiod on growth, carcass traits, blood parameters, meat quality and cecal microbial load of broilers. Saudi Journal of Biological Sciences. 2022;29(3):1683-1693. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.10.063
26. Abubakar AA, et al. Effects of stocking and transport conditions on physicochemical properties of meat and acute-phase proteins in cattle. Foods. 2021;10(2):252. doi: 10.3390/foods10020252
27. Bi YZ, et al. High freezing rate improves flavor fidelity effect of hand grab mutton after short-term frozen storage. Frontiers in Nutrition. 2022;9:959824. doi: 10.3389/fnut.2022.959824
28. Dong F, et al. Fusion of spectra and texture features of hyperspectral imaging for quantification and visualization of characteristic amino acid contents in beef. LWT. 2024;206:116576. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116576

29. Jiang S, et al. Characterization of stewed beef by sensory evaluation and multiple intelligent sensory technologies combined with chemometrics methods. Food Chemistry. 2023;408:135193. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.135193
30. Karau A, Grayson I. Amino acids in human and animal nutrition. In: Zorn H, Czermak P (editors). Biotechnology of food and feed additives. 2014;143:189-228. doi: 10.1007/10_2014_269
31. Matarneh SK, Silva SL, Gerrard DE. New insights in muscle biology that alter meat quality. Annual Review of Animal Biosciences. 2021;9(1):355-377. doi: 10.1146/annurev-animal-021419-083902
32. Pal Choudhuri S, Delay RJ, Delay ER. L-amino acids elicit diverse response patterns in taste sensory cells: a role for multiple receptors. PLoS One. 2015;10(6):e0130088. doi: 10.1371/journal.pone.0130088
33. Salami SA, et al. Fatty acid composition, shelf-life and eating quality of beef from steers fed corn or wheat dried distillers' grains with solubles in a concentrate supplement to grass silage. Meat Science. 2021;173:108381. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108381
34. Zhang Y, et al. Effects of protein grass hay as alternative feed resource on lamb's fattening performance and meat quality. Meat Science. 2024;218:109644. doi: 10.1016/j.meatsci.2024.109644

References

1. Alekseeva EI, Sukhanova SF. The quality of meat obtained from animals of the Gereford and Aberdin-angus breeds. Innovations and food security. 2017;4:20-25.
2. Alekseeva EI, Leshchuk TL, Lushnikov NA, Kostomakhin NM. Amino acid composition of beef obtained from cattle of beef breeds. Chief Zootechnician. 2022;8(229):3-10. doi: 10.33920/sel-03-2208-01
3. Savina AA, et al. Amperometric detection of antioxidant activity of model and biological fluids. Moscow University Chemistry Bulletin. 2020;61(6):429-437.
4. Arutyunyants AA, Lokhov RE, Salamova NA. The study of antioxidant activity of amino acids. Bashkir Chemical Journal. 2012;19(1):169-171.
5. Borodina OV, Shmat EV. Prospects for the production of new generation food products: (Conference proceedings) Proc. of the All-Russian scientific and practical conf., (Omsk, April 13-14, 2017). Omsk: OGAU named after P.A. Stolypin; 2017:524-526.
6. Otarov AI et al. The influence of different keeping technologies on meat quality indicators of purebred and crossbred bulls. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(2):52-62. doi: 10.33284/2658-3135-106-2-52
7. Gorlov NF, Tikhonov SL, Tikhonova NV. The quality of the meat from an uncharacteristic course of autolysis and stress. Food Industry. 2016;1(1):44-53.
8. State Standard 33319-2015. Meat and meat products. Method for determining the mass fraction of moisture. Implementation date 2016-07-01. Moscow: Standartinform; 2018:9.
9. State Standard 23042-2015. Meat and meat products. Methods for determining fat. Implementation date 2017-01-01. M.: Standartinform; 2016:11.
10. State Standard 31727-2012. Meat and meat products. Method determination of the mass fraction of total ash. Implementation date 2013-07-01. Moscow: Standartinform; 2013:12.
11. State Standard R 55573-2013 Meat and meat products. Determination of calcium by atomic absorption and titrimetric methods. Implementation date 2015-01-01. Moscow: Standartinform; 2014:12.
12. State Standard 9794-2015. Meat products. Methods for determining the content of total phosphorus. Implementation date 2017-01-01. Moscow: Standartinform; 2019:12.
13. State Standard 33424-2015. Meat and meat products. Determination of magnesium by flame atomic absorption spectrometry. Implementation date 2016-07-01. Moscow: Standartinform; 2016:11.

14. Dzhulamanov KM, Makaev ShA, Gerasimov NP. Influence of bull genotypes by genes CAPN1, CAST and TG5 on amino acid and fatty acid compositions of meat in descendants of the Kazakh white-headed breed. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(4):74-84. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-74
15. Kozlikin AV, et al. Dynamics of chemical composition and technological properties of meats. *Russian Journal of Veterinary Pathology*. 2019;2(68):80-85.
16. Belous AA, et al. Identification of genes associated with color characteristics of meat and fat tissue of aberdeen-angus cattle. *Agrarian science*. 2024;6:68-76. doi: 10.32634/0869-8155-2024-383-6-68-76
17. Kabanov VD, et al. Change in amino acids compositions of beef with concentrated fattening of cattle. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019;3:63-67. doi: 10.30850/vrsn/2019/3/63-67
18. Vostrikova NL, et al. Investigations of proteins' usefulness in the different types of beef's muscles. *All About Meat*. 2013;2:34-38.
19. Kalyuzhnaya TV, Orlova DA, Karpenko LYu. Dependence of the nutritional value of meat on the quality category. *International Bulletin of Veterinary Science*. 2023;2:156-160. doi: 10.52419/issn2072-2419.2023.2.156
20. Kudryashov LS. Ageing and salting of meat. Kemerovo: Kuzbassvuzdat; 1992:206 p.
21. Kudryashov LS, Kudryashova OA. Effect of animal stress on meat quality. *Meat Industry*. 2012;1:8-11.
22. Lebedeva SN, Zhamsaranova SD. The assessment of antioxidant potential of meat products. *Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management*. 2016;3(60):39-45.
23. Semenova AA, et al. Effect of adaptogens on muscle tissue microstructure of hybrid pigs (*Sus scrofa domestica* L.) during intensive fattening. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2023;58(2):355-372. doi: 10.15389/agrobiol.2023.2.355eng
24. Frolov AN et al. Assessment of the productive qualities and elemental status of bulls. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022; 105(1):62-73. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-62
25. Abou-Kassem DE, et al. Influences of total sulfur amino acids and photoperiod on growth, carcass traits, blood parameters, meat quality and cecal microbial load of broilers. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2022;29(3):1683-1693. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.10.063
26. Abubakar AA, et al. Effects of stocking and transport conditions on physicochemical properties of meat and acute-phase proteins in cattle. *Foods*. 2021;10(2):252. doi: 10.3390/foods10020252
27. Bi YZ, et al. High freezing rate improves flavor fidelity effect of hand grab mutton after short-term frozen storage. *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:959824. doi: 10.3389/fnut.2022.959824
28. Dong F, et al. Fusion of spectra and texture features of hyperspectral imaging for quantification and visualization of characteristic amino acid contents in beef. *LWT*. 2024;206:116576. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116576
29. Jiang S, et al. Characterization of stewed beef by sensory evaluation and multiple intelligent sensory technologies combined with chemometrics methods. *Food Chemistry*. 2023;408:135193. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.135193
30. Karau A, Grayson I. Amino acids in human and animal nutrition. In: Zorn H, Czermak P (editors). *Biotechnology of food and feed additives*. 2014;143:189-228. doi: 10.1007/10_2014_269
31. Matarnah SK, Silva SL, Gerrard DE. New insights in muscle biology that alter meat quality. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2021;9(1):355-377. doi: 10.1146/annurev-animal-021419-083902
32. Pal Choudhuri S, Delay RJ, Delay ER. L-amino acids elicit diverse response patterns in taste sensory cells: a role for multiple receptors. *PLoS One*. 2015;10(6):e0130088. doi: 10.1371/journal.pone.0130088
33. Salami SA, et al. Fatty acid composition, shelf-life and eating quality of beef from steers fed corn or wheat dried distillers' grains with solubles in a concentrate supplement to grass silage. *Meat Science*. 2021;173:108381. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108381

34. Zhang Y, et al. Effects of protein grass hay as alternative feed resource on lamb's fattening performance and meat quality. Meat Science. 2024;218:109644. doi: 10.1016/j.meatsci.2024.109644

Информация об авторах:

Надежда Владимировна Боголюбова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, Городской округ Подольск, поселок Дубровицы, дом 60, сот.: 8-915-320-24-39.

Никита Сергеевич Колесник, младший научный сотрудник лаборатории фундаментальных основ питания сельскохозяйственных животных и рыб, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, Городской округ Подольск, поселок Дубровицы, дом 60, сот.: 8-915-320-24-39.

Павел Дмитриевич Лахонин, младший научный сотрудник лаборатории фундаментальных основ питания сельскохозяйственных животных и рыб, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, Городской округ Подольск, поселок Дубровицы, дом 60, сот. 8-915-320-24-39.

Николай Павлович Елаткин, кандидат биологических наук, генеральный директор ООО «Мираторг-генетика», 121205, г. Москва, ул. Нобеля (инновационного центра Сколково Тер), дом 5, сот.: 8-915-320-24-39.

Александр Александрович Николаев, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории ДНК-технологий в животноводстве, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, Городской округ Подольск, поселок Дубровицы, дом 60, сот.: 8-915-320-24-39.

Information about the authors:

Nadezhda V Bogolyubova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry – VIJ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy Podolsk Municipal District, 142132, Moscow Region, cell. 8-915-320-24-39.

Nikita S Kolesnik, Junior Researcher at the Laboratory of Fundamental Principles of Nutrition of farm animals and Fish, Federal Research Center of Animal Husbandry – VIJ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy Podolsk Municipal District, 142132, Moscow Region, cell. 8-915-320-24-39.

Pavel D Lakhonin, Junior Researcher at the Laboratory of Fundamental Principles of Nutrition of farm Animals and Fish, Federal Research Center for Animal Husbandry – VIZ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy Podolsk Municipal District, 142132, Moscow Region, cell. 8-915-320-24-39.

Nikolai P Elatkin, Cand. Sci. (Biology), General Director of Miratorg-Genetics LLC, Moscow, Nobelya St. (Skolkovo Innovation Centre ter), 5 building, 121205, cell. 8-915-320-24-39.

Alexander A Nikolaev, post-graduate student, Junior researcher at the Laboratory of DNA Technologies in Animal Husbandry, Federal Research Center of Animal Husbandry named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy Podolsk Municipal District, 142132, Moscow Region, cell. 8-915-320-24-39.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 28.10.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Научная статья

УДК 636.2

doi:10.33284/2658-3135-107-4-133

Производственный потенциал отрасли мясного скотоводства в России

Святослав Валерьевич Лебедев¹, Григорий Иванович Бельков², Роман Владимирович Костюк³,
Николай Павлович Герасимов⁴

¹²³⁴Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹lsv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

²orniish@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1122-9228>

³nspg-ru@yandex.ru

⁴nick.gerasimov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2295-5150>

Аннотация. Общее поголовье крупного рогатого скота мясных пород в мире составляет 325 млн голов, производство говядины оценивается в 68,3 млн тонн. По прогнозам потребление говядины к 2031 году достигнет 76 млн тонн. Целью исследования являлась оценка текущего состояния отрасли мясного скотоводства и анализ производственного потенциала говядины в России. Россия располагает значительными ресурсами для наращивания объемов производства говядины как для внутреннего потребления, так и для реализации на экспорт. Потенциал экспорта говядины составляет 75-80 тыс. т ежегодно. Сдерживающими факторами для развития отечественной отрасли мясного скотоводства являются ежегодное сокращение поголовья крупного рогатого скота, низкая кормообеспеченность, обуславливающая невысокую живую массу при убойе животных, недостаточная интенсивность воспроизводства в товарных стадах. Решение этих проблем определяется уровнем поддержки отрасли со стороны Правительства России, способной повысить привлекательность инвестиций.

Ключевые слова: мясное скотоводство, производство говядины, откормочные хозяйства, поголовье

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2023-2025 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2022-0018).

Для цитирования: Производственный потенциал отрасли мясного скотоводства в России / С.В. Лебедев, Г.И. Бельков, Р.В. Костюк, Н.П. Герасимов // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 133-143. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-133>

Original article

Production potential of the beef cattle breeding industry in Russia

Svyatoslav V Lebedev¹, Grigory I Belkov², Roman V Kostyuk³, Nikolay P Gerasimov⁴

¹²³⁴Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹lsv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

²orniish@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1122-9228>

³nspg-ru@yandex.ru

⁴nick.gerasimov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2295-5150>

Abstract. The total number of beef cattle in the world is 325 million, with beef production estimated at 68.3 million tonnes. Beef consumption is expected to reach 76 million tonnes by 2031. The purpose of the study was to assess the current state of the beef cattle industry and to analyze the potential for beef production in Russia. Russia has significant resources to increase beef production for both domestic

consumption and export. The potential for beef exports is 75-80 thousand tonnes per year. Deterrent factors for the development of the domestic beef cattle industry are the annual decrease in the number of cattle, low fodder supply, resulting in low live weight of animals at slaughter, insufficient intensity in reproduction of commercial herds. The solution to these problems depends on the level of support for the industry from the Russian government, which can increase the attractiveness of the industry for investors.

Key words: beef cattle breeding, beef production, feedlots, livestock

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2023-2025 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2022-0018).

For citation: Lebedev SV, Belkov GI, Kostyuk RV, Gerasimov NP. Production potential of the beef cattle breeding industry in Russia. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):133-143. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-133>

Введение.

Говядина является важным и ценным в питательном отношении продуктом в рационе человека. Уровень производства говядины по странам мира во многом определяется доступными кормовыми ресурсами и технологией организации отрасли мясного скотоводства (Pe'cina M et al., 2023). Потребление говядины обуславливается социологическими, религиозными, культурными, экономическими и другими факторами. Всего в мире насчитывается 1,51 миллиарда голов крупного рогатого скота, из которых 325 миллионов разводится по технологии специализированного мясного производства, а производство говядины оценивается в 68,3 млн тонн, что составляет 20,3 % от общего производства мяса (336,6 млн тонн). Среднегодовое потребление говядины в мире составляет 9,1 кг на душу населения, варьируясь от 4,72 (Азия) до 36,1 кг в Северной Америке (FAO, 2021). В некоторых странах, таких как Аргентина, годовое потребление говядины достигает 36,9 кг на человека. Следует отметить, что существенную роль для производства различных категорий говядины играет убой молочного скота (мясо от выбракованных коров и сверхремонтного молодняка), а также местных аборигенных пород (Smith S et al., 2018; Хайнацкий В.Ю., 2022).

Говядина – богатый источник белка, жира и целого ряда важнейших макро- и микроэлементов. Однако, мясная промышленность, являясь важной частью мировой экономики, вносит существенный вклад в региональную, национальную и международную торговлю (Bordbar et al., 2022; Ghotbaldini et al., 2019), и будущее специализированной отрасли мясного скотоводства также имеет множество путей своего развития (Masoudzadeh et al., 2020; Shahsavari et al., 2021). На региональном и глобальном уровнях сдерживающим фактором стабильного роста производства говядины является значительный экологический след при разведении крупного рогатого скота из-за выбросов парниковых газов. Но поскольку люди предъявляют спрос на вкусные и полноценные продукты питания, система производства говядины в ближайшие несколько лет не изменится (Mohammadabadi M et al., 2021).

В настоящее время в России сложилась ситуация острой необходимости развития мясного скотоводства, как важного источника пополнения мясного баланса страны высококачественной говядиной (Шичкин Г.И. и др., 2021; Дускаев Г.К. и др., 2022).

Цель исследования.

Провести анализ текущего состояния отрасли мясного скотоводства и определить потенциал производства говядины в России.

Материал и методы исследования.

При подготовке анализа использованы находящиеся в открытом доступе статистические материалы Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых Наций (ФАО), Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), Информационно-аналитического агентства ЕМЕАТ, Территориальных органов Федеральной службы государственной статистики России.

Результаты исследования и их обсуждение.

Объём рынка говядины к 2031 году составит 76 млн тонн, то есть прогнозируется (ФАО) существенный рост производства на 8 % (или на 6 млн тонн). Главным образом увеличение спроса будет обеспечиваться Китайской Народной Республикой, текущее ежегодное потребление говядины в которой находится на уровне 7 кг на человека. Планируется довести этот показатель до 9 кг, что обусловливается повышением востребованности продуктов из говядины за предыдущие 6 лет на 32 %. Рынок говядины в Китае на 25 % насыщается за счёт импорта, его доля показала двукратное увеличение (до 2,5 млн тонн) с 2018 года.

Производственный потенциал Северной Америки обеспечит рост предложения на рынке говядины лишь на 0,5 млн тонн. Ресурсы латиноамериканского макрорегиона существенно больше, он способен повысить производство на 11 % (около 2 млн тонн).

Сокращение поголовья крупного рогатого скота в Европейском союзе обеспечит снижение совокупного производства говядины на 8 %, что кроме прочего обусловливается замедлением внутреннего спроса на данный вид мяса (OECD).

Россия и Казахстан являются наиболее перспективными странами по экспортному потенциалу говядины. Так, в 2023 году Россия реализовала на внешний рынок 41 тыс. тонн говядины, а в текущем планируется увеличить этот показатель на 11 %. По данным отраслевой экспертизы, в российском экспорте мяса от крупного рогатого скота за десятилетний период наблюдается 16-кратный рост. Максимальные возможности России по поставкам говядины на внешние рынки оцениваются на уровне 75-80 тыс. тонн, что составляет в денежном выражении на \$450-480 млн ежегодно.

Продукция отечественного мясного скотоводства востребована преимущественно в Китае и Саудовской Аравии, их доля значительна и составляет 76 %. Кроме того, приоритетными рынками для экспорта являются страны СНГ и Персидского залива.

Однако перспективы экспорта отечественной говядины ограничиваются уровнем собственного производства, который в настоящее время заметно ниже внутреннего потребления, что вынуждает Россию ежегодно импортировать 0,28 млн тонн мяса от крупного рогатого скота. Так, по данным Кешабянц Э.Э. с коллегами (2023), в 2021 году потребление мяса и мясопродуктов в России в среднем составляло 93,8 кг на человека, что значительно (на 28,5 %) превышает рекомендуемую норму потребления (Приказ Минздрава Рос. Федерации от 19.08.2016 № 614). При этом существенную долю в структуре потребленного мяса занимает мясо птицы – 27,1 %, далее следует свинина – 16,8 %, а говядина в рационе занимает 9,6 % или 9,0 кг в год (Хатко З.Н. и Колодина Е.М., 2019). Таким образом, потребление говядины и телятины в России соответствует среднемировому уровню (9,1 кг).

В последнее десятилетие в отрасли фиксируется отрицательная тенденция в производственных показателях (рис. 1). Так, сокращение численности крупного рогатого скота в хозяйствах всех форм собственности за период 2022-2023 гг. составляло 0,8 %, достигнув 17,5 млн голов. Маточный контингент сократился на 0,6 %, составляя на январь 2023 года 7,7 млн коров. Эта тенденция устойчиво сохраняется на протяжении 15 лет. Количество коров специализированных мясных пород в России не превышает 1,3 млн голов.

Важным условием повышения производственного потенциала отрасли мясного скотоводства в перспективе будет являться создание условий для преодоления негативной тенденции сокращения поголовья крупного рогатого скота в личных подсобных хозяйствах, которое имело место за последнее десятилетие на уровне 2,3 млн голов. Несмотря на существенную долю личных подсобных хозяйств в общем объёме производства говядины, они ещё не в полной мере используют свои возможности (Винс М.С. и др., 2024).

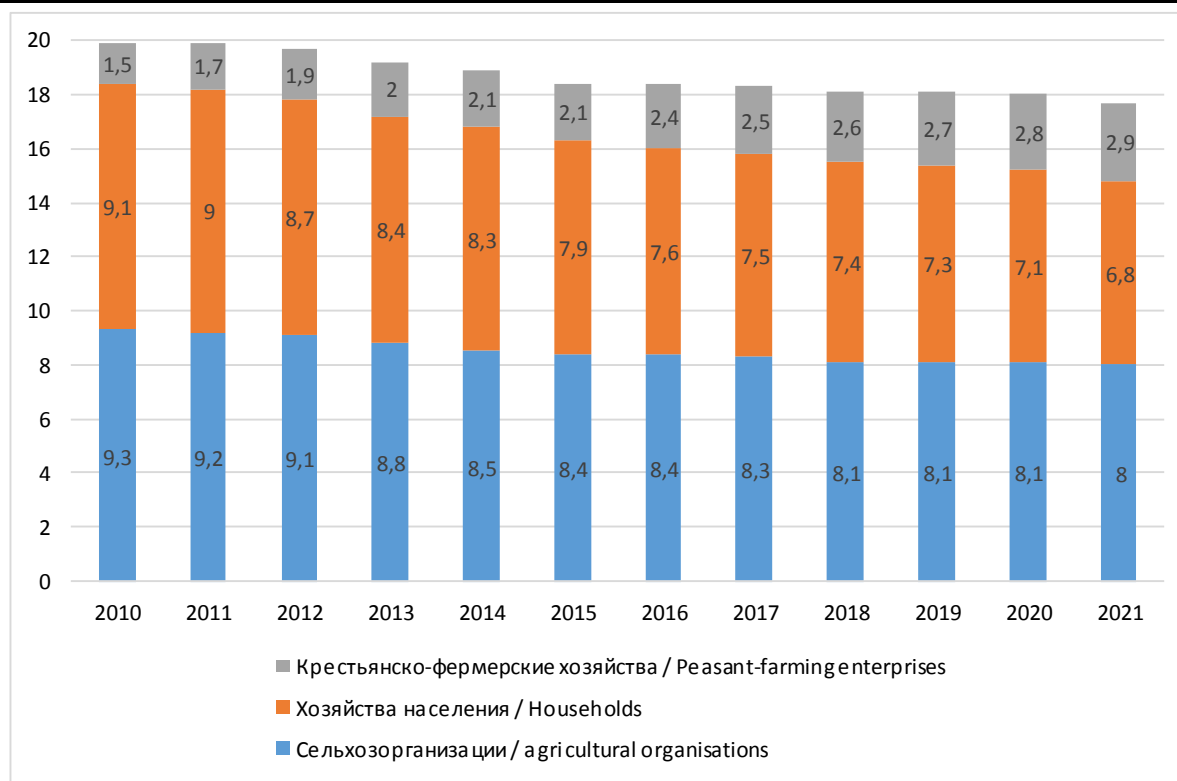


Рисунок 1. Поголовье крупного рогатого скота в Российской Федерации, млн голов
Figure 1. Cattle population in the Russian Federation, million head

Недостаток откормочного контингента крупного рогатого скота спровоцировал увеличение цен на говядину на 16,9 % (по данным ЕМЕАТ). Данный тренд совпадает с общемировой тенденцией роста цен на мясо в 2023 году.

Падение закупочных цен на молоко в 2023 г. обусловило снижение рентабельности в отечественном молочном скотоводстве, что позволило увеличить на 6 % производство говядины до 1,6 млн тонн. Рост производственных показателей в отрасли фиксируется во всех федеральных округах России (Кибкало Л.И. и др., 2022; Кулинцев В.В. и др., 2022). Максимальное повышение отмечалось в Центральном – на 21,2 тыс. т, Южном – на 5 тыс. т, Сибирском – на 4 тыс. т и Поволжском федеральном округе – на 3,4 тыс. т. В остальных регионах страны увеличение не превышало 1,6 тыс. т. Однако данную тенденцию следует чётко связывать с сокращением численности скота молочного направления продуктивности, что в дальнейшем неизбежно отразится на показателе выращивания откормочного контингента.

Значительное снижение маточного поголовья отмечено в Брянской области на 27 тыс. коров, а в Белгородской и Московской сокращение достигало 5 тыс. коров. Аналогичная динамика, но в меньшем масштабе, установлена в других субъектах РФ, в том числе в Воронежской, Орловской, Смоленской, Новосибирской областях, Республике Татарстан (рис. 2).

Среди всех хозяйств, ориентированных на разведение мясного скота, крупные предприятия с поголовьем более 500 коров составляют 147 единиц (рис. 3). При этом они располагают чуть менее 52 % общей численности животных, а доля средних и мелких хозяйств в структуре составляет 28,6 и 19,5 % соответственно.



Рисунок 2. Поголовье крупного рогатого скота по регионам России
 Figure 2. Cattle population in the regions of Russia

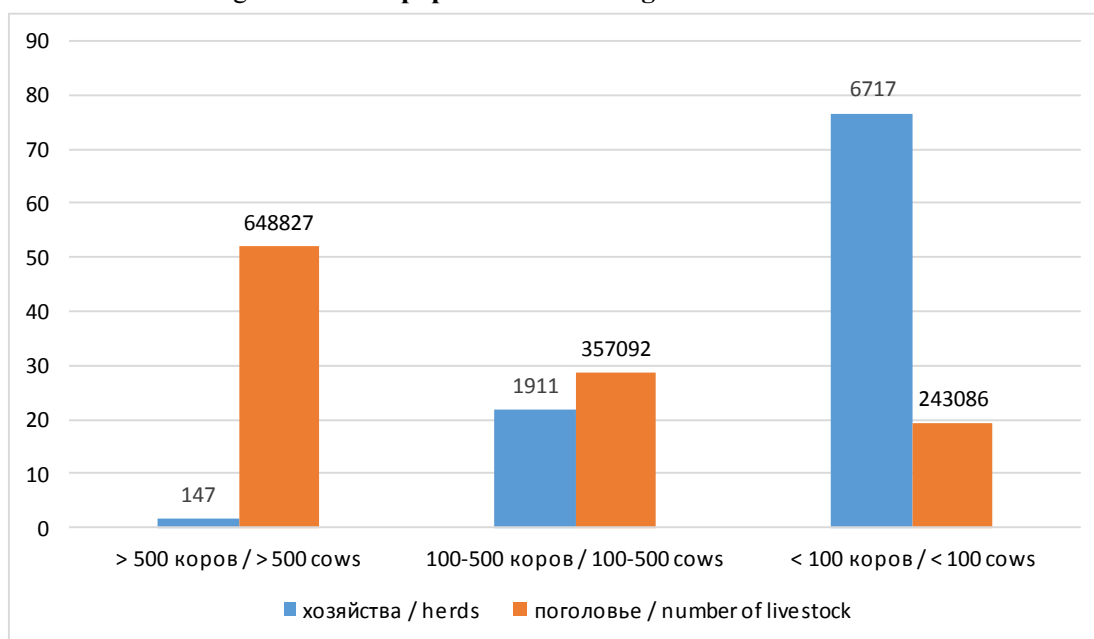


Рисунок 3. Структура отрасли мясного скотоводства в России (2023 г.)
 Figure 3. Structure of the beef cattle industry in Russia (2023)

Недостаточное финансирование не позволяет фермерам значительно нарастить поголовье, что ограничивает им доступ к рынкам сбыта скота. Нехватка откормочного контингента на площадках связана с проблемами в организации комплектования и подготовки партий молодняка (Ажмулдинов Е.А. и др., 2021). Следует отметить отсутствие эффективной инфраструктуры оборота скота вследствие невысокой рентабельности.

На фоне сокращения численности коров дополнительным сдерживающим фактором полноценного комплектования откормочных площадок и формирования сырьевой базы выступают низкие показатели воспроизводства племенных и товарных стад (Фролов А.Н. и др., 2021). Рентабельность в мясном скотоводстве достигается при выходе телят на уровне не менее 85 %, тогда как фактические показатели на предприятиях значительно меньше 80 %. Интенсивность роста молодняка в среднем по стране составляет 640 г, что недостаточно для экономически эффективного производства говядины. Живая масса отъёмных бычков может варьировать в широком диапазоне 180-240 кг, что обуславливается генетическим потенциалом и организационно-хозяйственными условиями (Абдулхаликов Р.З. и др., 2022). В отечественных стадах зачастую масса телят при отъёме приближается к нижней границе этого интервала, что сопровождается потерями при реализации 1 головы на уровне 9 тыс. руб.

Ещё одним сдерживающим фактором выступают недостаточные экономические стимулы развития отрасли, что в частности выражается в отсутствии дифференциации закупочных цен на сырьё, полученное от животных молочного и мясного направлений продуктивности (Горлов И.Ф. и др., 2022). Низкая категория упитанности молодняка при реализации на мясо на 10 % повышает затраты на убой и первичную обработку туш.

Большая часть крупнейших откормочных площадок и современные мясоперерабатывающие комплексы расположены в центральных регионах России, где вакцинация по ящуру не проводится. Это создаёт значительные логистические трудности при производстве говядины, так как регионализация страны по ящуру препятствует формированию устойчивого делового оборота крупного рогатого скота и межрегиональной кооперации фермеров с покупателями молодняка. В настоящий момент в России действуют менее 10 современных промышленных комплексов по откорму скота, но они не в состоянии использовать свои мощности и загрузить бесперебойный производственный процесс из-за острой нехватки откормочного контингента.

Следует иметь в виду, что усилия субъектов федерации по увеличению производства говядины в ущерб воспроизводству племенных и товарных стад и выращиванию молодняка нецелесообразны.

Современные мясоперерабатывающие предприятия мощностью свыше 100 тонн сконцентрированы в основном в Европейской части России (рис. 4).



Рисунок 4. Особенности организации убоя крупного рогатого скота по федеральным округам
Figure 4. Peculiarities of cattle slaughter organization by federal districts

Недостаточный объем инвестиций и государственной поддержки негативно сказывается на производственном потенциале отрасли мясного скотоводства. Говядина в условиях изменения спроса потребителей на недорогую продукцию и потери серьезной поддержки становится всё менее доступной и переходит в разряд непопулярных продуктов питания среди населения страны (Тарчоков Т.Т. и др., 2022).

Согласно указа Президента России В.В. Путина «О национальных целях развития России», к 2030 г. необходимо обеспечить рост сельскохозяйственного производства на 25 %. Также документ предусматривает индикаторный показатель в росте экспорта продукции не менее 1,5 раза относительно достижений 2021 г. Это значительно контрастирует с отрицательной тенденцией в воспроизводстве стад крупного рогатого скота.

Заключение.

В мире наблюдается повышение спроса на высококачественную говядину, который к 2031 году должен увеличиться на 8 % (на 6 млн т). Россия располагает значительными ресурсами для наращивания объемов производства говядины как для внутреннего потребления, так и для реализации на экспорт. Сдерживающими факторами для развития отечественной отрасли мясного скотоводства являются: ежегодное сокращение поголовья крупного рогатого скота, низкая кормообеспеченность, обуславливающая невысокую живую массу при убойе животных, недостаточная интенсивность воспроизводства в товарных стадах. Решение этих проблем определяется уровнем поддержки отрасли со стороны Правительства России, способной повысить привлекательность инвесторов. Потенциал экспорта говядины составляет 75-80 тыс. т ежегодно.

Список источников

1. Винс М.С., Третьякова Р.Ф., Каюмов Ф.Г. Эффективность разведения калмыцкого скота в Кабардино-Балкарии: анализ и перспективы // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107. № 2. С. 96-106. [Vince MS, Tretyakova RF, Kayumov FG. Efficiency of production of Kalmyk cattle in Kabardino-Balkaria: analysis and prospects. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(2):96-106. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-2-96
2. Влияние породной принадлежности на мясную продуктивность бычков и биологическую ценность получаемой от них говядины / И.Ф. Горлов, М.И. Сложенкина, Д.В. Николаев, Н.И. Мосолова, Е.В. Карпенко, О.П. Шахбазова, Р.Г. Раджабов, Д.А. Мосолова // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 3. С. 56-68. [Gorlov IF, Slozhenkina MI, Nikolaev DV, Mosolova NI, Karpenko EV, Shakhbazova OP, Radjabov RG, Mosolova DA. Influence of breed on beef productivity of bulls and biological value of beef obtained from them. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;105(3):56-68. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-56
3. Влияние транспортировки и сезона убой на качество мяса животных (обзор) / Е.А. Ажмулдинов, А.В. Харламов, М.А. Кизаев, М.Г. Титов // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 2. С. 33-45. [Azhmulinov EA, Kharlamov AV, Kizaev MA, Titov MG. The impact of transportation and the slaughter season on beef quality (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(2):33-45. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-104-2-33
4. Кибкало Л.И., Бугаев С.П., Бугаева О.А. Состояние и инновационное развитие мясного скотоводства в центрально-черноземном регионе // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 7. С. 135-138. [Kibkalo LI, Bugaev SP, Bugaeva OA. Status and innovative development of beef cattle breeding in the central black earth region. *Herald of Kursk State Agricultural Academy*. 2022;7:135-138 (*In Russ.*)].
5. Краткий обзор систем производства говядины в России и мире (обзор) / Г.К. Дускаев, А.В. Харламов, Г.И. Левахин, Е.А. Ажмулдинов, Х.А. Амерханов, С.А. Мирошников, А.Ф. Рысаев // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 3. С. 78-94. [Duskaev GK,

Kharlamov AV, Levakhin GI, Azhmuldinov EA, Amerkhanov KhA, Miroshnikov SA, Rysaev AF. Brief overview of beef production systems in Russia and the world (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):78-94. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-105-3-78

6. Кулинцев В.В., Суров А.И., Шевхужев А.Ф. Мясное скотоводство Ставропольского края // Молочное и мясное скотоводство. 2022. № 2. С. 6-11. [Kulintsev VV, Surov AI, Shevkhuzhev AF. Beef cattle breeding in the Stavropol territory. *Dairy and Beef Cattle Farming*. 2022;2:6-11 (*In Russ.*). doi: 10.33943/MMS.2022.14.31.001

7. Об утверждении Рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания: приказ Минздрава Рос. Федерации от 19.08.2016 № 614 (с изменениями от 30.12.2022 года № 821). [Ob utverzhdenii Rekomendacij po racional'nym normam potreblenija pishhevyh produktov, otvechajushhih sovremennym trebovanijam zdorovogo pitaniya: prikaz Minzdrava Ros. Federacii ot 19.08.2016 № 614 (s izmenenijami ot 30.12.2022 goda № 821). (*In Russ.*).

8. Оценка адаптационных качеств герефордского скота импортной селекции к условиям Южно-Уральской биогеохимической провинции на основе изучения репродуктивных качеств и биохимических показателей сыворотки крови / А.Н. Фролов, О.А. Завьялов, А.В. Харламов, Г.А. Морган, И.М. Дунин // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 4. С. 79-88. [Frolov AN, Zavyalov OA, Kharlamov AV, Morgan GA, Dunin IM. Assessment of the adaptation qualities of Hereford livestock of imported breeding to the conditions of the South Ural biogeochemical province based on the study of reproductive qualities and biochemical values of blood serum. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(4):79-88. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-104-4-79

9. Потребление мяса и мясных продуктов в Российской Федерации: ретроспективный анализ и реалии сегодняшнего дня / Э.Э. Кешабянц, Н.Н. Денисова, М.С. Андропова, Е.А. Смирнова // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2023. Т. 31. № 2. С. 47-55. [Keshabyants EE, Denisova NN, Andronova MS, Smirnova EA. Consumption of meat and processed meats in the Russian Federation: A retrospective analysis and current realities. *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2023;31(2):47-55. (*In Russ.*). doi: 10.35627/2219-5238/2023-31-2-47-55

10. Производство говядины: состояние и перспективы / Г.И. Шичкин, С.В. Лебедев, Р.В. Костюк, Д.Г. Шичкин // Молочное и мясное скотоводство. 2021. № 8. С. 2-5. [Shichkin GL, Lebedev SV, Kostyuk RV, Shichkin DG. Beef manufacture: condition and prospects. *Dairy and Beef Cattle Farming*. 2021;8:2-5. (*In Russ.*). doi: 10.33943/MMS.2021.33.85.001

11. Современные технологии производства говядины / Т.Т. Тарчоков, В.Н. Приступа, Д.С. Торосян, К.С. Савенков, О.А. Рудометкина // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2022. № 4(38). С. 57-64. [Tarchokov TT, Pristupa VN, Torosyan DS, Savenkov KS, Rudometkina OA. Modern beef production technologies. *Izvestia of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;3(38):57-64. (*In Russ.*). doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-57-64

12. Хайнацкий В.Ю. Инфраструктура мясного скотоводства // Молочное и мясное скотоводство. 2022. № 5. С. 3-8. [Khainatsky VYu. Beef cattle breeding infrastructure. *Dairy and Beef Cattle Farming*. 2022;5:3-8. (*In Russ.*). doi: 10.33943/MMS.2022.65.86.001

13. Хатко З.Н., Колодина Е.М. Анализ потребления мясных и рыбных продуктов различными группами населения // Новые технологии. 2019. Вып. 1(47). С. 216-229. [Khatko ZN, Kolodina EM. Analysis of meat and fish products consumption by different population groups. *New Technologies (Majkop)*. 2019;1(47):216-229. (*In Russ.*). doi: 10.24411/2072-0920-2019-10122

14. Экономическая эффективность использования высокой энергии роста бычков / Р.З. Абдулхаликов, М.М. Шахмурзов, Т.Т. Тарчоков, А.Ф. Шевхужев // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2022. № 3(37). С. 58-65. [Abdulkhalikov RZ, Shakhmurzov MM, Tarchokov TT, Shevkhuzhev AF. Economic efficiency of using high energy of bulls' growth. *Izvestia of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;3(37):58-65. (*In Russ.*). doi: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-58-65

15. Bordbar F, Mohammadabadi M, Jensen J, Xu L, Li J, Zhang L. Identification of candidate genes regulating carcass depth and hind leg circumference in simmental beef cattle using illumina bovine beadchip and next-generation sequencing analyses. *Animals*. 2022;12(9):1103. doi: 10.3390/ani12091103
16. FAO. World Food and Agriculture—Statistical Yearbook 2021. Rome. [Internet] Available from: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb4477en> (cited 2024 July 5).
17. Ghotbaldini H, Mohammadabadi M, Nezamabadi-pour H, Babenko OI, Bushtuk MV, Tkachenko SV. Predicting breeding value of body weight at 6-month age using Artificial Neural Networks in Kermani sheep breed. *Acta Sci Animal Sci*. 2019;41(1):45282. doi: 10.4025/actascianimsci.v41i1.45282
18. Masoudzadeh SH, Mohammadabadi M, Khezri A, Stavetska RV, Oleshko VP, Babenko OI, Yemets Z, Kalashnik OM. Effects of diets with different levels of fennel (*Foeniculum vulgare*) seed powder on DLK1 gene expression in brain, adipose tissue, femur muscle and rumen of Kermani lambs. *Small Ruminant Res*. 2020;193:106276. doi: 10.1016/j.smallrumres.2020.106276
19. Mohammadabadi M, Bordbar F, Jensen J, Du M, Guo W. Key genes regulating skeletal muscle development and growth in farm animals. *Animals (Basel)*. 2021;11(3):835. doi: 10.3390/ani11030835
20. OECD. Meat Consumption (Indicator). [Internet] Available from: <https://www.oecd.org/en/data/indicators/meat-consumption.html> (cited 2024 July 5).
21. Pećina M, Konjačić M, Ugarković NK, Ivanković A. Effect of FASN, SCD, and GH Genes on Carcass Fatness and Fatty Acid Composition of Intramuscular Lipids in F1 Holstein × Beef Breeds. *Agriculture*. 2023;13(3):571. doi:10.3390/agriculture13030571
22. Shahsavari M, Mohammadabadi M, Khezri A, Asadi Fozi M, Babenko O, Kalashnyk O, Oleshko V, Tkachenko S. Correlation between insulin-like growth factor 1 gene expression and fennel (*Foeniculum vulgare*) seed powder consumption in muscle of sheep. *Anim Biotechnol*. 2021;34(4):882-892. doi: 10.1080/10495398.2021.2000997
23. Smith S, Gotoh T, Greenwood P. Current situation and future prospects for global beef production: overview of special issue. *Anim Biosci*. 2018;31(7):927-932. doi: 10.5713/ajas.18.0405

References

1. Vince MS, Tretyakova RF, Kayumov FG. Efficiency of production of Kalmyk cattle in Kabardino-Balkaria: analysis and prospects. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(2):96-106. doi: 10.33284/2658-3135-107-2-96
2. Gorlov IF, Slozhenkina MI, Nikolaev DV, Mosolova NI, Karpenko EV, Shakhbazonova OP, Radjabov RG, Mosolova DA. Influence of breed on beef productivity of bulls and biological value of beef obtained from them. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;105(3):56-68. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-56
3. Azhmuldinov EA, Kharlamov AV, Kizaev MA, Titov MG. The impact of transportation and the slaughter season on beef quality (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(2):33-45. doi: 10.33284/2658-3135-104-2-33
4. Kibkalo LI, Bugaev SP, Bugaeva OA. Status and innovative development of beef cattle breeding in the central black earth region. *Herald of Kursk State Agricultural Academy*. 2022;7:135-138.
5. Duskaev GK, Kharlamov AV, Levakhin GI, Azhmuldinov EA, Amerkhanov KhA, Miroshnikov SA, Rysaev AF. Brief overview of beef production systems in Russia and the world (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):78-94. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-78
6. Kulintsev VV, Surov AI, Shevkhuzhev AF. Beef cattle breeding in the Stavropol territory. *Dairy and Beef Cattle Farming*. 2022;2:6-11. doi: 10.33943/MMS.2022.14.31.001

7. On Approval of Recommendations on rational norms of food consumption that meet modern requirements of healthy nutrition: order of the Ministry of Health of the Russian Federation from 19.08.2016 № 614 (as amended from 30.12.2022 № 821).
8. Frolov AN, Zavyalov OA, Kharlamov AV, Morgan GA, Dunin IM. Assessment of the adaptation qualities of Hereford livestock of imported breeding to the conditions of the South Ural biogeochemical province based on the study of reproductive qualities and biochemical values of blood serum. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(4):79-88. doi: 10.33284/2658-3135-104-4-79
9. Keshabyants EE, Denisova NN, Andronova MS, Smirnova EA. Consumption of meat and processed meats in the Russian Federation: A retrospective analysis and current realities. *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2023;31(2):47-55. doi: 10.35627/2219-5238/2023-31-2-47-55
10. Shichkin GL, Lebedev SV, Kostyuk RV, Shichkin DG. Beef manufacture: condition and prospects. *Dairy and Beef Cattle Farming*. 2021;8:2-5. doi: 10.33943/MMS.2021.33.85.001
11. Tarchokov TT, Pristupa VN, Torosyan DS, Savenkov KS, Rudometkina OA. Modern beef production technologies. *Izvestia of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;3(38):57-64. doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-57-64
12. Khainatsky VYu. Beef cattle breeding infractructure. *Dairy and Beef Cattle Farming*. 2022;5:3-8. doi: 10.33943/MMS.2022.65.86.001
13. Khatko ZN, Kolodina EM. Analysis of meat and fish products consumption by different population groups. *New Technologies (Majkop)*. 2019;1(47):216-229. doi: 10.24411/2072-0920-2019-10122
14. Abdulkhalikov RZ, Shakhmurzov MM, Tarchokov TT, Shevkhuzhev AF. Economic efficiency of using high energy of bulls' growth. *Izvestia of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;3(37):58-65. doi: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-58-65
15. Bordbar F, Mohammadabadi M, Jensen J, Xu L, Li J, Zhang L. Identification of candidate genes regulating carcass depth and hind leg circumference in simmental beef cattle using illumina bovine beadchip and next-generation sequencing analyses. *Animals*. 2022;12(9):1103. doi: 10.3390/ani12091103
16. FAO. World Food and Agriculture—Statistical Yearbook 2021. Rome. [Internet] Available from: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb4477en> (cited 2024 July 5).
17. Ghotbaldini H, Mohammadabadi M, Nezamabadi-pour H, Babenko OI, Bushtruk MV, Tkachenko SV. Predicting breeding value of body weight at 6-month age using Artificial Neural Networks in Kermani sheep breed. *Acta Sci Animal Sci*. 2019;41(1):45282. doi: 10.4025/actascianimsci.v41i1.45282
18. Masoudzadeh SH, Mohammadabadi M, Khezri A, Stavetska RV, Oleshko VP, Babenko OI, Yemets Z, Kalashnik OM. Effects of diets with different levels of fennel (*Foeniculum vulgare*) seed powder on DLK1 gene expression in brain, adipose tissue, femur muscle and rumen of Kermani lambs. *Small Ruminant Res*. 2020;193:106276. doi: 10.1016/j.smallrumres.2020.106276
19. Mohammadabadi M, Bordbar F, Jensen J, Du M, Guo W. Key genes regulating skeletal muscle development and growth in farm animals. *Animals (Basel)*. 2021;11(3):835. doi: 10.3390/ani11030835
20. OECD. Meat Consumption (Indicator). [Internet] Available from: <https://www.oecd.org/en/data/indicators/meat-consumption.html> (cited 2024 July 5).
21. Pećina M, Konjačić M, Ugarković NK, Ivanković A. Effect of FASN, SCD, and GH Genes on Carcass Fatness and Fatty Acid Composition of Intramuscular Lipids in F1 Holstein × Beef Breeds. *Agriculture*. 2023;13(3):571. doi:10.3390/agriculture13030571
22. Shahsavari M, Mohammadabadi M, Khezri A, Asadi Fozzi M, Babenko O, Kalashnyk O, Oleshko V, Tkachenko S. Correlation between insulin-like growth factor 1 gene expression and fennel (*Foeniculum vulgare*) seed powder consumption in muscle of sheep. *Anim Biotechnol*. 2021;34(4):882-892. doi: 10.1080/10495398.2021.2000997
23. Smith S, Gotoh T, Greenwood P. Current situation and future prospects for global beef production: overview of special issue. *Anim Biosci*. 2018;31(7):927-932. doi: 10.5713/ajas.18.0405

Информация об авторах:

Святослав Валерьевич Лебедев, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-912-345-87-38.

Григорий Иванович Бельков, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, научный руководитель, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 8(3532)30-83-44.

Роман Владимирович Костюк, специалист по организации мясного скотоводства в лаборатории «Управление проектами», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29.

Николай Павлович Герасимов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник селекционно-генетического центра по мясным породам скота, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-912-358-96-17.

Information about the authors:

Svyatoslav V Lebedev, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-912-345-87-38.

Grigory I Belkov, Dr. Sci. (Agriculture), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave, Orenburg, 460051, tel.: 8(3532)30-83-44.

Roman V Kostyuk, Specialist in Beef Cattle Breeding Organization, Laboratory of Project Management, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

Nikolay P Gerasimov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Breeding and Genetic Center for Beef Cattle Breeds, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-912-358-96-17.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 22.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 144-155.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 144-155.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОРМЛЕНИЯ

Научная статья

УДК 636.085:636.088.5

doi:10.33284/2658-3135-107-4-144

Влияние новой пребиотической кормовой добавки на основе крахмального полисахарида на молочную продуктивность и качественные показатели получаемой продукции

Марина Ивановна Сложенкина^{1,9}, Иван Фёдорович Горлов^{2,10}, Татьяна Алексеевна Антипова³, Ольга Владимировна Кудряшова⁴, Елена Сергеевна Воронцова⁵, Светлана Андреевна Брехова⁶, Александр Какаевич Дурдыев⁷, Александра Алексеевна Сложенкина⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8}Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, Волгоград, Россия

^{9,10}Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

^{1,9}niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9542-5893>

^{2,10}niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8683-8159>

³niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0365-4806>

⁴kudryashova-niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6634-3685>

⁵esvoronts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0730-853X>

⁶sveta511518@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0763-4447>

⁷alex.durdyev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-9031-5463>

⁸niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5913-5303>

Аннотация. Как известно, полноценное сбалансированное кормление животных является одним из основополагающих моментов в повышении производства животноводческой продукции и её качественных показателей. Несомненная роль в этом принадлежит использованию в рационах кормления специальных кормовых добавок. В статье приводятся результаты исследований по установлению дозировки новой пребиотической кормовой добавки на основе крахмального полисахарида в рационе коров красной степной породы, её влиянию на молочную продуктивность и качество получаемого молока. По результатам исследований наиболее оптимальной выбрана дозировка добавки в количестве 80 г на голову в сутки. При скармливании данной добавки установлено повышение молочной продуктивности животных, а также качественных показателей молока (жира, белка и углеводов). Вырабатываемый из молока опытной группы животных кисломолочный продукт отличался лучшими органолептическими показателями и более высокими показателями пищевой ценности.

Ключевые слова: коровы, красная степная порода, рацион кормления, кормовая добавка, изомальтоолигосахарид, молочная продуктивность, показатели качества молока

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2023-2024 гг. ГНУ НИИММП (№ 1021051101432-7).

Для цитирования: Влияние новой пребиотической кормовой добавки на основе крахмального полисахарида на молочную продуктивность и качественные показатели получаемой продукции / М.И. Сложенкина, И.Ф. Горлов, Т.А. Антипова, О.В. Кудряшова, Е.С. Воронцова, С.А. Брехова, А.К. Дурдыев, А.А. Сложенкина // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 144-155. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-144>

THEORY AND PRACTICE OF FEEDING

Original article

Effect of a new prebiotic feed additive based on starch polysaccharide on dairy productivity and quality parameters of the obtained products

Marina I Slozhenkina^{1,9}, Ivan F Gorlov^{2,10}, Tatiana A Antipova³, Olga V Kudryashova⁴, Elena S Vorontsova⁵, Svetlana A Brekhova⁶, Aleksandr K Durdiev⁷, Aleksandra A Slozhenkina⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8}Volga Region Research Institute of Manufacture and Processing of Meat-and-Milk Production, Volgograd, Russia

^{9,10}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

^{1,9}niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9542-5893>

^{2,10}niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8683-8159>

³niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0365-4806>

⁴kudryashova-niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6634-3685>

⁵esvoronts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0730-853X>

⁶sveta511518@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0763-4447>

⁷alex.durdiev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-9031-5463>

⁸niimmp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5913-5303>

Abstract. As is known, complete balanced feeding of animals is one of the fundamental moments in increasing the production of livestock products and their quality indicators. The use of special feed additives in feeding rations plays an undoubted role in this. The article presents the results of studies on establishing the dosage of a new prebiotic feed additive based on starch polysaccharide in the diet of red steppe cows, its effect on milk productivity and the quality of the obtained milk. According to the research results, the most optimal dosage of the additive was chosen in the amount of 80 g per head per day. When feeding this additive, an increase in milk productivity of animals, as well as milk quality indicators (fat, protein and carbohydrates) was established. Better organoleptic indicators and higher nutritional value indicators distinguished the fermented milk product produced from the milk of the experimental group of animals.

Keywords: cows, Red Steppe breed, diet, feed additive, isomaltooligosaccharide, milk productivity, milk quality indicators

Acknowledgments: the work was completed in accordance to the plan of research works for 2023-2024 of State Scientific Institution Research Institute of Milk and Milk Processing (No. 1021051101432-7).

For citation: Slozhenkina MI, Gorlov IF, Antipova TA, Kudryashova OV, Vorontsova ES, Brekhova SA, Durdiev AK, Slozhenkina AA. Effect of a new prebiotic feed additive based on starch polysaccharide on dairy productivity and quality parameters of the obtained products. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):144-155. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-144>

Введение.

Приоритетным направлением развития АПК в России является повышение объёмов производства животноводческой продукции за счёт организации кормовой базы, включающей создание полноценных сбалансированных и экологически безопасных рационов кормления, улучшающих продуктивность животных и экономическую составляющую при их применении (Попов В.В., 2021).

Интенсификация молочного животноводства основывается на постоянном поиске методов оптимизации процесса кормления животных для достижения максимального уровня реализации их генетического потенциала, а также для получения продукции, обладающей высокими показателями качества (Шарипов Д.Р. и др., 2019; Брехова С.А. и др., 2024).

Современные условия производства животноводческой продукции и используемые технологии требуют новых научно обоснованных подходов в вопросах полноценного сбалансированного кормления животных. При этом определяющим фактором, влияющим на показатели молочной

продуктивности коров, считается оценка кормового рациона по обменной энергии, составной частью которого являются углеводные ингредиенты (Гречишников В. и др., 2024).

Наиболее ярким представителем данного класса является клетчатка, от уровня которой зависят такие показатели как потребление корма, переваримость и эффективность использования питательных веществ. Также клетчатка является компонентом, влияющим на нормализацию работы желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и стимулирующим деятельность кишечника (Кузьмина Л.Н. и Карташова А.П., 2020; Маслюк А.Н. и Токарева М.А., 2018; Худякова Х.К. и др., 2023).

Наиболее полному использованию животными питательных веществ рациона, а также улучшению работы их пищеварительной системы способствуют различные пищевые вещества, входящие в состав кормовых добавок (Шаабан М., 2023).

В данном контексте наиболее эффективными являются пребиотические добавки, всё чаще используемые в последние годы в кормлении крупного рогатого скота. Состав пребиотических добавок весьма разнообразен и включает множество ингредиентов (клетчатку, янтарную кислоту, жмыхи, витаминные и минеральные премиксы, олигосахариды и др.) для достижения максимальной эффективности при их применении.

В этой связи наибольший интерес исследователей вызывают полисахариды, к числу которых относятся олигосахариды, полученные из растительного сырья и обладающие пребиотической активностью, повышающие усвоение минеральных веществ, усиливающие устойчивость к различным заболеваниям и, как следствие, повышающие иммунитет (Ардатская М.Д., 2020; García-Núñez IM et al., 2022; Gourineni V et al., 2018; Madsen LR et al., 2017).

Учитывая незначительное количество научных публикаций, подтверждающих эффективность применения полисахаридов в рационах кормления различных сельскохозяйственных животных, проведение работ в данном направлении является своевременным и актуальным.

Цель исследований.

Изучение влияния новой кормовой добавки на основе крахмального полисахарида, используемой в рационе крупного рогатого скота, на показатели продуктивности и качество молока, а также произведённого из него кисломолочного продукта.

Материалы и методы исследований.

Объект исследования. Образцы молока, полученные от групп коров, питавшихся основным рационом и рационами, обогащёнными кормовой добавкой на основе крахмального полисахарида в различных дозировках. А также образцы кисломолочных продуктов, выработанные из молока, полученного от коров II опытной и контрольной групп.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Исследования проводились в ПЗК им. Ленина Суровикинского района, Волгоградской области. На комплексе были отобраны 4 группы коров красной степной породы методом пар-аналогов – контрольная, I, II и III опытные. Каждая группа формировалась с учётом возраста, живой массы тела, уровнем продуктивности и периода лактации в количестве по 15 голов в каждой.

Содержание каждой группы проводилось в равных условиях беспривязным способом. Кормление происходило по установленным нормам с учетом физиологических, возрастных и продуктивных особенностей.

Кормление животных контрольной группы проводилось стандартным рационом, установленным на предприятии, который рассчитывался с оптимальным количеством основных и концентрированных кормов, основываясь на индивидуальных потребностях и состоянии животных. Ко-

ров I опытной группы обеспечивали таким же рационом, но дополнительно обогащённым крахмальным полисахаридом (КП) в количестве 60 г на голову в сутки. Коров II опытной группы обеспечивали таким же рационом, но дополнительно обогащённым КП в количестве 80 г на голову в сутки. Коров III опытной группы обеспечивали таким же рационом, но дополнительно обогащённым КП в количестве 100 г на голову в сутки. Время проведения исследований – 90 дней.

Применяемая пребиотическая кормовая добавка (ГНУ НИИМП, г. Волгоград, Россия) представляла собой 100 %-ный изомальтоолигосахарид, получаемый биоконверсией кукурузного крахмала. Массовая доля сухих веществ составляет 94,0 %, в том числе углеводов 93,0 %; содержание растворимых пищевых волокон – 70,0 %.

Следующей частью научно-практического эксперимента являлась выработка и оценка качества двух образцов кисломолочных продуктов. Контрольный образец изготавливали из молока коров со стандартным рационом, а опытный – из молока коров II опытной группы, рацион которых был обогащён КП в количестве 80 г.

Выработка опытных образцов кисломолочных продуктов осуществлялась при строгом соблюдении температурных и иных технологических режимов соответствии со схемой, позволяющей получить стандартные по составу продукты с гарантированной безопасностью.

Исходное молоко очищали от механических примесей, подогревали до температуры +60 °С, гомогенизировали и пастеризовали при температуре +93 °С. Далее молоко охлаждали до температуры заквашивания +40 °С, вносили закваску в количестве, рекомендованном производителем, сквашивали до достижения требуемой кислотности 75°Т, перемешивали и охлаждали.

Для выработки продукта использовали симбиотическую заквасочную культуру, содержащую *Streptococcus thermophiles* и *Lactobacillus bulgaricus*, позволяющую получать продукт, обладающий мягким сливочным вкусом и ароматом, густой однородной консистенцией. Консорциум микроорганизмов, содержащихся в заквасочной культуре, способствует получению продукта не только с лучшими органолептическими параметрами, но и обладающего функциональной направленностью. Доказанная эффективность используемых пробиотических микроорганизмов позволяет использовать кисломолочный продукт в нормализации микробной экологии кишечника животных.

Оборудование и технические средства. Изучение качественных показателей получаемого молока проводили в комплексной аналитической лаборатории ГНУ НИИММП: массовую долю жира – по ГОСТ 5867-90, массовую долю белка – по ГОСТ 25179-2014, титруемую кислотность – по ГОСТ Р 54669-2011, плотность – по ГОСТ Р 54758-2011. В полученных образцах кисломолочных продуктов определяли показатели пищевой ценности: жир – по ГОСТ 5867-90, белок – по ГОСТ 34454-2018 (метод Кьельдаля), сухие вещества – по ГОСТ 3626-73; и микробиологические показатели – по ГОСТ 32901-2014. Технические средства и оборудование использовались в соответствии с требованиями, указанными в вышеобозначенной нормативно-технической документацией.

Статистическая обработка. Результаты исследований, приведённые в статье, обработаны при помощи математических статистических методов Плохинский А.П. (1970) с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) и обработкой данных в «Statistica 6.0» («Stat Soft Inc.», США).

Результаты исследований.

Оценка качества образцов молока. Результаты исследований молочной продуктивности лактирующих коров, показатели пищевой ценности производимого молока (жир, белок, углеводы), плотность и кислотность являются регламентирующими для производства молочных продуктов на перерабатывающих комплексах.

Результаты проведённых исследований свидетельствуют о положительном влиянии скормливаемой животным добавки на основе крахмального полисахарида на продуктивность и физико-химические показатели молока. Как видно из данных, представленных в таблице 1, по суточному удою молока животные I, II и III опытных групп превосходят своих аналогов контрольной группы на 1,0 кг или на 5,38 %, 1,6 кг или на 8,33 % ($P \geq 0,05$) и 1,8 кг или на 9,28 % ($P \geq 0,05$); массовой доли

жира – на 0,02, 0,04 и 0,06 %; массовой доли белка – на 0,02, 0,05 и 0,07 % ($P \geq 0,05$); массовой доли лактозы – на 0,06, 0,11 и 0,12 % соответственно. Расчёты показали, что молочного жира в I, II и III опытных группах было получено больше по сравнению с контрольной группой на 0,04 кг или на 5,48 %, 0,07 кг или на 9,21 % и 0,08 кг или на 10,39 %; молочного белка – на 0,03 кг или на 5,00 %, 0,06 кг, или на 9,52 % ($P \geq 0,05$) и 0,07 кг или на 10,94 % ($P \geq 0,01$) соответственно. Титруемая кислотность изменилась в опытных группах незначительно, однако, учитывая, что данный показатель является косвенным для оценки качества продукции, можно говорить в определённой степени о сбалансированности рациона кормления животных. Показатель плотности во всех опытных группах соответствовал требованиям, предъявляемым к сырью, что свидетельствует о высоком качестве молока, производимого животными (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические показатели молока коров опытных групп (n=5)

Table 1. Physicochemical parameters of milk from cows in experimental groups (n=5)

Наименование показателя/ <i>Indicator</i>	Значения показателей по группам животных/ <i>Values of indicators by groups of animals</i>			
	контрольная/ <i>control</i>	I опытная/ <i>I experimental</i>	II опытная/ <i>II experimental</i>	III опытная/ <i>III experimental</i>
Суточный удой, кг/ <i>Daily milk yield, kg</i>	17,60±0,42	18,60±0,40	19,20±0,36*	19,40±0,43*
Массовая доля жира, %/ <i>Mass fraction of fat, %</i>	3,93±0,02	3,95±0,02	3,97±0,03	3,99±0,02
Массовая доля белка, %/ <i>Mass fraction of protein, %</i>	3,22±0,02	3,24±0,01	3,27±0,03	3,29±0,01*
Массовая доля лактозы, %/ <i>Mass fraction of lactose, %</i>	4,64±0,17	4,70±0,20	4,75±0,16	4,76±0,18
Титруемая кислотность, °T/ <i>Titrate acidity, °T</i>	17,5±1,21	17,5±1,26	17,2±1,32	17,3±1,14
Плотность, кг/м³/ <i>Density, kg/m³</i>	1029,0±0,62	1029,5±0,46	1030,0±0,76	1029,5±0,41
Молочный жир, кг/ <i>Milk fat, kg</i>	0,69±0,02	0,73±0,03	0,76±0,03	0,77±0,04
Молочный белок, кг/ <i>Milk protein, kg</i>	0,57±0,01	0,60±0,01	0,63±0,02*	0,64±0,01**

Примечание: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$ Note: * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$

Повышение исследуемых показателей за изучаемый период является следствием нормализации обменных процессов в организме животного за счёт использования пребиотической кормовой добавки на основе крахмального полисахарида.

Наиболее высокие значения исследуемых показателей в течение проводимого опыта были отмечены в III опытной группе. Однако при сравнении показателей, достигнутых в опытных группах между собой, установлено, что наибольший процент повышения значений установлен во II опытной группе. Разница показателя суточного удоя между II и I опытными группами составила 3,13 %, а между III и II – 1,03%.

Аналогичную тенденцию можно отметить и в показателях «массовая доля белка» и «массовая доля лактозы», значения которых в III опытной группе отличались от показателей II опытной группы лишь на 0,02 % по белку и на 0,01 % – по лактозе. В соответствии с полученными результатами установлена целесообразность внесения кормовой добавки в рацион животных в количестве 80 г на голову, что также подтверждается экономическими расчетами.

Сравнительная оценка показателей качества кисломолочных продуктов. Из молока подопытных животных были выработаны кисломолочные продукты, широко используемых в питании населения различного возраста в соответствии с концепцией здорового питания. Особое

место данные продукты занимают в питании детей, как источник биологически полноценного легкоусвояемого белка, кальция и витамина В₂. Кисломолочные продукты характеризуются физиологическим эффектом в плане благоприятного влияния на кишечный микробиоценоз.

Готовые кисломолочные продукты исследованы по органолептическим, физико-химическим и микробиологическим показателям. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2. Показатели готовых кисломолочных продуктов
 Table 2. Indicators of finished fermented milk products

Показатель / Indicator	Характеристика образцов продуктов на основе молока контрольной и II опытной групп / Characteristics of samples of milk-based products from the control and II experimental groups	
	контрольный / control	опытный / experimental
Вкус и запах / Taste and smell	Чистый кисломолочный / pure fermented milk	
Цвет / Color	Белый с кремовым оттенком, равномерный по всей массе / white with a creamy shade, uniform throughout the mass	
Консистенция и внешний вид / Consistency and appearance	Однородная, плотная, с ненарушенным сгустком / uniform, dense, with an intact clot	
Массовая доля жира, % / Mass fraction of fat, %	3,9	4,0
Массовая доля белка, % / Mass fraction of protein, %	3,2	3,4
Титруемая кислотность, °Т / Titratable acidity, °T	75,5	80,0
Количество молочнокислых мик- роорганизмов, КОЕ в 1 г продукта / Number of lactic acid microorgan- isms, Colony-forming Units in 1 g of product	1×10 ⁷	1×10 ⁷

По основным показателям выработанные образцы продуктов соответствовали требованиям ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции» применительно к продукции для питания детей дошкольного и школьного возраста, согласно которому массовая доля жира в кисломолочных продуктах должна составлять 1,5-4,0 %; массовая доля белка – 2,0-5,0 %. В образцах исследуемых продуктов массовая доля жира находилась в пределах 3,9-4,0 %; массовая доля белка – 3,2-3,4 %. При этом следует отметить, что опытный образец превосходил контрольный по содержанию жира и белка соответственно на 0,1 и 0,2 %. Технологически обоснованным фактором при выработке образцов продуктов является установление наименьшего времени сквашивания опытного образца для достижения требуемой кислотности в пределах 25-30 мин, что очевидно связано с полноценностью состава белкового компонента. Содержание молочнокислых микроорганизмов в обоих образцах продукта составило не менее 1×10⁷.

Органолептические показатели выработанных образцов соответствовали требованиям, предъявляемым к кисломолочным продуктам. При оценке консистенции не отмечено такого фактора, как «отделение сыворотки», что чаще всего присутствует в продуктах такого рода. В образце продукта, выработанного из молока, полученного от коров, в рацион которых входила добавка на основе крахмального полисахарида, была отмечена наиболее полная вкусовая гамма и более плотная консистенция, которая сохранялась после перемешивания. Данный факт объясняется не только высоким содержанием белка в исходном молоке, но и возможно частичным переходом в молоко отдельных составных ингредиентов используемой добавки (рис. 1).

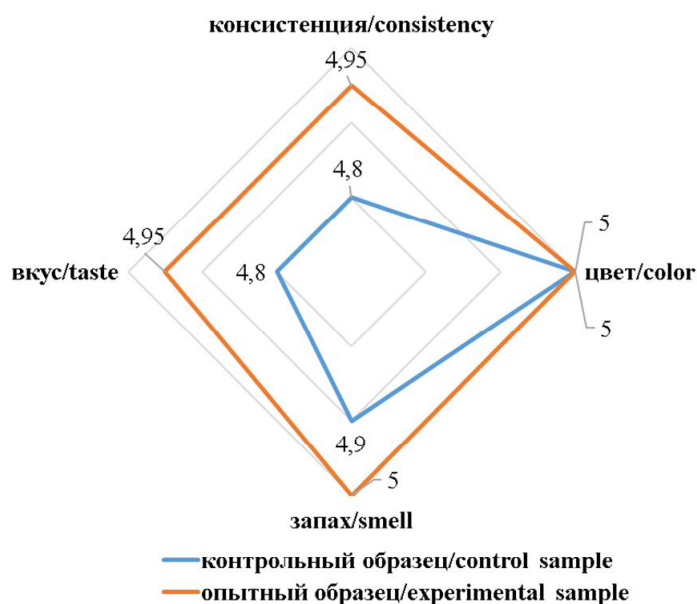


Рисунок 1. Органолептические показатели образцов кисломолочных продуктов
Figure 1. Organoleptic characteristics of fermented milk product samples

Обсуждение полученных результатов.

В российском скотоводстве молочного направления продуктивности пользуются спросом натуральные биологически активные добавки, так как совершенствование кормовой базы за счёт безопасных кормовых добавок стало обыденной практикой. Наличие в Волгоградской области предприятия ООО «НЬЮБИО», осуществляющего производства кукурузного крахмала позволяет получать из данного продукта ценное пребиотическое сырьё на пищевые и кормовые цели. Многократное повторение научно-практических опытов по оценке влияния кормовых добавок на основе крахмального полисахарида позволит создать методологию их оценки и создания новых способов обогащения кормовых рационов сельскохозяйственных животных в дальнейшей перспективе.

Полученные нами результаты исследований показывают, что введение в рацион коров новой кормовой добавки на основе крахмального полисахарида позволяет увеличить продуктивность молочных коров, что схоже с результатами аналогичных исследований других учёных по применению растительных и пребиотических кормовых добавок в рационе крупного рогатого скота (Варакин А.Т. и др., 2021; Горлов И.Ф. и др., 2023; Обрушников Л.Ф. и др., 2023; Попова Г.М. и др., 2023; Ширнина Н.М. и др., 2022). Стоит отметить, что благотворное влияние на продуктивности не заканчивается, так как выявлен рост качественных показателей у полученного молочного сырья, а также и у кисломолочного продукта питания, изготовленного на его основе.

Заключение.

Проведённые исследования по применению в кормлении животных пребиотической кормовой добавки на основе крахмального полисахарида подтвердили эффективность её использования в количестве 80 г в сутки на голову. По результатам исследований установлено повышение молочной продуктивности в опытных группах животных в пределах 5,7-10,2 %, а улучшение показателей качества молока было следующим: по массовой доли жира – на 0,02-0,06 %, по содержанию белка – на 0,02-0,07 %.

Молоко с высокими показателями пищевой ценности, полученное от коров, в рационе кормления которых использовалась пребиотическая добавка на основе крахмального

полисахарида, целесообразно использовать при производстве детского питания, которое требует обеспечение гарантированной безопасности и качества готового продукта.

При этом проведение стандартизации готовой продукции по массовой доле жира обеспечит ее более высокий выход из единицы сырья.

Список источников

1. Ардатская М.Д. Роль пищевых волокон в коррекции нарушений микробиоты и поддержании иммунитета // Русский медицинский журнал. 2020. Т. 28, № 12. С. 24-29. [Ardatskaya MD. Role of dietary fiber in correcting microbiota disorders and maintaining immunity. RMJ. 2020;28(12):24-29. (In Russ.)].
2. Влияние новой кормовой добавки на продуктивность и физиологические показатели молочных коров / А.Т. Варакин и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 1(61). С. 222-231. [Varakin AT, et al. Influence of a new feed additive on productivity and physiological indicators of dairy cows. Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp. 2021;1(61):222-231. (In Russ.)]. doi: 10.32786/2071-9485-2021-01-22
3. Гречишников В., Панин А., Михальчук Е. Оптимизация усвоения НДК. Максимальное раскрытие потенциала корма // Эффективное животноводство. 2024. № 1(191) С. 60-62. [Grechishnikov V, Panin A, Mikhalechuk E. Optimizaciya usvoenija NDK. Maksimal'noe raskrytie potenciala korma. Effektivnoe zhivotnovodstvo. 2024;191(1):60-62. (In Russ.)].
4. Кузьмина Л.Н., Карташова А.П. Качество клетчатки и эффективность ее использования в рационах голштин-холмогорских коров // Аграрный вестник Урала. 2020. № 07(198). С. 56-64. [Kuzmina LN, Kartashova AP. The quality of fiber and the effectiveness of use in rations of holstein-Kholmogor cows. Agrarian Bulletin of the Urals. 2020;07(198):56-64. (In Russ.)]. doi: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-56-64
5. Маслюк А.Н., Токарева М.А. Эффективность оптимизации протеинового и углеводного питания высокопродуктивных коров // Животноводство и кормопроизводство. 2018. Т. 101. № 4. С. 164-171. [Maslyuk AN, Tokareva MA. Optimization efficiency of protein and carbohydrate nutrition of highly productive cows. Animal Husbandry and Fodder Production. 2018;101(4):164-171. (In Russ.)].
6. Попов В.В. Этюды оценки качества кормов и рационов США в России // Адаптивное кормопроизводство. 2021. № 1. С. 65-80. [Popov VV. Etudes of the USA fodder and diets quality evaluation system in Russia. Adaptive Fodder Production. 2021;1:65-80. (In Russ.)]. doi: 10.33814/AFP-2222-5366-2021-1-65-80
7. Попова Г.М., Нуржанов Б.С., Дускаев Г.К. О возможностях использования фитобиотических добавок в рационах сельскохозяйственных животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 2. С. 152-175. [Popova GM, Nurzhanov BS, Duskaev GK. About the possibilities of using phytobiotic additives in the diets of farm animals (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(2):152-175. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-2-152
8. Содержание структурных углеводов и лигнина в многолетних злаковых кормовых травах в зависимости от фазы роста и цифровые инновации в анализе состава корма / Х.К. Худякова, Е.В. Худякова, М.Н. Степанцевич, О.А. Моторин, М.В. Журавлёв, М.С. Никаноров // Тимирязевский биологический журнал. 2023. № 4. С. 107-115. [Khudyakova HK, Khudyakova EV, Stepantsevich MN, Motorin OA, Jouravlev MV, Nikanorov MS. Structural carbohydrate and lignin content of perennial cereal forage grasses depending on the growth phase and digital innovations in forage composition analysis. Timiryazev Biological Journal. 2023;1(4):107-115. (In Russ.)]. doi: 10.26897/2949-4710-2023-4-107-115
9. Увеличение эффективности производства молока коров при использовании в составе рационов кавитационно обработанных концентратов / Н.М. Ширнина, Б.С. Нуржанов, И.А. Ракхимжанова, В.В. Кононец // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 2. С. 49-59. [Shirmina NM, Nurzhanov BS, Rakhimzhanova IA, Kononets VV. Increasing the efficiency of cow milk

production when using cavitation-treated concentrates as part of diets. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(2):49-59. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-105-2-49

10. Шаабан М. Анализ российского рынка кормовых добавок (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 3. С. 76-91. [Shaaban M. Analysis of the Russian feed additives market (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(3):76-91. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-106-3-76

11. Шарипов Д.Р., Якимов О.А., Галимуллин И.Ш. Влияние уровня нейтрально-детергентной клетчатки в рационе на потребление сухого вещества, молочную продуктивность и жевательную активность коров в первую фазу лактации // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины имени Н.Э. Баумана. 2019. № 4. Т. 240. С. 201-205. [Sharipov DR, Yakimov OA, Galimullin ISh. Influence of neutral detergent fiber in the ration on dry matter consumption, milk productivity and rumination activity of cows in first phase of lactation. *Scientific notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2019;240(4):201-205. (*In Russ.*). doi: 10.31588/2413-4201-1883-240-4-201-205

12. Экстерьерные особенности, молочная продуктивность и качество молока коров красной степной породы при использовании в рационах новых пребиотических кормовых добавок / Л.Ф. Обрушникова, М.И. Сложенкина, И.Ф. Горлов, Д.В. Николаев, С.А. Суркова, С.А. Брехова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 2. С. 63-74. [Obrushnikova LF, Slozhenkina MI, Gorlov IF, Nikolaev DV, Surkova SA, Brekhova SA. Exterior peculiarities, milk productivity and quality of the Red steppe cows after feeding with new prebiotic feed additives. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(2):63-74. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-106-2-63

13. Эффективность использования новой кормовой добавки в поздний сухостойный период коров / И.Ф. Горлов, М.И. Сложенкина, Л.В. Хорошевская, Н.И. Мосолова, Е.С. Воронцова, Н.А. Ткаченко, В.А. Пузанкова, Н.Н. Мороз // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1(69). С. 322-332. [Gorlov IF, Slozhenkina MI, Khoroshevskaya LV, Mosolova NI, Vorontsova ES, Tkachenkova NA, Puzankova VA, Moroz NN. Effectiveness of a new feed additive in late drying period of cows. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp*. 2023;1(69):322-332. (*In Russ.*). doi: 10.32786/2071-9485-2023-01-34

14. Эффективность применения новых лецитинсодержащих кормовых добавок в рационах коров красной степной породы / С.А. Брехова, М.И. Сложенкина, С.В. Абрамов, А.В. Балышев, Е.В. Воронцова, И.Ф. Горлов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 3(75). С. 266-273. [Brekova SA, Slozhenkina MI, Abramov SV, Balyshev AV, Vorontsova ES, Gorlov IF. Efficiency of using new lecithin-containing feed additives in the diets of red steppe cows. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp*. 2024;3(75):266-273. (*In Russ.*). doi: 10.32786/2071-9485-2024-03-31

15. García-Núñez IM, Santacruz A, Serna-Saldívar SO, Hernandez SLC, Amaya Guerra CA. Assessment of potential probiotic and synbiotic properties of lactic acid bacteria grown in vitro with starch-based soluble corn fiber or inulin. *Foods*. 2022;11(24):4020. doi: 10.3390/foods11244020

16. Gourineni V, Stewart ML, Icoz D, Zimmer JP. Gastrointestinal tolerance and glycemic response of isomaltooligosaccharides in healthy adults. *Nutrients*. 2018;10(3):301. doi: 10.3390/nu10030301

17. Madsen LR, Stanley S, Swann P, Oswald J. A survey of commercially available isomaltooligosaccharide-based food ingredients. *J Food Sci*. 2017;82(2):401-408. doi: 10.1111/1750-3841.13623

References

1. Ardatskaya MD. Role of dietary fiber in correcting microbiota disorders and maintaining immunity. *RMJ*. 2020;28(12):24-29.

2. Varakin AT, et al. Influence of a new feed additive on productivity and physiological indicators of dairy cows. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021;1(61):222-231. doi: 10.32786/2071-9485-2021-01-22
3. Grechishnikov V, Panin A, Mikhalechuk E. Optimization of NDK assimilation. Maximum disclosure of feed potential. *Effective Animal Husbandry.* 2024;1(191):60-62.
4. Kuzmina LN, Kartashova AP. The quality of fiber and the effectiveness of use in rations of holstein-Kholmogor cows. *Agrarian Bulletin of the Urals.* 2020;07(198):56-64. doi: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-56-64
5. Maslyuk AN, Tokareva MA. Optimization efficiency of protein and carbohydrate nutrition of highly productive cows. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2018;101(4):164-171.
6. Popov VV. Etudes of the USA fodder and diets quality evaluation system in Russia. *Adaptive Fodder Production.* 2021;1:65-80. doi: 10.33814/AFP-2222-5366-2021-1-65-80
7. Popova GM, Nurzhanov BS, Duskaev GK. About the possibilities of using phytobiotic additives in the diets of farm animals (review). *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2023;106(2):152-175. doi: 10.33284/2658-3135-106-2-152
8. Khudyakova HK, Khudyakova EV, Stepansevich MN, Motorin OA, Jouravlev MV, Nikanorov MS. Structural carbohydrate and lignin content of perennial cereal forage grasses depending on the growth phase and digital innovations in forage composition analysis. *Timiryazev Biological Journal.* 2023;1(4):107-115. doi: 10.26897/2949-4710-2023-4-107-115
9. Shirnina NM, Nurzhanov BS, Rakhimzhanova IA, Kononets VV. Increasing the efficiency of cow milk production when using cavitation-treated concentrates as part of diets. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;105(2):49-59. doi: 10.33284/2658-3135-105-2-49
10. Shaaban M. Analysis of the Russian feed additives market (review). *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2023;106(3):76-91. doi: 10.33284/2658-3135-106-3-76
11. Sharipov DR, Yakimov OA, Galimullin ISh. Influence of neutral detergent fiber in the ration on dry matter consumption, milk productivity and rumination activity of cows in first phase of lactation. *Scientific notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine.* 2019;240(4):201-205. doi: 10.31588/2413-4201-1883-240-4-201-205
12. Obrushnikova LF, Slozhenkina MI, Gorlov IF, Nikolaev DV, Surkova SA, Brekhova SA. Exterior peculiarities, milk productivity and quality of the Red steppe cows after feeding with new prebiotic feed additives. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2023;106(2):63-74. doi: 10.33284/2658-3135-106-2-63
13. Gorlov IF, Slozhenkina MI, Khoroshevskaya LV, Mosolova NI, Vorontsova ES, Tkachenkova NA, Puzankova VA, Moroz NN. Effectiveness of a new feed additive in late drying period of cows. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2023;1(69):322-332. doi: 10.32786/2071-9485-2023-01-34
14. Brekhova SA, Slozhenkina MI, Abramov SV, Balyshev AV, Vorontsova ES, Gorlov IF. Efficiency of using new lecithin-containing feed additives in the diets of red steppe cows. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2024;3(75):266-273. doi: 10.32786/2071-9485-2024-03-31
15. García-Núñez IM, Santacruz A, Serna-Saldívar SO, Hernandez SLC, Amaya Guerra CA. Assessment of potential probiotic and synbiotic properties of lactic acid bacteria grown in vitro with starch-based soluble corn fiber or inulin. *Foods.* 2022;11(24):4020. doi: 10.3390/foods11244020
16. Gourineni V, Stewart ML, Icoz D, Zimmer JP. Gastrointestinal tolerance and glycemic response of isomaltooligosaccharides in healthy adults. *Nutrients.* 2018;10(3):301. doi: 10.3390/nu10030301
17. Madsen LR, Stanley S, Swann P, Oswald J. A survey of commercially available isomaltooligosaccharide-based food ingredients. *J Food Sci.* 2017;82(2):401-408. doi: 10.1111/1750-3841.13623

Информация об авторах:

Марина Ивановна Сложенкина, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Волгоградская обл., г. Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6; профессор кафедры «Технология пищевых производств», Волгоградский государственный технический университет, 400005, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28, тел.: 8(844)239-10-48; 39-11-01; 37-38-09.

Иван Фёдорович Горлов, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, научный руководитель, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Россия, Волгоградская обл., Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6; заведующий кафедрой «Технология пищевых производств», Волгоградский государственный технический университет, 400005, Россия, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28, тел.: (8442)39-10-48; 39-11-01; 37-38-09.

Татьяна Алексеевна Антипова, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Волгоградская обл., г. Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6, тел.: 8(844)239-10-48.

Ольга Владимировна Кудряшова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Волгоградская обл., г. Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6.

Елена Сергеевна Воронцова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Волгоградская обл., г. Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6, тел.: 8(844)239-10-48.

Светлана Андреевна Брехова, младший научный сотрудник, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Волгоградская обл., г. Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6, тел.: 8(844)239-10-48.

Александр Какаевич Дурдыев, аспирант, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Волгоградская обл., г. Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6, тел.: 8(844)239-10-48.

Александра Алексеевна Сложенкина, аспирант, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, 400066, Волгоградская обл., г. Волгоград, ул. имени Маршала Рокоссовского, 6, тел.: 8(844)239-10-48.

Вклад авторов: все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились с представленным окончательным вариантом и одобрили его.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Marina I Slozhenkina, Dr. Sci. (Agriculture), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066; Professor of the Department of Food Production Technology, Volgograd State Technical University, 28 Avenue named after V.I. Lenin, Volgograd region, Volgograd, 400005, tel.: (8442)39-10-48; 39-11-01; 37-38-09.

Ivan F Gorlov, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director, Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066; Head

of the Department of Food Production Technology, Volgograd State Technical University, 28 Avenue named after V.I. Lenin, Volgograd region, Volgograd, 400005, tel.: (8442)39-10-48; 39-11-01; 37-38-09.

Tatiana A Antipova, Dr. Sci. (Biology), Senior Research Fellow, Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066, tel.: 8(844)239-10-48.

Olga V Kudryashova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066.

Elena S Vorontsova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066, tel.: 8(844)239-10-48.

Svetlana A Brekhova, Junior Researcher, Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066, tel.: 8(844)239-10-48.

Aleksandr K Durdiev, graduate student, Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066, tel.: 8(844)239-10-48.

Aleksandra A Slozhenkina, graduate student, Volga Region Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products, 6 street named after Marshal Rokossovsky, Volgograd region, Volgograd, 400066, tel.: 8(844)239-10-48.

Contribution of the authors: all authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 16.10.2024; одобрена после рецензирования 25.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 16.10.2024; approved after reviewing 25.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 156-168.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 156-168.

Научная статья
УДК 636.2.087.73
doi:10.33284/2658-3135-107-4-156

Сравнительная оценка влияния холина хлорида и жидкого бетаина на интенсивность роста, биохимические и экономические показатели у телят молочного периода

Константин Сергеевич Остренко¹, Михаил Михайлович Луговой², Роман Владимирович Некрасов³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», Калужская область, Боровск, Россия

²Группа Компаний «РУСАГРО», Москва, Россия

³Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, Московская область, п. Дубровицы, Россия

¹ostrenkoks@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2235-1701>

³nek_roman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4242-2239>

Аннотация. Организация нормированного, сбалансированного, полноценного и рационального кормления является основным фактором, характеризующим эффективную экономическую модель в животноводстве. Одно из особых мест отводится биологическим регуляторам обменных процессов – витаминам и их производным (витаминоподобным веществам, метаболитов витаминов). Данные соединения оказывают на организм профилактическое, лечебное и ростостимулирующее действие. Скармливание телятам молочникам холина хлорида и жидкого бетаина позволяет повысить валовой прирост у телят в опытной группе на 22,0 %, среднесуточный прирост на 22,0 %, живую массу телят на 2,0 %. Снизить конверсию корма и затраты ОЭ на 18,0 % и 18,1 % соответственно, по сравнению с контрольными животными.

Ключевые слова: телята, молочный период, кормление, холина хлорид, жидкий бетаин, валовой прирост, биохимические показатели, гематологические показатели

Для цитирования: Остренко К.С., Луговой М.М., Некрасов Р.В. Сравнительная оценка влияния холина хлорида и жидкого бетаина на интенсивность роста, биохимические и экономические показатели у телят молочного периода // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 156-168. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-156>

Original article

Comparative assessment of the effect of choline chloride and liquid betaine on growth intensity, biochemical and economic indicators in calves in milking period

Konstantin S Ostrenko¹, Mikhail M Lugovoy², Roman V Nekrasov³

¹All-Russia Research Institute of Animal Physiology, Biochemistry, and Nutrition (VNIIFBiP), Branch of Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Kaluga region, Bоровск, Russia

²RUSAGRO Group of Companies, Moscow, Russia

³Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Dubrovitsy, Russia

¹ostrenkoks@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2235-1701>

³nek_roman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4242-2239>

Abstract. Organization of standardized, balanced, complete and rational feeding is the main factor characterizing an effective economic model in animal husbandry. One of the special places is given to

biological regulators of metabolic processes - vitamins and their derivatives (vitamin-like substances, vitamin metabolites). These compounds have a preventive, therapeutic and growth-stimulating effect on the body. Feeding dairy calves with choline chloride and liquid betaine allows increasing the gross gain in calves in the experimental group by 22.0%, average daily gain by 22.0%, live weight of calves by 2.0% and reducing feed conversion and OE costs by 18.0% and 18.1%, respectively, compared to the control animals.

Keywords: calves, milk period, feeding, choline chloride, liquid betaine, gross growth, biochemical parameters, hematological parameters

For citation: Ostrenko KS, Lugovoy MM, Nekrasov RV. Comparative assessment of the effect of choline chloride and liquid betaine on growth intensity, biochemical and economic indicators in calves in milking period. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):156-168. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-156>

Введение.

Применение интенсивной технологии при откорме крупного рогатого скота обосновывает необходимость коррекции их здоровья и продуктивности в раннем онтогенезе (Хабибуллин Р.М., 2023). Ключевым фактором здесь является разработка рационов, ориентированных на сбалансированное питание. В конечном итоге требуется поиск и внедрения в основной рацион альтернативных источников витаминов и их метаболитов, которые отличаются достаточно специфической активностью, но имеют низкую себестоимость. При этом специалистам по кормлению необходимо пересмотреть уровни включения подобных веществ, используемых в рационах сельскохозяйственных животных и птиц (Кван О.В., 2023, Курилкина М.Я., и др. 2023).

Холин хлорид является одним из ключевых витаминов в организме крупного рогатого скота. В частности, холин необходим для биосинтеза фосфолипидов, таких как фосфатидилхолины, фосфатидилэ-таноламины, различные сфингомиелины. В клетках различных тканей и органов животных в среднем 40-50 % от общего содержания фосфолипидов в их мембранах составляют именно эфиры фосфатидилхолина с различными жирными кислотами. В организме животных биполярный ион бетаина образуется в результате окисления холина или витамина B4 (Al-Qaisi M et al., 2022; Coleman DN et al., 2021).

Бетаин (триметилглицин) обладает многочисленными важными биологическими функциями, которые влияют на повышение продуктивности крупного рогатого скота, особенно в раннем онтогенезе (González LA et al., 2023; Jacometo CB et al., 2017). Бетаин действует как донор метила и органический осмолит, который играет важную роль в росте, лактации, синтезе белка и жировом обмене у животных, способствует удержанию молекул воды внутри жизненно важных клеток, чтобы избежать обезвоживания в стрессовых ситуациях, и контролирует осмотическое давление внутри эпителиальных клеток кишечника (Finkelstein JD et al., 1971; Batistel F et al., 2019; Hu L et al., 2020).

Как донор метильной группы бетаин играет роль в синтезе креатина, карнитина, фосфатидилхолина, адреналина, пурина метильной группы и метилированных аминокислот. Бетаин, холин и метионин являются основными источниками доноров метила у животных, и теоретическая способность этих соединений быть донором метила находится в соотношении 3,7:1; 6:1. Кроме того, изотопные исследования показывают, что эффективность бетаина как донора метила в 12-15 раз выше, чем у холина (Alharthi AS et al., 2019; Lopreiato V et al., 2020).

Бетаин является наиболее эффективным из трёх доноров метильных групп *in vivo*. Во время каталитической реакции, опосредованной бетаин-гомоцистеин-метилтрансферазой (БГМТ), бетаин отдаёт метильную группу гомоцистеину, что приводит к образованию метионина, а затем превращается в диметилглицин (Liang Y et al., 2019b; Mann S et al., 2018; Zhou Z et al., 2016). Далее он расщепляется на множество вторичных метаболитов, таких как монометил глицин, глицин и серин (Zhou Z et al., 2018; Swartz TH et al., 2022; Monteiro APA et al., 2017). Образование метионина из гомоцистеина опосредовано метильной группой, обеспечивается бетаином. В основном именно в печени абсорбированный экзогенный бетаин действует как донор метильной группы, которая ре-

гулируется БГМТ и цистатионин-β-синтетазой (ЦβС). В присутствии доноров метильных групп активность ЦβС повышается за счёт ускорения пути переноса серы, что позволяет избежать повреждения клеток, вызванного остаточным гомоцистеином.

Бетаин обладает высокой осмолитической активностью, что обеспечивает поддержание водного баланса и увеличивает пролиферацию клеток кишечника, что непосредственно влияет на усвояемость питательных веществ и общую продуктивность животных, особенно в раннем онтогенезе (Liang Y et al., 2019a; Roche J et al., 2013). Добавление бетаина снижает концентрацию незатерифицированных жирных кислот (НЭЖК) и β-гидроксibuтирата (БГБ) в плазме крови (Zenobi MG et al., 2018).

Бетаин улучшает показатели роста за счёт снижения потребности животных в энергии для поддержания жизнедеятельности. Кроме того, анаэробный гликолиз после убоя будет продолжаться до тех пор, пока не будет инактивирован фермент гликолиза или пока не истощится мышечный гликоген. Бетаин играет важную роль в индукции секреции гормона роста, усилении передачи сигналов рецепторов между инсулином (INS) и IGF-1, стимулировании синтеза белка, что влияет на скорость роста (Al-Qaisi M et al., 2022).

Цель исследования.

Установить эффективность замены кристаллического холин хлорида на жидкий бетаин (бетаиновую мелассу) в кормлении телят молочного периода выращивания.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Телята чёрно-пёстрой породы голштинизированные (уровень голштинизации не менее 70 %) 30-дневного возраста.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все процедуры над животными были выполнены в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Схема эксперимента. Для реализации поставленных задач в 2024 году на виварии и в лаборатории иммунобиотехнологии и микробиологии ВНИИФБиП – филиал ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста проведены исследования, включающие научно-физиологический опыт. Продолжительность проведения эксперимента составила 30 дней. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Схема исследования

Table 1. Experimental design

Группа / Group	Голов в группе / Goals in the group	Характеристика кормления / Feeding characteristic
Продолжительность исследования – 30 суток / The duration of the study is 30 days		
1 контрольная / 1 control	5	Заменитель цельного молока (ЗЦМ) и комбикорм престартер / Whole milk replacer (WMR) and feed pre-starter
2 опытная / 2 experimental	5	ЗЦМ и комбикорм (престартер+0,04 % кристаллического холин хлорида в составе 1 кг комбикорма) / WMR and feed (pre-starter+0.04 % crystalline choline chloride in 1 kg of feed)
3 опытная / 3 experimental	5	ЗЦМ и комбикорм (престартер+0,0528 % (0,04 %*1,32) бетаиновой мелассы в составе 1 кг комбикорма) / WMR and mixed fodder (prestarter+0.0528 % (0.04 %*1.32) of betaine molasses in 1 kg of mixed fodder)

Возраст телят (n=15) от 30 до 60 суток также относится к периоду их раннего развития. В это время критически важно обеспечить телятам правильное питание с необходимым количеством белков, углеводов, жиров, витаминов и минералов для поддержания здоровья и интенсивности роста. В связи с этим и было принято решение по замене холина хлорида в рационе телят на жидкий бетаин. Обоснование дозировок приведено в таблице 2.

Таблица 2. Соотношение метильных групп холина, бетаина и их производных
 Table 2. Ratio of methyl groups of choline, betaine and their derivatives

Отношение / <i>Ratio</i>	Коэффициент / <i>Coefficient</i>	Примечание / <i>Note</i>
Холин (100 %): Бетаин (100 %) / <i>Choline (100 %): Betaine (100 %)</i>	1:1,12	Рассчитано как соотношение молярных масс холина 104,2 г/моль к бетаину 117,1 г/моль / <i>Calculated as the ratio of molar masses of choline 104.2 g/mol to betaine 117.1 g/mol</i>
Холин (100 %): Холин хлорид (100 %) / <i>Choline (100%): Choline chloride (100%)</i>	1:1,34	Рассчитано как соотношение молярных масс холин хлорида 139,6 г/моль к холину 104,2 г/моль / <i>Calculated as the ratio of the molar masses of choline chloride 139.6 g/mol to choline 104.2 g/mol</i>
Холин хлорид (100 %): Бетаин (100 %) / <i>Choline Chloride (100%): Betaine (100%)</i>	1:0,84	Рассчитано как соотношение коэффициентов замены холина на бетаин и холина на холин хлорид / <i>Calculated as the ratio of choline to betaine and choline to choline chloride replacement ratios</i>
Холин Хлорид (60 %): Жидкий бетаин (38 %) / <i>Choline Chloride (60%): Liquid Betaine (38%)</i>	1:1,32	Рассчитано как соотношение коэффициентов замены холина на бетаин и холина на холин хлорид с учётом содержания активного вещества / <i>Calculated as the ratio of choline to betaine and choline to choline chloride replacement ratios taking into account the active ingredient content</i>

Опыт проводился по схеме, представленной в таблице 1: 1 контрольная группа получала рацион без применения бетаина и холин хлорида, животным 2 опытной группы скормливался рацион, содержащий 60 % холин хлорида в количестве 400 г/т корма (престартера), в 3 опытной группе применялся рацион, содержащий жидкий бетаин в количестве 528г/т корма (стартера). В соответствии с «Основами опытного дела в животноводстве» (Овсянников А.И., 1976), для проведения опыта на КРС в группах было по 5 голов.

По окончании опыта была отобрана кровь с соблюдением правил асептики и антисептики в две стерильные пробирки. В одной из пробирок – кровь с ЭДТА, а в другой – для получения сыворотки.

Были определены зоотехнические показатели (валовой и среднесуточный прирост, поедаемость корма), проведены биохимические исследования сыворотки крови.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы лаборатории иммунобиотехнологии и микробиологии ВНИИФБиП – филиал ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста: автоматический биохимический анализатор ERBAXL-100 (ERBA Lachema, Чехия), реагенты ERBA SysPack (ERBA, Чехия), автоматический гематологический анали-

затор DF50 Vet (Dymind, Китай), набор реактивов для гематологического анализа Dymind SysPack (Китай), весы для взвешивания животных ЭЛЬТОН (Ск) 300 кг (Волгоградский завод ВТ, Россия).

Статистическая обработка. Статистический анализ выполняли с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) и обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Статистическая обработка включала расчёт среднего значения (М) и стандартные ошибки среднего ($\pm$ SEM). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Уровень значимой разницы был установлен на уровне $P \leq 0,05$.

Результаты исследований.

В ходе проведённых исследований было установлено, что применение холина хлорида и жидкого бетаина способствовало интенсивности роста животных опытных групп. Данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Зоотехнические показатели телят молочного периода (М $\pm$ м)

Table 3. Zootechnical indicators of calves of the dairy period (M $\pm$ m)

Показатель / Indicator	Группа / Group		
	1 контрольная / 1 control	2 опытная / 2 experimental	3 опытная / 3 experimental
Количество животных, гол. / Number of animals, head	5	5	5
Средняя живая масса телят в начале опыта, кг / Average live weight of calves at the beginning of the experiment, kg	57,8 $\pm$ 1,9	57,5 $\pm$ 1,9	57,0 $\pm$ 1,6
Средняя живая масса телят в 2 месяца, кг / Average live weight of calves at 2 months, kg	70,9 $\pm$ 1,6	72,8 $\pm$ 1,1	73,0 $\pm$ 1,7
Валовой прирост, кг / Gross gain, kg	13,1 $\pm$ 2,8	15,3 $\pm$ 2,8	16,0 $\pm$ 2,2
Среднесуточный прирост, г / Average daily gain, g	437,0 $\pm$ 52	510,0 $\pm$ 25	533,3 $\pm$ 34*
% к контролю по приросту живой массы / % to control in terms of live weight gain	100	116,8	122,1
Количество потребленного корма (сухой корм), кг / Amount of feed consumed (dry fodder), kg	39	39	39
Коэффициент конверсии корма / Feed conversion ratio	2,98	2,55	2,43
Затраты ОЭ на 1 кг прироста, МДж** / ME expenditure per 1 kg of gain, MJ**	36,5	31,21	29,74

Примечание: здесь и далее * – $P \leq 0,05$; ** – оценка ОЭ по переваримым питательным веществам

Note: here and further * – $P \leq 0.05$; ** – assessment of ME by digestible nutrients

Применение жидкого бетаина позволяет повысить валовой прирост у телят в опытной группе на 22,0 %, среднесуточный прирост – на 22 %, живую массу телят – на 2 %. Снизить конверсию

корма и затраты ОЭ на 18 % и 18,1 % соответственно. Известно, что бетаин обладает многочисленными важными биологическими функциями, которые повышают продуктивность скота. Он помогает поддерживать водный баланс и увеличивать пролиферацию клеток кишечника, что улучшает усвояемость питательных веществ и общую продуктивность животных. Сохранность во всех группах была 100 %.

С целью изучения влияния холина хлорида и жидкого бетаина на обменные процессы в организме опытных животных были проанализированы данные, полученные в ходе биохимических и морфологических исследований крови. Данные представлены в таблице 4.

Таблица 4. Биохимические и гематологические показатели крови подопытных животных (M±m)

Table 4. Biochemical and hematological blood parameters of experimental animals (M±m)

Показатель / <i>Indicator</i>	Группа / <i>Group</i>			
	1 кон- трольная/ <i>1 control</i>	2 опытная/ <i>2 experimental</i>	3 опытная/ <i>3 experimental</i>	референсные значения ¹ / <i>Reference values¹</i>
Белок общий, г/л / <i>Total protein, g/l</i>	69,67±1,34	74,89±4,13	75,24±3,24*	72-86
Альбумины, г/л / <i>Albumins, g/l</i>	26,95±0,74	26,50±1,38	28,12±2,14	28-39
Глобулины, г/л / <i>Globulins, g/l</i>	42,72±1,18	48,39±2,82	47,12±0,95	34-49
Мочевина, ммоль/л / <i>Urea, mmol/l</i>	3,00±0,69	2,92±0,33	2,91±0,64	2,3-5,8
Креатинин, ммоль/л / <i>Creatinine, mmol/l</i>	59,52±7,36	75,89±2,10*	76,84±2,10*	55-180
Билирубин общий, мкмоль/л / <i>Total bilirubin, μmol/L</i>	4,98±2,05	4,73±0,70	4,82±1,25	0,7-14
АЛТ, МЕ/л / <i>ALT, IU/L</i>	17,25±1,81	19,64±1,52	20,01±2,26	11,7-100
АСТ, МЕ/л / <i>AST, IU/l</i>	25,87±0,26	28,49±5,63	27,40±3,51	18,8-98,3
Щелочная фосфатаза, МЕ/л / <i>Alkaline phosphatase, ME/L</i>	46,87±3,30	56,27±8,09	52,03±6,89	40,0-273
Холестерин общий, ммоль/л / <i>Total cholesterol, mmol/L</i>	2,51±0,18	2,82±0,12*	2,87±0,06*	1,56-3,64
Глюкоза, ммоль/л / <i>Glucose, mmol/l</i>	3,19±0,06	3,21±0,13	3,29±0,34	2,2-5,3 ²
Кальций, ммоль/л / <i>Calcium, mmol/l</i>	2,51±0,06	2,54±0,12	2,56±0,19	2,1-2,8 ²
Фосфор, ммоль/л / <i>Phosphorus, mmol/l</i>	2,94±0,11	3,00±0,03	2,97±0,12	1,4-3,2 ²
Магний, ммоль/л / <i>Magnesium, mmol/l</i>	0,59±0,01	0,62±0,05	0,60±0,02	0,7-1,2 ²
Железо, мкмоль/л / <i>Iron, μmol/L</i>	2,36±0,16	2,51±0,12	2,39±0,09	1,8-2,9 ²
Лейкоциты, 10 ⁹ /л / <i>Leukocytes, 10⁹/L</i>	11,61±3,10	10,13±1,89	11,12±2,51	4-15
Эритроциты, 10 ¹² /л / <i>Erythrocytes, 10¹²/L</i>	9,34±0,11	13,32±1,71*	13,48±0,99*	5-15
Гемоглобин, г/л / <i>Hemoglobin, g/l</i>	98,53±3,34	113,07±5,90*	114,07±6,74*	80-150
Гематокрит, % / <i>Hematocrit, %</i>	42,67±1,22	44,53±3,08	44,92±6,54	24-46

Примечание: здесь и далее * – P≤0,05; ¹Зеленевский и др., 2005; ⁴Гусев и др., 2019.

Note: here and further * – P≤0.05; ¹Zelenevsky et al., 2005; ⁴Gusev et al., 2019.

Изучаемые показатели крови в целом находились в пределах референсных значений. В 1 и 2 опытных группах было зафиксировано повышение концентрации общего белка на 7,5 и 8 % соответственно. Также в данных группах зафиксировано достоверное повышение концентрации кре-

атинина в крови на 27,5 ($P \leq 0,05$) и 29,1 ($P \leq 0,05$) % и холестерина – на 12,3 ($P \leq 0,05$) и 14,2 ($P \leq 0,05$) % соответственно (табл. 4).

Холина хлорид и жидкий бетаин оказывают положительный эффект на морфологический профиль крови. Так, в опытных группах достоверно зафиксировано повышение уровня гемоглобина на 18,7 ($P \leq 0,05$) и 15,8 ($P \leq 0,05$) % и концентрации эритроцитов – на 42,6 ($P \leq 0,05$) и 44,3 ($P \leq 0,05$) %.

В ходе исследований был проведён экономический анализ по определению эффективности использования холина хлорида и жидкого бетаина в кормлении телят в расчёте на 1 голову. Данные представлены в таблице 5.

Таблица 5. Показатели экономической эффективности применения холина хлорида и жидкого бетаина телятам в молочном периоде выращивания
Table 5. Indicators of economic efficiency of application of choline chloride and liquid betaine to calves in the dairy period of rearing

Показатель / Indicator	Группа / Group		
	1 контрольная / 1 control	2 опытная / 2 experimental	3 опытная / 3 experimental
Получено валового прироста по группе, кг / Received gross gain by group, kg / kg	13,1	15,3	16,0
Количество потребленного комбикорма, кг / Quantity of consumed mixed fodder, kg	39,00	39,00	39,00
Потреблено кормовой добавки, г / Consumed feed additive, g	-	1560,00	2060,00
Стоимость кормовой добавки за кг / Cost of feed additive per kg	-	1170,00	669,50
Стоимость потребленного комбикорма, руб. / Cost of consumed mixed fodder, rub.	1404,00	3229,00	2783,00
Стоимость эл. энергии, руб. / Cost of electric energy, rub.	1320,00	1320,00	1320,00
Заработная плата + прочие расходы, руб. / Wages + other expenses, rub.	1360,00	1360,00	1360,00
Производств. затраты, всего, руб. / Production costs, total, rub.	4084,00	4318,00	4218,00
Себестоимость 1 кг прироста массы, руб. / Cost of 1 kg of weight gain, rub.	311,75	282,20	263,62
В % контролю / In % of control	100,0	89,83	83,82
Прибыль, руб. / Profit, rub.	501,00	1037,00	1382,20
Получено дополнительного дохода, руб. / Additional income received, rub.	-	536,00	881,20
Уровень рентабельности, % / Profitability level, %	12,27	24,02	32,77

Так, применение жидкого бетаина при введении в рацион телят молочного периода выращивания было эффективнее на 20,50 % по сравнению со стандартным рационом и на 11,75 % – по сравнению с холином хлоридом, а в денежном выражении – на 881,20 и на 345,20 рубля.

Обсуждение полученных результатов.

Настоящее исследование было направлено на сравнение применения холина хлорида и жидкого бетаина у телят в молочном периоде. В ходе проведённых исследований было установлено, что включение в состав стартерных комбикормов жидкого бетаина позволяет повысить валовой

прирост у телят в опытной группе на 22,0 %, среднесуточный прирост – на 22 %, живую массу – на 2 %. Наши данные согласуются с данными ряда авторов (Monteiro APA et al., 2017; Holdorf HT et al., 2023), когда при введении в рацион жидкого бетаина и холина хлорида было зафиксировано увеличение живой массы новорождённых телят. Добавление экзогенного холина в цельное молоко улучшало рост молодняка, несмотря на проблемы, связанные с низкой живой массой при рождении. Поддержание и улучшение темпов роста в периоды высокого риска служат профилактической мерой для благополучного дальнейшего отъема, и может иметь долгосрочные эффекты. Уровень питания и темпы роста в раннем возрасте являются важными детерминантами роста мышечной ткани (Soberon F and Van Amburgh ME, 2017), что потенциально объясняет связь между интенсивностью набора массы в раннем возрасте и формированием системы пищеварения как базиса получения в дальнейшем высокой продуктивности. Данные нашего исследования по применению жидкого бетаина показывают также на возможность снижения конверсии корма и затрат ОЭ на 18 % и 18,1 % соответственно, по сравнению с контрольными животными. Результаты использования жидкой кормовой добавки, содержащей бетаин, в рационах для крупного рогатого скота, особенно лактирующих коров, также показывают снижение конверсии корма и увеличение удоев. Так, в работах Monteiro APA (2017) бетаин применялся в стадию лактации до отёла. Также в ранней лактации применение бетаина способствовало увеличению надоев на 7,7 % и содержания жира в молоке – на 10,1 % в период первых 8 недель лактации, снижению конверсии корма на 0,7 % по сравнению со стандартным рационом. Таким образом, скармливание бетаина позволяет добиться улучшения молочной продуктивности.

При анализе гематологических показателей было зафиксировано повышение уровня гемоглобина на 18,7 ($P \leq 0,05$) и 15,8 % ($P \leq 0,05$) и концентрации эритроцитов на 42,6 ($P \leq 0,05$) и 44,3 % ($P \leq 0,05$) в крови животных опытных групп. Подобные результаты также отмечаются в работе Hassan Yousef M с коллегами (2022), в которой было подтверждено влияние бетаина на существенное увеличение общего количества гемоглобина и эритропоэз в целом. Также приводятся данные о высокой антиоксидантной активности бетаина. Он контролирует объём клеток, регулируя АТФазу мембран эритроцитов (красных кровяных телец) посредством конформационных изменений. Кроме того, антигемолитическая активность бетаина может быть связана с гидрофобностью трёх метильных групп. В работах Cai Y с соавторами (2021) были доказаны гепатопротекторное действие бетаина на овцах и активизация обменных процессов, особенно на белковый и липидный обмен, что коррелирует с данными, полученными в нашем исследовании. Применение холина хлорида и жидкого бетаина способствует повышению метаболических процессов, что согласуется с уровнем приростов животных. Следует отметить, что применение жидкого бетаина в рационе телят молочного периода выращивания было эффективнее в денежном выражении на 4406,00 рублей по сравнению со стандартным рационом и на 1726,00 рубля – по сравнению с холином хлоридом.

Заключение.

Применение жидкого бетаина целесообразно использовать в кормлении телят непосредственно после рождения и включать в состав престартерных и стартерных комбикормов, что способствует активизации роста, обмена веществ и интенсивному набору массы тела. Повышается рентабельность на 20,50 и 11,75 % по сравнению со стандартным рационом и по сравнению с холином хлоридом.

Список источников

1. Зеленовский Н.В., Васильев А.П., Логинова Л.К. Анатомия и физиология животных: учеб. для студ. образ. учрежд. сред. проф. образования. М.: Академия, 2005. 464 с. [Zelenevskij NV, Vasil'ev AP, Loginova LK. Anatomija i fiziologija zhivotnyh: ucheb. dlja stud. obraz. uchrezhd. sred. prof. obrazovanija. Moscow: Akademija; 2005:464 p. (In Russ.)].

2. Кван О.В. Эндогенные потери веществ: оптимизация микронутрентной обеспеченности рационов сельскохозяйственных животных // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 148-163. [Kvan OV. Endogenous losses of substances: optimization of micronutrient supply of farm animal diets. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(4):148-163. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>
3. Контроль биохимического статуса свиней и коров: руководство / подгот.: И.В. Гусев, Н.В. Боголюбова, Р.А. Рыков, Г.Н. Левина. Дубровицы: ФГБНУ ФНЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, 2019. 40 с. [Gusev IV, Bogoljubova NV, Rykov RA, Levina GN. Kontrol' biohimicheskogo statusa svinej i korov: rukovodstvo. Dubrovicy: FGBNU FNC VIZH im. L.K. Ernsta; 2019:40 p. (In Russ.)].
4. Овсянников А.И. Основы опытного дела в животноводстве: учеб. пособие. М.: Колос, 1976. 303 с. [Ovsjannikov AI. Osnovy opytnogo dela v zhivotnovodstve: ucheb. posobie. Moscow: Kolos; 1976:303 p. (In Russ.)].
5. Оценка безопасности использования фитохимических веществ в экспериментах *in vitro*, *in vivo* и в животноводстве / М.Я. Курилкина, Ш.Г. Рахматуллин, Т.А. Климова, Д.Г. Дерябин, Г.И. Левахин // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 3. С. 92-109. [Kurilkina MYa, Rahmatullin ShG, Klimova TA, Deryabin DG, Levahin GI. Safety assessment of the use of phytochemicals during *in vitro*, *in vivo* experiments and animal husbandry. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(3): 92-109. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-92>
6. Хабибуллин Р.М. Влияние адаптогенов на рост и развитие бычков казахской белой породы // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 2. С. 75-84. [Khabibullin RM. The effect of adaptogens on growth and development of Kazakh White-Headed bulls. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(2):75-84. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-75>
7. Alharthi AS, Coleman DN, Liang Y, Batistel F, Elolimy AA, Yambao RC, Abdel-Hamied E, Pan YX, Parys C, Alhidary IA, Abdelrahman MM, Loor JJ. Hepatic 1-carbon metabolism enzyme activity, intermediate metabolites, and growth in neonatal Holstein dairy calves are altered by maternal supply of methionine during late pregnancy. J Dairy Sci. 2019;102(11):10291-10303. doi: 10.3168/jds.2019-16562
8. Al-Qaisi M, Abedal-Majed MA, Abuajamieh M, Alnimer M, Al-Fataftah AA, Irshaid R, Titi H, Abdelqader A. Effects of dietary betaine on body temperature indices, performance, metabolism, and hematological variables of dairy heifer calves during hot summer conditions. Vet World. 2022;15(7):1657-1664. doi: 10.14202/vetworld.2022.1657-1664
9. Batistel F, Alharthi AS, Yambao RRC, Elolimy AA, Pan YX, Parys C, et al. Methionine supply during late-gestation triggers offspring sex-specific divergent changes in metabolic and epigenetic signatures in bovine placenta. J Nutr. 2019;149(1):6-17. doi: 10.1093/jn/nxy240
10. Cai Y, Deng M, Zhang Q, Liu Z, Wang L, Sheng W, Zhang Y, You P, Wang Z, Wang F. Effects of dietary betaine supplementation on biochemical parameters of blood and testicular oxidative stress in Hu sheep. Theriogenology. 2021;164:65-73. doi: 10.1016/j.theriogenology.2021.01.006
11. Coleman DN, Alharthi AS, Liang Y, Lopes MG, Lopreiato V, Vailati-Riboni M, Loor JJ. Multifaceted role of one-carbon metabolism on immunometabolic control and growth during pregnancy, lactation and the neonatal period in dairy cattle. J Anim Sci Biotechnol. 2021;12(1):27. doi: 10.1186/s40104-021-00547-5
12. Finkelstein JD, Kyle WE, Harris BJ. Methionine metabolism in mammals. Regulation of homocysteine methyltransferases in rat tissue. Arch Biochem Biophys. 1971;146(1):84-92. doi: 10.1016/s0003-9861(71)80044-9
13. González LA, Carvalho JGS, Kuinchtner BC, Dona AC, Baruselli PS, D'Occhio MJ. Plasma metabolomics reveals major changes in carbohydrate, lipid, and protein metabolism of abruptly weaned beef calves. Sci Rep. 2023;13(1):8176. doi: 10.1038/s41598-023-35383-2
14. Hassan Yousef M, Abdulmunem Abdulhameed R, Talib Yaseen Aldossary A. Effect of betaine on blood parameters related to the iron status in acrylamide-treated rats. Arch Razi Inst. 2022;77(3):1241-1247. doi: 10.22092/ARI.2022.357804.2101

15. Holdorf HT, Brown WE, Combs GJ, Henisz SJ, Kendall SJ, Caputo MJ, Ruh KE, White HM. Increasing the prepartum dose of rumen-protected choline: Effects of maternal choline supplementation on growth, feed efficiency, and metabolism in Holstein and Holstein × Angus calves. *J Dairy Sci.* 2023;106(9):6005-6027. doi: 10.3168/jds.2022-23068
16. Hu L, Chen Y, Cortes IM, Coleman DN, Dai H, Liang Y, et al. Supply of methionine and arginine alters phosphorylation of mechanistic target of rapamycin (mTOR), circadian clock proteins, and α -s1-casein abundance in bovine mammary epithelial cells. *Food Funct.* 2020;11(1):883-94.
17. Jacometo CB, Zhou Z, Luchini D, Corrêa MN, Loor JJ. Maternal supplementation with rumen-protected methionine increases prepartal plasma methionine concentration and alters hepatic mRNA abundance of 1-carbon, methionine, and transsulfuration pathways in neonatal Holstein calves. *J Dairy Sci.* 2017;100(4):3209-3219. doi: 10.3168/jds.2016-11656
18. Liang Y, Batistel F, Parys C, Loor JJ. Glutathione metabolism and nuclear factor erythroid 2-like 2 (NFE2L2)-related proteins in adipose tissue are altered by supply of ethyl-cellulose rumen-protected methionine in periparturient Holstein cows. *J Dairy Sci.* 2019a;102(6):5530-5541. doi: 10.3168/jds.2018-15687
19. Liang Y, Batistel F, Parys C, Loor JJ. Methionine supply during the periparturient period enhances insulin signaling, amino acid transporters, and mechanistic target of rapamycin pathway proteins in adipose tissue of Holstein cows. *J Dairy Sci.* 2019b;102(5):4403-4414. doi: 10.3168/jds.2018-15738
20. Lopreiato V, Vailati-Riboni M, Parys C, Fernandez C, Minuti A, Loor JJ. Methyl donor supply to heat stress-challenged polymorphonuclear leukocytes from lactating Holstein cows enhances 1-carbon metabolism, immune response, and cytoprotective gene network abundance. *J Dairy Sci.* 2020;103(11):10477-93.
21. Mann S, Sipka A, Leal Yepes FA, Nydam DV, Overton TR, Wakshlag JJ. Nutrient-sensing kinase signaling in bovine immune cells is altered during the postpartum nutrient deficit: a possible role in transition cow inflammatory response. *J Dairy Sci.* 2018;101(10):9360-9370. doi: 10.3168/jds.2018-14549
22. Monteiro APA, Bernard JK, Guo JR, Weng XS, Emanuele S, Davis R, Dahl GE, Tao S. Effects of feeding betaine-containing liquid supplement to transition dairy cows. *J Dairy Sci.* 2017;100(2):1063-1071. doi: 10.3168/jds.2016-11452
23. Roche J, Macdonald K, Schütz K, Matthews L, Verkerk G, Meier S, et al. Calving body condition score affects indicators of health in grazing dairy cows. *J Dairy Sci.* 2013;96(9):5811-5825. doi: 10.3168/jds.2013-6600
24. Soberon F, Van Amburgh ME. Effects of preweaning nutrient intake in the developing mammary parenchymal tissue. *J Dairy Sci.* 2017;100(6):4996-5004. doi: 10.3168/jds.2016-11826
25. Swartz TH, Bradford BJ, Malysheva O, Caudill MA, Mamedova LK, Estes KA. Effects of dietary rumen-protected choline supplementation on colostrum yields, quality, and choline metabolites from dairy cattle. *JDS Commun.* 2022;3(4):296-300. doi: 10.3168/jdsc.2021-0192
26. Zenobi MG, Scheffler TL, Zuniga JE, Poindexter MB, Campagna SR, Castro Gonzalez HF, et al. Feeding increasing amounts of ruminally protected choline decreased fatty liver in nonlactating, pregnant Holstein cows in negative energy status. *J Dairy Sci.* 2018;101(7):5902-5923. doi: 10.3168/jds.2017-13973
27. Zhou Z, Ferdous F, Montagner P, Luchini DN, Correa MN, Loor JJ. Methionine and choline supply during the periparturient period alter polymorphonuclear leukocyte immune response and immunometabolic gene expression in Holstein cows. *J Dairy Sci.* 2018;101(11):10374-10382. doi: 10.3168/jds.2018-14972
28. Zhou Z, Vailati-Riboni M, Trevisi E, Drackley JK, Luchini DN, Loor JJ. Better postpartal performance in dairy cows supplemented with rumen-protected methionine compared with choline during the periparturient period. *J Dairy Sci.* 2016;99(11):8716-32. doi: 10.3168/jds.2015-10525

References

1. Zelenevsky NV, Vasiliev AP, Loginova LK. Animal anatomy and physiology: textbook for students of secondary prof. education institutions. Moscow: Academy; 2005:464 p.
2. Kvan OV. Endogenous losses of substances: optimization of micronutrient supply of farm animal diets. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):148-163. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>
3. Monitoring the biochemical status of pigs and cows: guidelines. prepared by: Gusev IV, Bogolyubova NV, Rykov RA, Levina G.N. Dubrovitsy: FGBNU FNC VIZh named after L.K. Ernst; 2019:40 p.
4. Ovsyannikov AI. Fundamentals of experimental work in animal husbandry: textbook. Moscow: Kolos; 1976:303 p.
5. Kurilkina MYa, Rahmatullin ShG, Klimova TA, Deryabin DG, Levahin GI. Safety assessment of the use of phytochemicals during *in vitro*, *in vivo* experiments and animal husbandry. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(3):92-109. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-92>
6. Khabibullin RM. The effect of adaptogens on growth and development of Kazakh White-Headed bulls. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(2):75-84. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-75>
7. Alharthi AS, Coleman DN, Liang Y, Batistel F, Elolimy AA, Yambao RC, Abdel-Hamied E, Pan YX, Parys C, Alhidary IA, Abdelrahman MM, Loor JJ. Hepatic 1-carbon metabolism enzyme activity, intermediate metabolites, and growth in neonatal Holstein dairy calves are altered by maternal supply of methionine during late pregnancy. *J Dairy Sci*. 2019;102(11):10291-10303. doi: 10.3168/jds.2019-16562
8. Al-Qaisi M, Abedal-Majed MA, Abuajamieh M, Alnimer M, Al-Fataftah AA, Irshaid R, Titi H, Abdelqader A. Effects of dietary betaine on body temperature indices, performance, metabolism, and hematological variables of dairy heifer calves during hot summer conditions. *Vet World*. 2022;15(7):1657-1664. doi: 10.14202/vetworld.2022.1657-1664
9. Batistel F, Alharthi AS, Yambao RRC, Elolimy AA, Pan YX, Parys C, et al. Methionine supply during late-gestation triggers offspring sex-specific divergent changes in metabolic and epigenetic signatures in bovine placenta. *J Nutr*. 2019;149(1):6-17. doi: 10.1093/jn/nxy240
10. Cai Y, Deng M, Zhang Q, Liu Z, Wang L, Sheng W, Zhang Y, You P, Wang Z, Wang F. Effects of dietary betaine supplementation on biochemical parameters of blood and testicular oxidative stress in Hu sheep. *Theriogenology*. 2021;164:65-73. doi: 10.1016/j.theriogenology.2021.01.006
11. Coleman DN, Alharthi AS, Liang Y, Lopes MG, Lopreiato V, Vailati-Riboni M, Loor JJ. Multifaceted role of one-carbon metabolism on immunometabolic control and growth during pregnancy, lactation and the neonatal period in dairy cattle. *J Anim Sci Biotechnol*. 2021;12(1):27. doi: 10.1186/s40104-021-00547-5
12. Finkelstein JD, Kyle WE, Harris BJ. Methionine metabolism in mammals. Regulation of homocysteine methyltransferases in rat tissue. *Arch Biochem Biophys*. 1971;146(1):84-92. doi: 10.1016/s0003-9861(71)80044-9
13. González LA, Carvalho JGS, Kuinchtner BC, Dona AC, Baruselli PS, D'Occhio MJ. Plasma metabolomics reveals major changes in carbohydrate, lipid, and protein metabolism of abruptly weaned beef calves. *Sci Rep*. 2023;13(1):8176. doi: 10.1038/s41598-023-35383-2
14. Hassan Yousef M, Abdulmunem Abdulhameed R, Talib Yaseen Aldossary A. Effect of betaine on blood parameters related to the iron status in acrylamide-treated rats. *Arch Razi Inst*. 2022;77(3):1241-1247. doi: 10.22092/ARI.2022.357804.2101
15. Holdorf HT, Brown WE, Combs GJ, Henisz SJ, Kendall SJ, Caputo MJ, Ruh KE, White HM. Increasing the prepartum dose of rumen-protected choline: Effects of maternal choline supplementation on growth, feed efficiency, and metabolism in Holstein and Holstein × Angus calves. *J Dairy Sci*. 2023;106(9):6005-6027. doi: 10.3168/jds.2022-23068

16. Hu L, Chen Y, Cortes IM, Coleman DN, Dai H, Liang Y, et al. Supply of methionine and arginine alters phosphorylation of mechanistic target of rapamycin (mTOR), circadian clock proteins, and α -s1-casein abundance in bovine mammary epithelial cells. *Food Funct.* 2020;11(1):883-94.
17. Jacometo CB, Zhou Z, Luchini D, Corrêa MN, Loor JJ. Maternal supplementation with rumen-protected methionine increases prepartal plasma methionine concentration and alters hepatic mRNA abundance of 1-carbon, methionine, and transsulfuration pathways in neonatal Holstein calves. *J Dairy Sci.* 2017;100(4):3209-3219. doi: 10.3168/jds.2016-11656
18. Liang Y, Batistel F, Parys C, Loor JJ. Glutathione metabolism and nuclear factor erythroid 2-like 2 (NFE2L2)-related proteins in adipose tissue are altered by supply of ethyl-cellulose rumen-protected methionine in periparturient Holstein cows. *J Dairy Sci.* 2019a;102(6):5530-5541. doi: 10.3168/jds.2018-15687
19. Liang Y, Batistel F, Parys C, Loor JJ. Methionine supply during the periparturient period enhances insulin signaling, amino acid transporters, and mechanistic target of rapamycin pathway proteins in adipose tissue of Holstein cows. *J Dairy Sci.* 2019b;102(5):4403-4414. doi: 10.3168/jds.2018-15738
20. Lopreiato V, Vailati-Riboni M, Parys C, Fernandez C, Minuti A, Loor JJ. Methyl donor supply to heat stress-challenged polymorphonuclear leukocytes from lactating Holstein cows enhances 1-carbon metabolism, immune response, and cytoprotective gene network abundance. *J Dairy Sci.* 2020;103(11):10477-93.
21. Mann S, Sipka A, Leal Yepes FA, Nydam DV, Overton TR, Wakshlag JJ. Nutrient-sensing kinase signaling in bovine immune cells is altered during the postpartum nutrient deficit: a possible role in transition cow inflammatory response. *J Dairy Sci.* 2018;101(10):9360-9370. doi: 10.3168/jds.2018-14549
22. Monteiro APA, Bernard JK, Guo JR, Weng XS, Emanuele S, Davis R, Dahl GE, Tao S. Effects of feeding betaine-containing liquid supplement to transition dairy cows. *J Dairy Sci.* 2017;100(2):1063-1071. doi: 10.3168/jds.2016-11452
23. Roche J, Macdonald K, Schütz K, Matthews L, Verkerk G, Meier S, et al. Calving body condition score affects indicators of health in grazing dairy cows. *J Dairy Sci.* 2013;96(9):5811-5825. doi: 10.3168/jds.2013-6600
24. Soberon F, Van Amburgh ME. Effects of preweaning nutrient intake in the developing mammary parenchymal tissue. *J DairySci.* 2017;100(6):4996-5004. doi: 10.3168/jds.2016-11826
25. Swartz TH, Bradford BJ, Malysheva O, Caudill MA, Mamedova LK, Estes KA. Effects of dietary rumen-protected choline supplementation on colostrum yields, quality, and choline metabolites from dairy cattle. *JDS Commun.* 2022;3(4):296-300. doi: 10.3168/jdsc.2021-0192
26. Zenobi MG, Scheffler TL, Zuniga JE, Poindexter MB, Campagna SR, Castro Gonzalez HF, et al. Feeding increasing amounts of ruminally protected choline decreased fatty liver in nonlactating, pregnant Holstein cows in negative energy status. *J Dairy Sci.* 2018;101(7):5902-5923. doi: 10.3168/jds.2017-13973
27. Zhou Z, Ferdous F, Montagner P, Luchini DN, Correa MN, Loor JJ. Methionine and choline supply during the periparturient period alter polymorphonuclear leukocyte immune response and immunometabolic gene expression in Holstein cows. *J Dairy Sci.* 2018;101(11):10374-10382. doi: 10.3168/jds.2018-14972
28. Zhou Z, Vailati-Riboni M, Trevisi E, Drackley JK, Luchini DN, Loor JJ. Better postpartal performance in dairy cows supplemented with rumen-protected methionine compared with choline during the periparturient period. *J Dairy Sci.* 2016;99(11):8716-32. doi: 10.3168/jds.2015-10525

Информация об авторах:

Константин Сергеевич Остренко, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией иммунобиотехнологии и микробиологии, Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр жи-

вотноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», 249013, Калужская обл., г. Боровск, пос. Институт, тел.: +7(910)9166658.

Михаил Михайлович Луговой, кандидат биологических наук, руководитель инновационных проектов ГК «РУСАГРО». 115054, Москва, ул. Валуевская, д. 35, тел.: +7 (999)5569601.

Роман Владимирович Некрасов, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, заведующий отделом кормления сельскохозяйственных животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, Городской округ Подольск, поселок Дубровицы, д. 60, тел.: +7(905)7004427.

Information about the authors:

Konstantin S Ostrenko, Dr Sci. (Biology), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Immunobiotechnology and Microbiology, All-Russia Research Institute of Animal Physiology, Biochemistry, and Nutrition, Branch of Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Kaluga region, Borovsk, village Institute, 249013, tel.: +7(910)9166658.

Mikhail M Lugovoy, Cand. Sci. (Biology), Head of Innovative Projects of Group of Companies «RUSAGRO», 35 Valovaya Street, Moscow, 115054, tel.: +7 (999)5569601.

Roman V Nekrasov, Dr Sci. (Agriculture), Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Head of the Department of Feeding Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, tel.: +7(905)7004427.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 11.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 169-176.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 169-176.

Научная статья
УДК 636.085.55:636.088.5
doi:10.33284/2658-3135-107-4-169

**Эффективность использования комбикормов с скорректированной минеральной
питательностью по различным нормативам NRC и NASEM
на молочную продуктивность коров**

Баер Серекпаевич Нуржанов¹, Константин Григорьевич Логачев², Галимжан Калиханович Дускаев³
¹²³Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия
¹baer.nurzhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3240-6112>
²k-logachev84@ya.ru
³gduskaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367>

Аннотация. В работе представлены результаты сравнительной оценки влияния комбикормов с скорректированной минеральной питательностью по различным нормативам на молочную продуктивность коров. Согласно нормативам 2021 года нами был увеличен ввод ряда микроэлементов: цинка – на 9,4 %, марганца – на 125 %, кобальта – на 67 %, железа – на 9,1 % и хрома – 33,3 % по сравнению с нормами 2001 года. Согласно табличным данным средние значения в 2022 году увеличились по потреблению комбикормов на 24,4 %, скорости доения – на 0,32 л/мин; надою на голову в месяц – на 4,54 %. Наблюдая за опытным поголовьем, мы отмечали увеличение кратности посещения доильного робота, о чём свидетельствует рост потребления комбикорма. Благодаря коррекции рациона по минеральным веществам по нормам 2021 года значительно улучшилась крепость копытного рога, что подтверждено специалистами при обработке копыт.

Ключевые слова: коровы, кормление, норматив NRC, норматив NASEM, комбикорм, молочная продуктивность, минеральная питательность

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0002).

Для цитирования: Нуржанов Б.С., Логачев К.Г., Дускаев Г.К. Эффективность комбикормов с скорректированной минеральной питательностью по различным нормативам NRC и NASEM на молочную продуктивность коров // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 169-176. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-169>

Original article

**Efficiency of using compound feeds with adjusted mineral nutrition according to various NRC
and NASEM standards on milk productivity of cows**

Baer S Nurzhanov¹, Konstantin G Logachev², Galimzhan K Duskaev³
¹²³Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia
¹baer.nurzhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3240-6112>
²k-logachev84@ya.ru
³gduskaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367>

Abstract. The paper presents the results of a comparative assessment of the effect of compound feeds with adjusted mineral nutrition according to various standards on milk productivity of cows. Ac-

According to the 2021 standards, we increased the input of a number of microelements: zinc by 9.4%, manganese by 125%, cobalt by 67%, iron by 9.1% and chromium by 33.3% compared to the 2001 standards. According to the tabular data, the average values in 2022 increased for compound feed consumption by 24.4%, milking speed by 0.32 l/min; milk yield per head per month by 4.54%. Observing the experimental herd, we registered an increase in the frequency of visits to the milking robot, as evidenced by the increase in compound feed consumption. Due to the correction of the diet for minerals according to the 2021 standards, the strength of the hoof horn has significantly improved, which is confirmed by specialists during hoof treatment.

Keywords: cows, feeding, NRC standard, NASEM standard, compound feed, milk productivity, mineral nutrition

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0002).

For citation: Nurzhanov BS, Logachev KG, Duskaev GK. Efficiency of compound feeds with adjusted mineral nutrition according to various NRC and NASEM standards on milk productivity of cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):169-176. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-169>

Введение.

Минеральные вещества должны поступать с кормами для поддержания в нормальном состоянии здоровья и продуктивности молочных коров, так и для всего живого. Традиционно в кормах и добавках для животных чаще всего применялись неорганические формы минеральных веществ. Основным ограничением существующей системы минеральной питательности является отсутствие данных о поглощении большинства химических элементов. По большинству минералов почти нет данных об их истинном усвоении коровами, а тем данным, которые имеются, зачастую более 60 лет. Измерение истинного поглощения очень сложно и дорого (обычно для этого требуется использование стабильных изотопов), поэтому данные настолько ограничены. Кроме того, мы знаем, что существуют антагонистические отношения между многими минералами, но в целом нет достаточных данных для количественной оценки эффектов (NASEM, 2021; Van Emon M et al., 2020; Ianni A et al., 2019).

Следует учитывать, что в условиях промышленной технологии повышение биологической полноценности рационов имеет особое значение, так как система содержания молочного скота подразумевает ограничение движения (без пастбищная, безвыгульная). Скопление большого поголовья в одном месте, работа большого количества механизмов на ферме увеличивает возможность стрессов и снижает резистентность животных к различным заболеваниям. Кроме того, интенсивное использование почвы, внесение дополнительных компонентов согласно агрономической схемы подкормки культур вызывают изменение элементного состава растений. В этих условиях увеличивается число факторов, отрицательно влияющих на организм, животные становятся особо чувствительными к погрешностям кормления (Fantuz F et al., 2013; Ширнина Н.М. и др., 2022).

Кормление остаётся одним из основных факторов, определяющих продуктивность животных, за которые неизменно отвечает человек. Балансирование питательных веществ, макро- и микроэлементов, профилактика болезней и поддержание здоровой микрофлоры в организме животных – это всё учитывает специалист при составлении рациона кормления, пользуясь литературой, основанной на производственных опытах. Технология содержания и кормления определяет выбор системы нормирования питания молочного стада, что в свою очередь обуславливает продуктивность и здоровье животных (McCarthy KL et al., 2022; Palomares RA, 2022).

Цель исследования.

Изучить сравнительную эффективность комбикормов с скорректированной минеральной питательностью по различным нормативам NRC и NASEM на молочную продуктивность коров.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Коровы голштинской породы в возрасте 4-5 лет.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все процедуры над животными были выполнены в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФНИЦ БСТ РАН.

Схема эксперимента. Исследования выполнялись в ООО "Дерней" Свердловской области на коровах (n=20) с роботизированной системой доения. Все животные в раздойной группе получали комбикорма, скорректированные по старым (NRC) и новым (NASEM) нормативам.

Животные всех подопытных групп находились в одинаковых условиях, отвечающих всем зоотехническим и зоогигиеническим требованиям.

Потребление корма измерялось индивидуально и регистрировалось ежедневно как разница между количеством задаваемого корма и остатка. Контрольная группа получала основной рацион (ОР)+комбикорм, сбалансированный по минералам согласно нормативам NRC, I опытная – ОР+комбикорм, сбалансированный по минералам согласно нормативам NASEM. Комбикорм разработан Богдановичским комбикормовым заводом (Богданович, Россия) и включал в себя: пшеница, ячмень, кукуруза кормовая, шрот соевый, шрот подсолнечный, масло подсолнечное нерафинированное, меласса свекловичная, дрожжи кормовые, соль поваренная, монокальций фосфат, известковая мука, премикс.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>).

Статистическая обработка. Статистический анализ выполняли с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) и обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Статистическая обработка включала расчёт среднего значения (M) и стандартные ошибки среднего ($\pm$ SEM). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Уровень значимой разницы был установлен на $P \leq 0,05$.

Результаты исследования.

Большинство предприятий как с традиционными системами содержания, так и современные комплексы с использованием роботизированного доения используют нормативы, рекомендуемые и активно использующиеся мировым сообществом животноводов. Последние рекомендации по нормированию питательности, в том числе минеральной, были представлены в 2021 году National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) (табл. 1).

Согласно нормативам 2021 года ввод ряда микроэлементов был увеличен: цинка – на 9,37 %, марганца – на 125 %, кобальта – на 66,7 %, железа – на 9,09 % и хрома – 33,3 % по сравнению с нормами 2001 года.

Основной рацион животных дойных групп не изменялся с 2021 года, и корректировки происходят исключительно за счёт минеральной составляющей комбикорма. Состав основного рациона: силос кукурузный 10 кг, силос бобово-злаковый 25 кг, солома 1 кг, ячмень 1,9 кг, жмых рапсовый 1,9 кг, барда сухая кормовая 0,85 кг, комбикорм 7 кг, углеводная добавка (кукуруза/сахар – 50/50) 0,25 кг.

Из полученных данных можно судить, что одни и те же животные в один и тот же период лактации с изменением нормативов ввода минеральной части дали увеличение потребления комбикормов за счёт их лучшего усвоения, что также способствовало увеличению продуктивности (табл. 2).

Таблица 1. Минеральная питательность комбикорма по нормативам National Research Council (NRC, 2001) и NASEM (2021)

Table 1. Mineral nutritional value of compound feed according to the standards of the National Research Council (NRC, 2001) and NASEM (2021)

Минералы / Minerals	Нормирование по минералам (в том числе органическим) мг/голову/день / Rationing for minerals (including organic) mg/head/day/	
	2001	2021
Цинк, мг / Zinc, mg	1600	1750
Марганец, мг / Manganese, mg	400	900
Медь, мг / Copper, mg	325	300
Кобальт, мг / Cobalt, mg	3	5
Йод, мг / Iodine, mg	12,5	12,5
Железо, мг / Iron, mg	500	550
Селен, мг / Selenium, mg	6	6
Хром, мг / Chromium, mg	6	8

Таблица 2. Выборка животных в раздойной группе по показателям качества молока и потреблению комбикормов, средняя продуктивность стада

Table 2. Sample of animals in the milking group according to milk quality indicators and feed consumption, average herd productivity

№ коровы / № cows	NRC				NASEM			
	ско- рость доения, л/мин / Milking speed, l/min	жир, % / Fat, %	белок, % / Protein, %	потре- бление комби- кормов, кг / Con- sumption of com- pound feed, kg	ско- рость доения, л/мин / Milking speed, l/min	жир, % / Fat, %	белок, % / Protein, %	потребле- ние ком- бикормов, кг / Con- sumption of com- pound feed, kg
199 / 215	2,0	4,34	3,07	4,9	2,4	4,20	3,23	6
395/ 112	3,7	4,56	3,11	5,4	4,3	4,38	3,16	6,2
382/ 377	2,0	3,52	3,14	6,8	2,5	3,65	3,22	6,5
41/ 261	2,7	3,48	3,29	4,6	3,5	3,05	3,28	6,8
863/ 457	2,8	3,81	3,16	3,5	2,7	3,74	3,29	5,1
72/ 68	2,1	4,19	3,42	4,9	2,4	3,85	3,48	5,5
239/ 91	1,7	3,29	3,32	5,1	1,8	3,06	3,35	6,3
144/ 137	1,6	3,39	3,23	4,7	1,7	3,44	3,28	6,7
422/ 389	2,3	3,96	3,26	5,2	2,7	3,89	3,36	6,2
238/ 651	1,5	4,52	3,16	4,6	1,6	4,13	3,18	6,5
Средние значения / Average values	2,24	3,9	3,21	4,9	2,56	3,7	3,28	6,1
Надой на одну фуражную корову за месяц, кг / Milk yield per forage cow per month, kg	2024				2116			

Скорость доения коров из опытной группы у всех животных была выше, чем в контроле и варьировалась в пределах 6,66-29,6 %. Согласно табличным данным средние значения (норматив NASEM) увеличились по потреблению комбикормов на 24,4 %, скорости доения – на 0,32 л/мин, надою на голову в месяц – на 4,54 %. Следует отметить, что и количество белка в молоке заметно увеличилось у коров из опытной группы относительно контрольной. Так, наибольшее его количество было зарегистрировано в молоке от коровы под номером 68.

Наблюдая за опытным поголовьем, мы отмечаем увеличение кратности посещения доильного робота, о чём свидетельствует рост потребления комбикорма. Благодаря коррекции рациона по минеральным веществам улучшилась крепость копытного рога и состояние пальцевой подушечки, что подтверждено специалистами при обработке копыт.

Обсуждение полученных результатов.

Микроэлементы играют важную роль в иммунитете, здоровье и продуктивности крупного рогатого скота (Overton TR and Yasui T, 2014; Castillo C et al., 2006; Тагиров Х.Х. и др., 2023). Хотя микроэлементы необходимы в небольших количествах, они имеют фундаментальное значение для ферментов, участвующих в антиоксидантной защите от повреждения клеток и нескольких путей иммунного ответа. Баланс минералов в организме крупного рогатого скота зависит от соотношения между содержанием их в рационе и их потребностями (Horst EA et al., 2021).

В своих исследованиях Core CM и его коллеги (2009) заметили, что надои молока не увеличивались, когда содержание цинка и других элементов в рационе снижалось до уровня ниже рекомендаций NRC. Однако независимо от источника цинка NASEM рекомендует 60 мг общего количества цинка в рационе на один кг диетического рациона для молочной коровы весом 650 кг, производящей 50 кг молока в день (Oconitrillo M et al., 2024).

В своих исследованиях авторы оценивали сниженные уровни протеинов неорганических микроэлементов вместе с Se-дрожжами у коров в середине лактации и сообщили о более высоких удоях по сравнению с коровами, которых кормили либо контрольным рационом, либо сниженным уровнем неорганических микроэлементов (Pomport PH et al., 2021). Uchida K и соавторы (2001) не наблюдали различий в молочной продуктивности, но заметили улучшение репродуктивных качеств, когда они частично заменили неорганические микроэлементы хелатами аминокислот (Zn, Mn и Cu) в рационе молочных коров в начале лактации.

Наши данные согласуются с работой Horchanok A с коллегами (2019), введших органические формы элементов (Mn, Cu и Zn) в рационы молочных коров по новым нормативам. Они наблюдали значительное улучшение надоев молока (21,3 %; $P \leq 0,001$) и увеличение содержания белка и жира в молоке коров, которых кормили органическими элементами.

Заключение.

В связи с внедрением комбикорма с скорректированной минеральной питательностью по современным нормативам NASEM в хозяйстве ООО "Дерней" Свердловской области с роботизированным доением, наблюдался рост потребления комбикормов на 24,4% и продуктивности молочных коров в среднем на 4,5%.

Список источников

1. Тагиров Х.Х., Латыпова Э.Х., Вагапов И.Ф. Динамика питательных веществ в молоке коров "башкирского" типа чёрно-пёстрой породы под действием скармливания кормовых премиксов на примере премикса Мегамикс-Оптилак // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 102-111. [Tagirov KhKh, Latypova EK, Vagapov IF. Dynamics of nutrients in the milk of cows of the "Bashkir" type of Black Spotted breed under the influence of feed premixes using the example of the Megamix-Optilac premix. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):102-111. (In Russ)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-102

2. Увеличение эффективности производства молока коров при использовании в составе рационов кавитационно обработанных концентратов / Н.М. Ширнина, Б.С. Нуржанов, И.А. Рахимжанова, В.В. Кононец // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 2. С. 49-59. [Shirnina NM, Nurzhanov BS, Rakhimzhanova IA, Kononets VV. Increasing the efficiency of cow milk production when using cavitation-treated concentrates as part of diets. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(2):49-59. (In Russ)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-2-49
3. Castillo C, Hernández J, Valverde I, Pereira V, Sotillo J, Alonso ML, Benedito JL. Plasma malonaldehyde (MDA) and total antioxidant status (TAS) during lactation in dairy cows. *Res Vet Sci*. 2006;80(2):133-139. doi: 10.1016/j.rvsc.2005.06.003
4. Cope CM, Mackenzie AM, Wilde D, Sinclair LA. Effects of level and form of dietary zinc on dairy cow performance and health. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(5):2128-2135. doi: 10.3168/jds.2008-1232
5. Fantuz F, Ferraro S, Todini L, Mariani P, Piloni R, Salimei E. Essential trace elements in milk and blood serum of lactating donkeys as affected by lactation stage and dietary supplementation with trace elements. *Animal*. 2013;7(11):1893-1899. doi: 10.1017/S175173111300133X
6. Horchanok A, Hubanova N, Bomko V, Kuzmenko O, Novitskiy R, Sobolev O, Tkachenko M, Prisjajhnjuk N. Influence of chelations on dairy productivity of cows in different periods of manufacturing cycle. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019;9(1):231-234.
7. Horst EA, Kvidera SK, Baumgard LH. Invited review: The influence of immune activation on transition cow health and performance - A critical evaluation of traditional dogmas. *J Dairy Sci*. 2021;104(8):8380-8410. doi: 10.3168/jds.2021-20330
8. Ianni A, Innosa D, Martino C, Grotta L, Bennato F, Martino G. Zinc supplementation of Friesian cows: Effect on chemical-nutritional composition and aromatic profile of dairy products. *J Dairy Sci*. 2019;102(4):2918-2927. doi: 10.3168/jds.2018-15868
9. McCarthy KL, Menezes ACB, Kassetas CJ et al. Vitamin and mineral supplementation and rate of gain in beef heifers II: effects on concentration of trace minerals in maternal liver and fetal liver, muscle, allantoic, and amniotic fluids at day 83 of gestation. *Animals (Basel)*. 2022;12(15):1925. doi: 10.3390/ani12151925
10. National Academies of Science, Engineering, and Medicine (NASEM). Nutrient requirements of dairy cattle. Eighth Revised Edition. Washington, DC: The National Academies Press; 2021:502 p. doi: 10.17226/25806. 2021
11. Oconitrillo M, Wickramasinghe J, Omale S, Beitz D, Appuhamy R. Effects of elevating zinc supplementation on the health and production parameters of high-producing dairy cows. *Animals (Basel)*. 2024;14(3):395. doi: 10.3390/ani14030395
12. Overton R, Yasui T. Practical applications of trace minerals for dairy cattle. *J Anim Sci*. 2014;92(2):416-26. doi: 10.2527/jas.2013-7145
13. Palomares RA. Trace minerals supplementation with great impact on beef cattle. *Animals (Basel)*. 2022;12(20):2839. doi: 10.3390/ani12202839
14. Pomport PH, Warren HE, Taylor-Pickard J. Effect of total replacement of inorganic with organic sources of key trace minerals on performance and health of high producing dairy cows. *J Appl Anim. Nutr*. 2021;9(1):23-30. doi: 10.3920/JAAN2020.0018
15. Uchida K, Mandebvu P, Ballard CS, Sniffen CJ and Carter MP. Effect of feeding a combination of zinc, manganese and copper amino acid complexes, and cobalt glucoheptonate on performance of early lactation high producing dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*. 2001;93(3-4):193-203. doi: 10.1016/S0377-8401(01)00279-6
16. Van Emon M, Sanford C, McCoski S. Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health. *Animals*. 2020;10(12):2404. doi: 10.3390/ani10122404

References

1. Tagirov KhKh, Latypova EK, Vagapov IF. Dynamics of nutrients in the milk of cows of the “Bashkir” type of Black Spotted breed under the influence of feed premixes using the example of the Megamix-Optilac premix. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):102-111. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-102
2. Shirnina NM, Nurzhanov BS, Rakhimzhanova IA, Kononets VV. Increasing the efficiency of cow milk production when using cavitation-treated concentrates as part of diets. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(2):49-59. doi: 10.33284/2658-3135-105-2-49
3. Castillo C, Hernández J, Valverde I, Pereira V, Sotillo J, Alonso ML, Benedito JL. Plasma malonaldehyde (MDA) and total antioxidant status (TAS) during lactation in dairy cows. *Res Vet Sci*. 2006;80(2):133-139. doi: 10.1016/j.rvsc.2005.06.003
4. Cope CM, Mackenzie AM, Wilde D, Sinclair LA. Effects of level and form of dietary zinc on dairy cow performance and health. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(5):2128-2135. doi: 10.3168/jds.2008-1232
5. Fantuz F, Ferraro S, Todini L, Mariani P, Piloni R, Salimei E. Essential trace elements in milk and blood serum of lactating donkeys as affected by lactation stage and dietary supplementation with trace elements. *Animal*. 2013;7(11):1893-1899. doi: 10.1017/S175173111300133X
6. Horchanok A, Hubanova N, Bomko V, Kuzmenko O, Novitskiy R, Sobolev O, Tkachenko M, Prizhazhnyuk N. Influence of chelations on dairy productivity of cows in different periods of manufacturing cycle. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019;9(1):231-234.
7. Horst EA, Kvidera SK, Baumgard LH. Invited review: The influence of immune activation on transition cow health and performance - A critical evaluation of traditional dogmas. *J Dairy Sci*. 2021;104(8):8380-8410. doi: 10.3168/jds.2021-20330
8. Ianni A, Innosa D, Martino C, Grotta L, Bennato F, Martino G. Zinc supplementation of Friesian cows: Effect on chemical-nutritional composition and aromatic profile of dairy products. *J Dairy Sci*. 2019;102(4):2918-2927. doi: 10.3168/jds.2018-15868
9. McCarthy KL, Menezes ACB, Kassetas CJ et al. Vitamin and mineral supplementation and rate of gain in beef heifers II: effects on concentration of trace minerals in maternal liver and fetal liver, muscle, allantoic, and amniotic fluids at day 83 of gestation. *Animals (Basel)*. 2022;12(15):1925. doi: 10.3390/ani12151925
10. National Academies of Science, Engineering, and Medicine (NASEM). Nutrient requirements of dairy cattle. Eighth Revised Edition. Washington, DC: The National Academies Press; 2021:502 p. doi: 10.17226/25806. 2021
11. Oconitrillo M, Wickramasinghe J, Omale S, Beitz D, Appuhamy R. Effects of elevating zinc supplementation on the health and production parameters of high-producing dairy cows. *Animals (Basel)*. 2024;14(3):395. doi: 10.3390/ani14030395
12. Overton R, Yasui T. Practical applications of trace minerals for dairy cattle. *J Anim Sci*. 2014;92(2):416-26. doi: 10.2527/jas.2013-7145
13. Palomares RA. Trace minerals supplementation with great impact on beef cattle. *Animals (Basel)*. 2022;12(20):2839. doi: 10.3390/ani12202839
14. Pomport PH, Warren HE, Taylor-Pickard J. Effect of total replacement of inorganic with organic sources of key trace minerals on performance and health of high producing dairy cows. *J Appl Anim. Nutr*. 2021;9(1):23-30. doi: 10.3920/JAAN2020.0018
15. Uchida K, Mandevu P, Ballard CS, Sniffen CJ and Carter MP. Effect of feeding a combination of zinc, manganese and copper amino acid complexes, and cobalt glucoheptonate on performance of early lactation high producing dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*. 2001;93(3-4):193-203. doi: 10.1016/S0377-8401(01)00279-6
16. Van Emon M, Sanford C, McCoski S. Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health. *Animals*. 2020;10(12):2404. doi: 10.3390/ani10122404

Информация об авторах:

Баер Серекпаевич Нуржанов, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)308-179.

Константин Григорьевич Логачев, кандидат биологических наук, соискатель, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)308-179.

Галимжан Калиханович Дускаев, доктор биологических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)308-179.

Information about the Author:

Baer S Nurzhanov, Dr Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Department of Feeding of Farm Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Scientific Centre for Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532)308-179.

Konstantin G Logachev, Cand. Sci. (Biology), postgraduate student, Federal Research Centre for Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532)308-179.

Galimzhan K Duskaev, Dr Sci. (Biology), Professor of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Department of Feeding of Agricultural Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532)308-179.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 03.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 02.09.2024; approved after reviewing 03.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 177-183.

Original article
doi:10.33284/2658-3135-107-4-177

Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals

George V Goilean¹, Romeo T Cristina², Alexandru O Doma³, Eugenia Dumitrescu⁴, Mihai Folescu⁵, Florin Muselin^{6,7}

^{1,2,3,4,5,6} University of Life Sciences “King Michel I of Romania” from Timisoara, Timisoara, Romania

⁷Working Group for Xenobiochemistry, Romanian Academy-Branch Timisoara, Timisoara, Romania

²<https://orcid.org/0000-0002-5420-1516>

³<https://orcid.org/0000-0001-5252-6969>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-8346-6230>

^{6,7}florin.muselin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2907-4233>

Abstract. The paper presents data regarding the impact of some trace mineral supplementation on milk minerals content of glycine chelated mineral supplemented dairy cows. The study was made on thirty Holstein multiparous dairy cows, aging around 62 ± 4.5 months that were divided randomly in two groups: C – Control receiving normal diet without glycine mineral supplementation and one experimental group (E) that received supplement of glycine chelated Cu, Zn, Mn and Fe as follows: 15 mg/kg Cu, 20 mg/kg Mn, 60 mg/kg Zn and, 100 mg/kg Fe, added in concentrate feed. The experiment was designed from day 30 of lactation until day 100 of lactation, and were assessed the milk levels of zinc (Zn), selenium (Se), iron (Fe), manganese (Mn) and copper (Cu). In the experimental group we observed significant ($P \leq 0.05$) increase of milk concentration of Se, Mn and Cu at day 65 of lactation and highly significant ($P \leq 0.01$) increase of Zn, Se, Mn and Cu in the day 100 of lactation. The Fe content was increased in all period of study, but the increase was not statistically significant ($P \geq 0.05$). We conclude that supplementing the dairy cows with chelated minerals will be followed by a increase of milk mineral content that could be beneficial for health.

Keywords: milk minerals, dairy cows, supplements, minerals, trace elements

For citation: Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Folescu M, Muselin F. Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):177-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-177>

Introduction.

Trace minerals are crucial for various physiological processes, including health maintenance, antioxidant protection, and enhancing the productivity of dairy cows (Faulkner MJ and Weiss WP, 2017; Wu G, 2018). Conversely, a deficiency in trace minerals can weaken the immune system of dairy cows (Spears JW and Weiss WP, 2008).

Ruminants often experience significant dietary deficiencies of trace elements such as cobalt, copper, iodine, selenium, zinc, and manganese (Hidiroglu M, 1979). These deficiencies can significantly impact their overall performance and production levels (Mackenzie AM et al., 2001).

Milk is a vital nutrient-rich food source that has been integral to human diets across various cultures for centuries. It is not only a significant source of macronutrients such as carbohydrates, proteins, and fats but also contains an array of bioactive compounds including vitamins and minerals. Among these, trace minerals are essential for many physiological functions and overall health. Trace minerals, including iron, zinc, copper, manganese, and selenium, play crucial roles in metabolic processes, immune function, and cellular integrity (Maret W, 2020).

While milk is often acknowledged for its calcium and vitamin D content, its profile of trace minerals is equally important. For example, studies indicate that the bioavailability of iron and zinc from dairy products is significant, contributing to the nutritional needs of populations worldwide (Hercberg S and Galan P, 2010). Additionally, the presence of trace minerals in milk has been associated with various health benefits, including enhanced bone health, immune support, and a reduced risk of certain chronic diseases (Silva BB et al., 2020).

Previous studies, including our own (Goilean GV et al., 2022), have reported positive effects of trace mineral supplementation or the use of different organic forms of trace minerals in dairy cows. These benefits include increased production of milk (Rabiee AR et al., 2010), reduced the number of somatic cells (Kellogg DW et al., 2004), decreased incidence of lameness and, improved general foot health in dairy cows (Nocek JE et al., 2000; Siciliano-Jones JL et al., 2008; Overton TR and Yasui T, 2014).

The aim of the research.

Study of the influence of glycine chelated minerals on the level of some selected trace minerals in the milk of supplemented dairy cows.

Materials and methods of the research.

Object of study. The study was conducted on 30 multiparous Holstein dairy cows, each aging approximately 62 ± 4.5 months and weighing 462 ± 23 kg. The cows were kept in individual tie stalls within a private agricultural facility in Bihor County, Romania.

The experimental procedures and the inclusion of the animals in the study were approved by the Scientific Committee (Decision no. 62 /15.11.2020). Furthermore, all procedures complied with the EU Directive on Animal Experiments (Directive 2010/63/EU...).

Experimental scheme. The cows were randomly divided into two groups (n=15): a control group (C) receiving a normal diet without glycine mineral supplementation, and an experimental group (E) supplemented with glycine chelated Cu, Zn, Mn, and Fe (E.C.O. Trace®, Biochem, Germany) in the following amounts: 15 mg/kg Cu, 60 mg/kg Zn, 20 mg/kg Mn, and 100 mg/kg Fe, added to their concentrate feed.

The experiment starts from day 30 of lactation until day 100 of lactation. The milk was sampled in day 0 (day 30 of lactation) in the middle and end of experiment (day 65 and day 100 of lactation). The feeding was twice a day, in an individual front as was previously reported (Goilean G et al., 2022). The total chemical content of the ratio is presented in table 1.

Table 1. **Content of ratio for dairy cows used in experiment**

Parameter	Unit	Values
DM	%	48.2
Crude Protein (CP)	%	16.96
Soluble protein	% from CP	49.5
NE	Mcal/kg	1.65
Ca	%	1.02
P	%	0.31
Mg	%	0.38
K	%	1.07
Na	%	0.33
Cl	%	0.32
Vitamin A	IU/kg	11 400
Vitamin D	IU/kg	3100
Vitamin E	IU/kg	35200
Fe	ppm	208.33
Zn	ppm	26.91
Cu	ppm	9.14
Mn	ppm	24.27
Se	ppm	0.19

Equipment and technical facilities. The levels of the main bioelements manganese (Mn), selenium (Se), zinc (Zn), copper (Cu), and iron (Fe) in milk were analyzed using a furnace with pyrolytic tube for Mn, Se and Cu, and flame analysis for Zn and Fe by atomic absorption spectroscopy (AAS) using a ContrAA800 spectrophotometer (Analytic Jena, Germany). Preparation of the samples were by

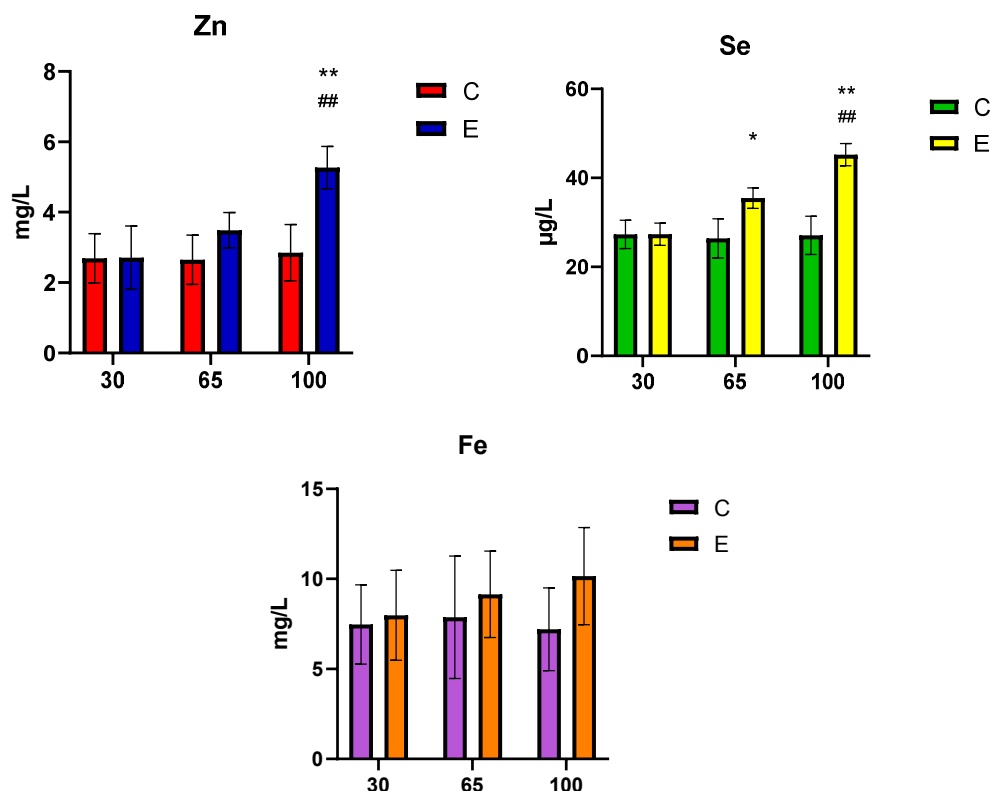
microwave digestion (Anton Paar, Austria) adding in the digestion vases: 1 ml milk sample, 10 ml of concentrated nitric acid and 2 ml hydrogen peroxide. The microwave parameters were 10 min, 120°C, 800 W.

Statistical processing. The results were statistically analyzed by one-way ANOVA using the Bonferroni correction, considering the differences statistically provided when $P \leq 0.05$ or lower, all values being expressed as mean $\pm$ SD. The used software was GraphPad Prism 6.0 for Windows (GraphPad Software, San Diego, USA).

Results and discussions

Cow milk is a widely consumed dairy product rich in essential nutrients, including various minerals that will provide energy and support growth across all age groups and species (Gaucheron F, 2005). It contains minerals at levels of lower than 1% (w/w), which are valuable sources of electrolytes and vital trace elements necessary for healthy growth and development (Reilly C, 2004). Research has shown that the mineral composition of milk varies significantly among different cattle breeds, influenced by physical and environmental factors (Raynal-Ljutovac K et al., 2008a). Variations in the electrolytes and essential trace elements found in cattle milk may result from several factors, including the species of cattle, their health, nutritional diet, stage of lactation, and the ecological and geographical conditions (Raynal-Ljutovac K et al., 2008a; Navarro-Alarcon M et al., 2011; Chen L et al., 2020).

As is presented in figure 1, in our study we observed that the Zn milk content was almost at the same level at the beginning of milking period (day 30) in both groups (E/C: +0.74%) but increased during the lactation period in cows supplemented with chelated minerals, not significantly ($P \geq 0.05$) at day 65 of lactation (E/C: +31.69%) but strongly significant ($P \leq 0.01$) in the day 100 of lactation (E/C: +84.91%). Comparative to the start of milking period the Zn level was increased in group received chelated minerals (E_{65}/E_{30} : +28.78%, E_{100}/E_{65} : +51.01%) the highly significant ($P \leq 0.01$) increase being observed in day 100 comparative to day 30 (E_{100}/E_{30} : +94.46%).



Comparison E/C: * - $P \leq 0.05$, ** - $P \leq 0.01$ Comparison 100 days with days 30 and 65: ## - $P \leq 0.01$

Figure 1. Milk levels of Zn, Se and Fe in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals

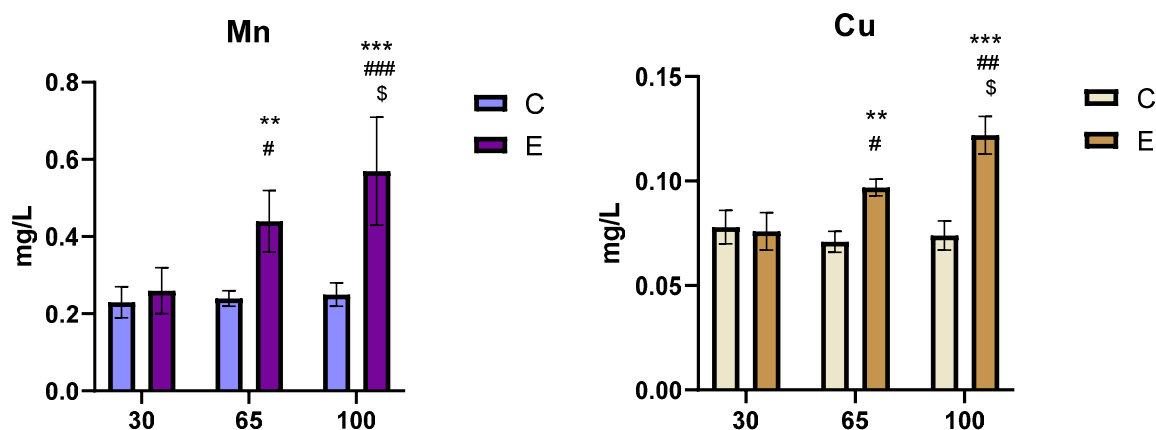
Zinc is an essential trace element that supports immune function and is involved in numerous enzymatic processes. According to Raynal-Ljutovac K et al. (2008b), the concentration of zinc in cow milk can vary among different breeds, with some breeds exhibiting higher levels due to genetic factors and dietary intake. In this aim, Proskira N et al. (2016) presented a Zn concentration of $3.7 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ in Jersey cow's milk, and Pilarczyk R et al. (2013) a concentration of $3.02 \mu\text{g}/\text{mL}$ in Simmental and $3.27 \mu\text{g}/\text{mL}$ in Holstein-Friesian cows, concentration that is above that we found in our study in control cows but lower that we observed in cows supplemented with chelated minerals in the day 100 of lactation period.

The Se milk content presented the same level at the beginning of milking period (day 30) in both groups (E/C: +0.14%) and increased during the lactation period in cows supplemented with chelated minerals, significantly ($P \leq 0.05$) at day 65 of lactation (E/C: +34.19%) and strongly significant ($p < 0.01$) in the day 100 of lactation (E/C: +66.80%). Comparative to the start of milking period the Se level was increased in group received chelated minerals (E_{65}/E_{30} : +29.72%, E_{100}/E_{65} : +27.45%) but the highly significant ($P \leq 0.01$) increase was recorded in day 100 comparative to day 30 (E_{100}/E_{30} : +65.33%).

Selenium is an essential trace mineral that plays a key role in antioxidant defense and thyroid function. Chen L et al. (2020) found that selenium levels in cow milk can be influenced by the selenium content in the cows' diet and the geographical region in which they are raised. The selenium content in cow milk is reported to be around 0.01 mg per 100 grams according to the (USDA, 2021). However, research by Haug W et al. (2020) indicates that selenium levels can vary significantly, with some milk samples containing up to 0.03 mg per 100 grams, largely influenced by the selenium content in the cows' diet.

Analyzing the Fe milk content, in our study we observed that at the beginning of milking period (day 30) there were not significant differences between groups (E/C: +6.82%). These differences were increased during the lactation period in cows supplemented with chelated minerals, but all differences were not statistically significant ($P \geq 0.05$) at day 65 of lactation (E/C: +16.13%) and in the day 100 of lactation (E/C: +40.91%). Comparative to the start of milking period the Fe level was increased in group received chelated minerals (E_{65}/E_{30} : +14.53%, E_{100}/E_{30} : +27.31%, E_{100}/E_{65} : +11.15%) but all these differences were not significant ($P \geq 0.05$).

Iron is crucial for oxygen transport in the blood and overall metabolic processes. However, the iron content in cow milk is relatively low compared to other food sources. Reilly C (2004) noted that while cow milk is not a significant source of iron, it can still contribute to the overall dietary intake, especially in combination with other iron-rich foods. Cow milk is generally low in iron, with the USDA reporting about 0.03 mg per 100 grams (USDA, 2021). A study by Hurrell RF et al. (2019) supports this finding, noting that cow milk is not a significant source of iron, which can be a concern for populations relying heavily on dairy for nutrition. Gorska A и Oprzadek K (2011) presented a concentration of $144 \mu\text{g}/\text{kg}$ Fe in the cow's milk in period lower that 100 day of lactation which are much lower that our findings.



Comparison E/C: * - $P \leq 0.05$, *** - $P \leq 0.001$ Comparison 100 days with 30 days: # - $P \leq 0.05$, ## - $P \leq 0.01$, ### - $P \leq 0.001$ Comparison 100 days with 65 days: \$ - $P \leq 0.05$

Figure 2. Milk levels of Mn and Cu in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals

When we analyzed the Mn milk levels, in the start of experiment (day 30) in there were not significant differences between groups (E/C: +13.04%). Advancing in the lactation period we recorded a highly significant ($P \leq 0.01$) increase of Mn content during the lactation period in cows supplemented with chelated minerals at day 65 of lactation (E/C: +83.33%) and even more in the day 100 of lactation (E/C: +128.00%). Comparative to the start of milking period the Mn level was increased in group received chelated minerals (E_{65}/E_{30} : +69.23%, E_{100}/E_{65} : +29.54%) and highly significant ($P \leq 0.01$) increase in day 100 comparative to day 30 (E_{100}/E_{30} : +119.23%).

Manganese is another important mineral found in cow milk, albeit in lower concentrations compared to other minerals. It plays a role in bone formation, metabolism, and antioxidant defense. Research by Navarro-Alarcon M et al. (2011) indicates that the manganese content in milk can be influenced by the cows' diet, particularly the mineral composition of the feed they consume. The manganese content in cow milk is relatively low, with the USDA indicating levels around 0.003 mg per 100 grams (USDA, 2021). Research by Kahn SA et al. (2019) corroborates this, suggesting that cow milk is not a significant source of manganese, as its levels are much lower compared to other food sources. Pilarczyk R et al (2013) a concentration of 0.02 $\mu\text{g/mL}$ in Simmental and Holstein-Friesian cow's milk, concentration that is almost similar to our findings in control cows but lower that we observed in cows supplemented with chelated minerals in the day 65 and 100 of lactation period.

For copper, we found the same dynamic as were for Mn, respectively, in the start of experiment (day 30) in there were not significant differences between groups (E/C: -2.56%). Advancing in the lactation period we recorded a highly significant ($P \leq 0.01$) increase of Cu content during the lactation period when supplementation with chelated minerals was used at day 65 of lactation (E/C: +36.61%) and even more in the day 100 of lactation (E/C: +64.86%). Comparative to the start of milking period the Cu level was increased in group received chelated minerals (E_{65}/E_{30} : +27.63%, E_{100}/E_{65} : +25.77%) and highly significant ($P \leq 0.01$) increase in day 100 comparative to day 30 (E_{100}/E_{30} : +60.52%).

Copper is vital for the formation of red blood cells and maintaining healthy connective tissues. The copper content in cow milk has been shown to vary, with studies indicating that dietary supplementation can enhance copper levels in milk (Gaucheron F, 2011). This highlights the importance of a balanced diet for lactating cows to ensure optimal mineral levels in their milk. The USDA reports that cow milk contains about 0.02 mg of copper per 100 grams (USDA, 2021). However, a study by Kelleher SL et al. (2020) found that the copper content can vary, with some samples showing levels as high as 0.05 mg per 100 grams, indicating that environmental factors and feed can influence copper levels in milk. Proskura N et al. (2016) presented a Zn concentration of 18 $\mu\text{g/dm}^3$ in Jersey cow's milk, and Pilarczyk R et al (2013) a concentration of 0.03 $\mu\text{g/mL}$ in Simmental and 0.04 $\mu\text{g/mL}$ in Holstein-Friesian cows' milk, concentration that are lower that we found in our study in control cows and. Significantly much lower that we observed in cows supplemented with chelated minerals in the day 65 and 100 of lactation period.

Conclusions.

In summary, cow milk provides essential minerals, but the content of zinc, copper, selenium, iron, and manganese can vary based on several factors, including the breed of the cows, their diet, and environmental conditions. Administration of supplements with chelated minerals was followed by a significant increase of milk concentration of studied trace minerals, especially Mn, Zn and Se.

References

1. Chen Lu, Li Xia, Li Zengmei, Deng L. Analysis of 17 elements in cow, goat, buffalo, yak, and camel milk by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). RSC Advances. 2020;10(12):6736-6742.
2. EUR-Lex. Access to European Union Law [Internet]. Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific

purposes. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0063> (accessed 20.08.2024).

3. Faulkner MJ, Weiss WP. Effect of source of trace minerals in either forage-or by-product-based diets fed to dairy cows: 1. Production and macronutrient digestibility. *J Dairy Sci.* 2017; 100(7):5358-67. doi: 10.3168/jds.2016-12095

4. Gaucheron F. Milk and dairy products: a unique micronutrient combination. *Journal of the American College of Nutrition.* 2011;30(5 Suppl 1):400S-409S. doi: 10.1080/07315724.2011.10719983

5. Gaucheron F. The minerals of milk. *Reprod Nutr Dev.* 2005;45(4):473-483. doi: 10.1051/rnd:2005030

6. Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Moruzi RF, Degi DM, Orăsan SA, Muselin F. Effects of glycine chelated Zn, Cu, Mn and Fe supplementation on some milk parameters and serum trace elements levels in dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;105(3):35-39. doi:10.33284/2658-3135-105-3-34

7. Gorska A, Oprzadek K. Concentration of trace elements in raw milk depending on the lactation period and age of cows. *Acta Veterinaria Brno.* 2011;80(2):203-206. doi: 10.2754/avb201180020203

8. Haug W, Lentz K, Schmid H. Variability of selenium content in cow milk and its relationship to dietary intake. *Journal of Dairy Science.* 2020;103(5):4500-4508.

9. Hercberg S, Galan P. Nutritional deficiencies in developing countries: the need for fortified foods. *The Food & Nutrition Bulletin.* 2010;31(2):S317-S328.

10. Hidiogrou M. Trace element deficiencies and fertility in ruminants: a review. *J Dairy Sci.* 1979;62(8):1195-206. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(79)83400-1

11. Hurrell RF, Egli I, Reddy MB. Iron bioavailability from cow milk and its implications for human nutrition. *Food & Nutrition Bulletin.* 2019;40(1):45-53.

12. Kahn SA, Smith JA, Jones RL. Mineral content of milk from different breeds of cows. *Dairy Research Journal.* 2019;12(2):123-130.

13. Kelleher SL, McCarthy J, O'Brien M. The influence of diet on copper levels in cow milk. *Journal of Animal Science.* 2020;98(3):1234-1240.

14. Kellogg DW, Tomlinson DJ, Socha MT, Johnson AB. Review: Effects of zinc methionine complex on milk production and somatic cell count of dairy cows: Twelve-trial summary. *Prof. Anim. Sci.* 2004;20(4):295-301. doi: 10.15232/S1080-7446(15)31318-8

15. Mackenzie AM, Moeini MM, Telfer SB. The effect of a copper, cobalt and selenium bolus on fertility and trace element status of dairy cattle. *BSAP Occasional Publication.* 2001;26(2):423-427. doi: 10.1017/S0263967X00034030

16. Maret W. Zinc in cellular regulation: The role of metallothionein and other zinc ligands. *Journal of Biological Inorganic Chemistry.* 2020;25(1):1-18.

17. Navarro-Alarcón M, Cabrera-Vique C, Ruiz-López MD, Olalla M, Artacho R, Giménez R, Quintana V, Bergillos T. Levels of Se, Zn, Mg and Ca in commercial goat and cow milk fermented products: Relationship with their chemical composition and probiotic starter culture. *Food Chemistry.* 2011;129(3):1126-1131. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.05.090

18. Nocek JE, Johnson AB, Socha MT. Digital characteristics in commercial dairy herds fed metal-specific amino acid complexes. *J Dairy Sci.* 2000;83(7):1553-1572. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(00)75028-4

19. Overton TR and Yasui T. Practical applications of trace minerals for dairy cattle. *Journal of Animal Science.* 2014;92(2):416-426. doi: 10.2527/jas.2013-7145

20. Pilarczyk R, Wójcik J, Czerniak P, Sablik P, Pilarczyk B, Tomza-Marciniak A. Concentrations of toxic heavy metals and trace elements in raw milk of Simmental and Holstein-Friesian cows from organic farm. *Environ Monit Assess.* 2013;185(10):8383-8392. doi: 10.1007/s10661-013-3180-9

21. Proskura N, Podlasińska J, Proskura WS, Frost-Rutkowska A, Dybus A, Szydłowski K. Concentrations of macroelements and trace elements in milk of Jersey cows. *Indian Journal of Animal Research.* 2017;51(1):89-92. doi: 10.18805/IJAR.10977

22. Rabiee AR, Lean IJ, Stevenson MA, Socha MT. Effects of feeding organic trace minerals on milk production and reproductive performance in lactating dairy cows: a meta-analysis. *J Dairy Sci.* 2010; 93(9):4239-4251. doi: 10.3168/jds.2010-3058
23. Raynal-Ljutovac K, Lagriffoul G, Paccard P, Guillet I, Chilliard Y. Composition of goat and sheep milk products: an update. *Small Rumin Res.* 2008b;79(1):57-72. doi: 10.1016/J.SMALLRUMRES.2008.07.009
24. Raynal-Ljutovac K, Lagriffoul G, Paccard P, Guillet I, Chilliard Y. Composition of goat and sheep milk products: An update. *Small Ruminant Research.* 2008a;79(1):57-72. doi: 10.1016/j.smallrumres.2008.07.009
25. Reilly C. The nutritional trace metals. Blackwell Publishing Ltd; 2004: 238 p.
26. Siciliano-Jones JL, Socha MT, Tomlinson DJ, De-Fraen JM. Effect of trace mineral source on lactation performance, claw integrity, and fertility of dairy cattle. *J Dairy Sci.* 2008;91(5):1985-1995. doi: 10.3168/jds.2007-0779
27. Silva BB, Teixeira AR, Ferreira SLC. The role of trace elements in human health: A comprehensive review. *Biological Trace Element Research.* 2020;194(2):451-471.
28. Spears JW, Weiss WP. Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *Vet J.* 2008;176(1):70-76. doi: 10.1016/j.tvjl.2007.12.015
29. USDA. FoodData Central. U.S. Department of Agriculture 2021 [Internet]. Available from: <https://fdc.nal.usda.gov/>
30. Wu G. Principles of animal nutrition, 1th ed. FL, Boca Raton: Taylor 506 & Francis Group, LLC; 2018:800 p.

Information about the authors:

George Vlad Goilean, PhD student, Department of Toxicology, Faculty of Veterinary Medicine, University of Life Sciences “King Michel I of Romania” from Timisoara, 300645, Timisoara, Romania, Calea Aradului 119.

Romeo Teodor Cristina, PhD, DVM, Professor, Head of Department of Toxicology, Faculty of Veterinary Medicine, University of Life Sciences “King Michel I of Romania” from Timisoara, 300645, Timisoara, Romania, Calea Aradului 119.

Alexandru Octavian Doma, PhD, DVM, Assistant Professor, Faculty of Veterinary Medicine, University of Life Sciences “King Michel I of Romania” from Timisoara, 300645, Timisoara, Romania, Calea Aradului 119.

Eugenia Dumitrescu, PhD, DVM, Associate Professor, Departments of Pharmacology and Pharmacy, Faculty of Veterinary Medicine, University of Life Sciences “King Michel I of Romania” from Timisoara, 300645, Timisoara, Romania, Calea Aradului 119.

Mihai Folescu, PhD student, Departments of Pharmacology and Pharmacy, Faculty of Veterinary Medicine, University of Life Sciences “King Michel I of Romania” from Timisoara, 300645, Timisoara, Romania, Calea Aradului 119.

Florin Muselin, PhD, DVM, MS, Associate Professor, Department of Toxicology, Faculty of Veterinary Medicine, University of Life Sciences “King Michel I of Romania” from Timisoara, 300645, Timisoara, Romania, Calea Aradului 119; Romanian Academy-Branch Timisoara, 300223, Timișoara, România, Bv. Mihai Viteazu 24.

The article was submitted 16.09.2024; approved after reviewing 23.09.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 184-191.

Научная статья

УДК 637.11:577.17

doi:10.33284/2658-3135-107-4-184

Содержание микроэлементов в молоке дойных коров, получавших глицин-хелатные минеральные добавки

Джордж Влад Гойлян¹, Ромео Теодор Кристина², Александру Октавиан Дома³,
Евгения Думитреску⁴, Михай Фолеску⁵, Флорин Муселин^{6,7}

^{1,2,3,4,5,6}Университет естественных наук «Король Румынии Мишель I» из Тимишоары, Тимишоара, Румыния

⁷Рабочая группа по ксенобиохимии, Филиал Румынской академии в Тимишоаре, Тимишоара, Румыния

²<https://orcid.org/0000-0002-5420-1516>

³<https://orcid.org/0000-0001-5252-6969>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-8346-6230>

^{6,7}floin.muselin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2907-4233>

Аннотация. В статье представлены данные о влиянии некоторых микроминеральных добавок на элементный состав молока дойных коров, получавших глицин-хелатные минеральные добавки. Исследование проводилось на тридцати полновозрастных дойных коровах голштинской породы в возрасте около 62±4,5 месяцев, которые случайным образом были разделены на две группы: С – контроль, получавший основной рацион без глицин-минеральной добавки, и одна экспериментальная группа (Е), получавшая глицин-хелатные добавки Cu, Zn, Mn и Fe в следующих количествах: Cu – 15 мг/кг, Mn – 20 мг/кг, Zn – 60 мг/кг и Fe – 100 мг/кг, добавленные в концентрированный корм. Эксперимент проводился с 30-го по 100-й дни лактации. В молоке определяли содержание цинка (Zn), селена (Se), железа (Fe), марганца (Mn) и меди (Cu). В молоке опытной группы на 65-й день лактации наблюдалось значительное ($P \leq 0,05$) увеличение концентрации Se, Mn и Cu и высокодостоверное ($P \leq 0,01$) повышение Zn, Se, Mn и Cu на 100-й день лактации. Содержание Fe увеличивалось во все периоды исследования, но изменения не было статистически значимыми ($P \geq 0,05$). Мы пришли к выводу, что добавка хелатированных минералов дойным коровам способствует увеличению содержания элементов в молоке, что положительно сказывается на здоровье животных.

Ключевые слова: дойные коровы, голштинская порода, кормление, минеральные вещества молока, добавки, минералы, микроэлементы

Для цитирования: Содержание микроэлементов в молоке дойных коров, получавших глицин-хелатные минеральные добавки / Д.В. Гойлян, Р.Т. Кристина, А.О. Дома, Е. Думитреску, М. Фолеску, Ф. Муселин // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 184-191. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-184>

Введение.

Микроэлементы играют важнейшую роль в различных физиологических процессах, в том числе поддержание здоровья, антиоксидантная защита и повышение продуктивности дойных коров (Faulkner MJ and Weiss WP, 2017; Wu G, 2018). Напротив, недостаток микроэлементов может ослабить иммунную систему молочных коров (Spears JW and Weiss WP, 2008).

У жвачных животных часто наблюдается значительный недостаток микроэлементов, таких как кобальт, медь, йод, селен, цинк и марганец (Hidiroglu M, 1979). Их недостаток может существенно повлиять на общее развитие и уровень продуктивности (Mackenzie AM et al., 2001).

Молоко – важнейший продукт, богатый питательными веществами, который на протяжении столетий был неотъемлемой частью рациона человека в различных культурах. Оно является не только важным источником питательных веществ, таких как углеводы, белки и жиры, но и содержит множество биологически активных соединений, включая витамины и минеральные вещества. Среди них – микроэлементы, необходимые для многих физиологических функций и общего состояния здоровья. Они, в том числе железо, цинк, медь, марганец и селен, играют важнейшую роль в процессах метаболизма, иммунной функции и целостности клеток (Maret W, 2020).

В то время как молоко – широко известный источник кальция и витамина D, не менее важен и его микроэлементный профиль. Например, исследования показывают очень высокую биодоступность железа и цинка из молочных продуктов, что способствует удовлетворению потребностей населения всего мира в этих элементах (Hercberg S and Galan P, 2010). Кроме того, микроэлементный состав молока связан с поддержанием здоровья, включая укрепление костей, сохранение иммунитета и снижение риска некоторых хронических заболеваний (Silva BB et al., 2020).

В предыдущих исследованиях, в том числе собственном (Goilean GV et al., 2022), сообщалось о положительном влиянии микроэлементных добавок или использовании различных органических форм микроэлементов на молочных коров. Это положительно сказывается на молочной продуктивности (Rabiee AR et al., 2010), сокращает количество соматических клеток (Kellogg DW et al., 2004), снижает заболеваемость хромотой и улучшает общее состояние конечностей у дойных коров (Nocek JE et al., 2000; Siciliano-Jones JL et al., 2008; Overton TR and Yasui T, 2014).

Цель исследования.

Изучение влияния глицин-хелатных минеральных добавок на уровень отдельных микроэлементов в молоке дойных коров.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Полновозрастные дойные коровы голштинской породы возрастом $62 \pm 4,5$ месяца и живой массой 462 ± 23 кг.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были одобрены Научным комитетом (Решение № 62 /15.11.2020). Кроме того, все процедуры соответствовали Директиве ЕС об экспериментах на животных (Directive 2010/63/EU...).

Схема эксперимента. Коровы содержались в индивидуальных стойлах на привязи в частном сельскохозяйственном предприятии в уезде Бихор, Румыния. 30 коров рандомизировано разделили на 2 группы ($n=15$): контрольная группа (С) получала основной рацион без глицин-минеральной добавки, опытная группа (Е) дополнительно к основному рациону получала глицин-хелатные добавки Cu, Zn, Mn и Fe (E.C.O. Tracer®, Biochem, Germany) в следующих количествах: Cu – 15 мг/кг, Mn – 20 мг/кг, Zn – 60 мг/кг и Fe – 100 мг/кг, которые смешивали с концентрированным кормом.

Опыт продолжался с 30-го по 100-й день лактации. Пробы молока отбирались в начале (30-й день лактации), середине и конце (65-й и 100-й дни лактации) эксперимента. Кормление производилось индивидуально дважды в день по описанной ранее методике (Goilean G et al., 2022). Химический состав рациона кормления представлен в таблице 1.

Таблица 1. Питательная ценность рациона дойных коров

Показатель	Ед. изм.	Значение
Сухое вещество	%	48.2
Сырой протеин	%	16.96
Переваримый протеин	% от сырого протеина	49.5
Обменная энергия	Мкал/ кг	1.65
Ca	%	1.02
P	%	0.31
Mg	%	0.38
K	%	1.07
Na	%	0.33
Cl	%	0.32
Витамин А	МЕ/кг	11 400
Витамин D	МЕ/кг	3100
Витамин E	МЕ/кг	35200
Fe	1‰	208.33
Zn	1‰	26.91
Cu	1‰	9.14
Mn	1‰	24.27
Se	1‰	0.19

Оборудование и технические средства. Содержание основных биоэлементов в молоке – марганца (Mn), селена (Se), цинка (Zn), меди (Cu) и железа (Fe) определяли в печи с пиролитической трубкой для Mn, Se и Cu и анализа пламени – для Zn и Fe методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на спектрофотометре ContrAA800 (Analytic Jena, Германия). Подготовка образцов проводилась методом микроволнового сбраживания (Anton Paar, Австрия) с добавлением в сосуды для сбраживания: 1 мл образца молока, 10 мл концентрированной азотной кислоты и 2 мл перекиси водорода. Параметры микроволн составляли 10 мин, +120 °С, 800 Вт.

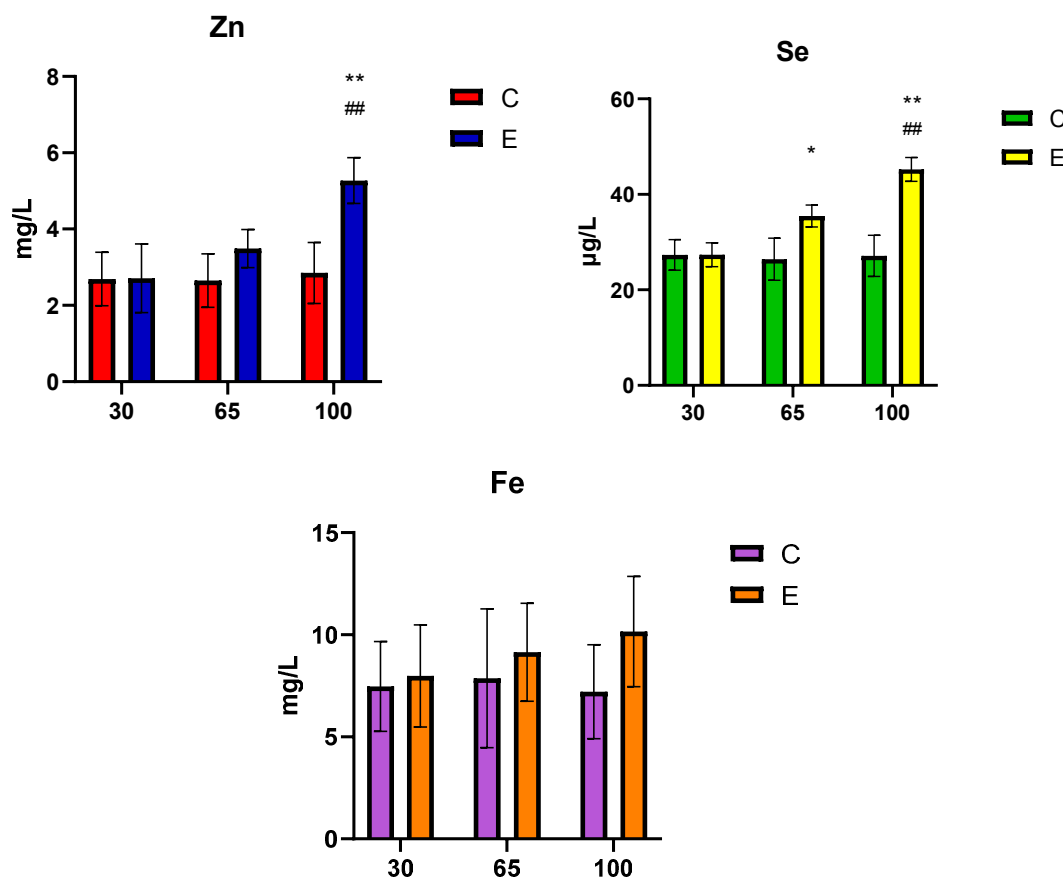
Статистическая обработка. Статистический анализ результатов проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа с поправкой Бонферрони, считая различия статистически достоверными при $P \leq 0,05$ или ниже, все значения выражены как среднее $\pm$ ошибка средней. Использовали программное обеспечение «GraphPad Prism 6.0 for Windows» (GraphPad Software, США).

Результаты исследования и их обсуждение.

Коровье молоко – наиболее распространённый молочный продукт, богатый основными питательными веществами, в том числе минеральными, которые обеспечивают энергией и поддерживают рост всех возрастных групп (Gaucheron F, 2005). Хотя минеральные вещества в молоке содержатся в количестве менее 1 %, они являются ценными источниками электролитов и жизненно важных микроэлементов, необходимых для здорового роста и развития (Reilly C, 2004). Исследования показали, что минеральный состав молока значительно различается у разных пород крупного рогатого скота, а также зависит от физических и экологических факторов (Raynal-Ljutovac K et al., 2008a). Вариабельность содержания электролитов и основных микроэлементов в молоке крупного рогатого скота обусловлена несколькими факторами, в том числе типом скота, его здоровьем, рационом кормления, стадией лактации, экологическими и географическими условиями (Raynal-Ljutovac K et al., 2008a; Navarro-Alarcon M et al., 2011; Chen L et al., 2020).

Как показано на рисунке 1, в нашем исследовании мы наблюдали, что содержание Zn в молоке было почти на одном уровне в начале периода доения (30-й день) в обеих группах (Е/С: +0,74 %), но

на следующих этапах лактации у коров, получавших хелатные минералы, концентрация Zn увеличилась не значительно ($P \geq 0,05$) на 65-й день лактации (E/C: +31,69 %) и значительно ($P \leq 0,01$) – на 100-й день лактации (E/C: +84,91 %). По сравнению с началом периода контрольного доения уровень Zn повышался в группе, получавшей хелатные минералы (E_{65}/E_{30} : +28,78 %, E_{100}/E_{65} : +51,01 %), причём высокосignificant ($P \leq 0,01$) увеличение наблюдалось на 100-й день по сравнению с 30-м днём (E_{100}/E_{30} : +94,46 %).



Сравнение E/C: *– $P \leq 0,05$, **– $P \leq 0,01$ Сравнение 100-го с 30-м и 65-м днями лактации: ###– $P \leq 0,01$

Рисунок 1. Содержание Zn, Se и Fe в молоке дойных коров, получавших глицин-хелатную минеральную добавку

Цинк – важнейший микроэлемент, который поддерживает иммунную систему и участвует в многочисленных ферментативных процессах. По данным Raunat-Ljutovac K с коллегами (2008b), концентрация цинка в молоке коров может различаться между породами, при этом некоторые породы имеют более высокий уровень, обусловленный генетическими факторами и рационом кормления. В некоторых исследованиях (Proskira N et al., 2016) концентрация Zn в молоке джерсейских коров была на уровне 3,7 мг/дм³, а по данным других (Pilarczyk R et al., 2013) у симментальских – 3,02 мг/мл и у голштино-фризских коров – 3,27 мг/мл, что превышало уровень, зафиксированный в нашем исследовании у коров контрольной группы, но уступало коровам, получавшим хелатные минералы, на 100-й день лактации.

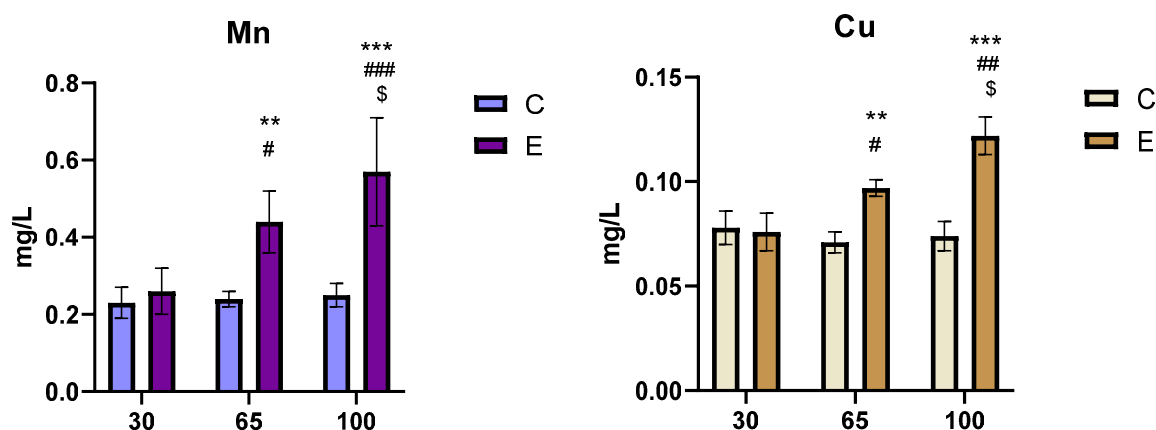
В начале периода контрольного доения (30 день) содержание Se в молоке в обеих группах было на одном уровне (E/C: +0,14 %), на следующих этапах лактации увеличивалось у коров, получавших минеральную добавку, достоверно ($P \leq 0,05$) на 65 день лактации (E/C: +34,19 %) и высокосignificant ($P \leq 0,01$) – на 100 день лактации (E/C: +66,80 %). В опытной группе коров по сравне-

нию с началом периода доения уровень Se увеличился (E_{65}/E_{30} : +29,72 %, E_{100}/E_{65} : +27,45 %), но высокосущественное ($P \leq 0,01$) изменение содержания было зафиксировано на 100-й день по сравнению с 30-м днём (E_{100}/E_{30} : +65,33 %).

Селен – важнейший микроэлемент, играющий ключевую роль в антиоксидантной защите и работе щитовидной железы. Chen L с коллегами (2020) утверждают, что уровень селена в коровьем молоке определяется его содержанием в рационе кормления коров и региона разведения. По данным Министерства сельского хозяйства США (USDA, 2021), содержание селена в коровьем молоке составляет около 0,01 мг на 100 граммов. Однако исследование Naug W с соавторами (2020) показывает, что уровень селена может существенно изменяться: в некоторых образцах молока содержится до 0,03 мг на 100 граммов, что в значительной степени зависит от содержания селена в рационе коров.

При анализе содержания Fe в молоке в начале исследования (30-й день) не было установлено значительной межгрупповой разницы (E/C : +6,82 %). Эти различия увеличивались в течение периода лактации у коров, получавших минеральную добавку, но не достигали статистической значимости ($P \geq 0,05$) на 65-й день лактации (E/C : +16,13 %) и на 100-й день лактации (E/C : +40,91 %). По сравнению с началом учётного периода уровень Fe повышался в опытной группе, получавшей хелатные минералы (E_{65}/E_{30} : +14,53 %, E_{100}/E_{30} : +27,31 %, E_{100}/E_{65} : +11,15 %), но все эти различия не были достоверными ($P \geq 0,05$).

Железо играет важнейшую роль в транспорте кислорода в крови и в общих метаболических процессах. Однако содержание железа в коровьем молоке относительно невелико по сравнению с другими продуктами. Reilly C (2004) отметил, что, хотя коровье молоко не является важным источником железа, оно всё же может внести свой вклад в общее поступление элемента с пищей, особенно в сочетании с другими богатыми железом продуктами. Коровье молоко обычно содержит немного железа: по данным Министерства сельского хозяйства США, около 0,03 мг на 100 граммов (USDA, 2021). Исследование Hurrell RF с коллегами (2019) подтверждает этот вывод и отмечает, что невысокое содержание железа в молоке может вызывать беспокойство у населения, рацион которого в значительной степени основывается на молочной продукции. В исследованиях Gorska A и Oprzadek K (2011) концентрация Fe в молоке коров в период до 100 дня лактации составляла 144 мкг/кг, что значительно ниже наших результатов.



Сравнение E/C: * – $P \leq 0,05$, *** – $P \leq 0,001$ Сравнение 100-го с 30-м днём лактации: # – $P \leq 0,05$, ## – $P \leq 0,01$, ### – $P \leq 0,001$ Сравнение 100-го с 65-м днём: \$ – $P \leq 0,05$

Рисунок 2. Содержание Mn и Cu в молоке дойных коров, получавших глицин-хелатную минеральную добавку

При анализе уровня Mn в молоке в начале эксперимента (30-й день) не выявлено значительных различий между группами (E/C : +13,04 %). В течение лактационного периода у коров опытной группы зафиксировано высокосущественное ($P \leq 0,01$) увеличение содержания Mn на 65-

й день лактации (E/C: +83,33 %) и на 100-й день лактации (E/C: +128,00 %). По сравнению с началом периода контрольного доения уровень Mn повышался (E_{65}/E_{30} : +69,23 %, E_{100}/E_{65} : +29,54 %) в группе, получавшей хелатные минералы, а к 100-му дню по сравнению с 30-м установлено высокодостоверное ($P \leq 0,01$) увеличение (E_{100}/E_{30} : +119,23 %).

Марганец – ещё один важный элемент, содержащийся в коровьем молоке в меньших концентрациях по сравнению с другими минералами. Он играет роль в формировании костей, обмене веществ и антиоксидантной защите. Исследование Navarro-Alarcon M с коллегами (2011) показывает, что содержание марганца в молоке зависит от рациона коров, в частности от минерального состава потребляемых кормов. Содержание марганца в коровьем молоке относительно невелико: по данным Министерства сельского хозяйства США оно составляет около 0,003 мг на 100 граммов (USDA, 2021). В исследовании Kahn SA с соавторами (2019) также отмечается, что коровье молоко не является важным источником марганца, поскольку его уровень гораздо ниже по сравнению с другими продуктами питания. Pilarczyk R с коллегами (2013) приводят концентрацию 0,02 мкг/мл в молоке симментальских и голштино-фризских коров, что почти аналогично нашим данным по контрольной группе коров, но ниже по сравнению с коровами, получавших минеральные добавки, на 65-й и 100-й день лактации.

По меди выявлена схожая с Mn динамика по периодам лактации, в начале эксперимента (30-й день) не было существенных различий между группами (E/C: -2,56 %). На следующих этапах было отмечено высокосignificantное ($p < 0,01$) увеличение содержания Cu при использовании хелатной минеральной добавки на 65-й день (E/C: +36,61 %) и на 100-й день лактации (E/C: +64,86 %). По сравнению с началом периода доения уровень Cu повышался в опытной группе (E_{65}/E_{30} : +27,63 %, E_{100}/E_{65} : +25,77 %), а к концу исследования по сравнению с 30-м днем установлено высокодостоверное ($P \leq 0,01$) увеличение (E_{100}/E_{30} : +60,52 %).

Медь жизненно необходима для образования красных кровяных телец и поддержания здоровья соединительных тканей. Исследования свидетельствуют о вариативности содержания меди в коровьем молоке, которое можно повысить использованием кормовых добавок в рационе коров (Gaucheron F, 2011). Это подчеркивает важность сбалансированного рациона для лактирующих коров для обеспечения оптимального элементного состава молока. По данным Министерства сельского хозяйства США в коровьем молоке содержится около 0,02 мг меди на 100 граммов (USDA, 2021). Однако исследование Kelleher SL с коллегами (2020) показало, что содержание меди в молоке может изменяться, причём в некоторых образцах оно достигало 0,05 мг на 100 г. Это свидетельствует о влиянии факторов окружающей среды и корма на содержание меди в молоке. Proskura N с соавторами (2016) выявили концентрацию Zn 18 мкг/дм³ в молоке джерсейских коров, а в исследованиях Pilarczyk R с коллегами (2013) в молоке симментальских его уровень составлял 0,03 мкг/мл, а в молоке голштино-фризских коров – 0,04 мкг/мл, что ниже результатов нашего опыта в группе контрольных коров, а также значительно ниже данных по коровам, получавших минеральные добавки на 65-й и 100-й день лактации.

Заключение.

Таким образом, коровье молоко содержит необходимые минералы, но уровень цинка, меди, селена, железа и марганца может изменяться в зависимости от нескольких факторов, в том числе порода коров, их рацион и условия окружающей среды. Введение добавок с хелатными минералами сопровождалось значительным увеличением концентрации в молоке исследуемых микроэлементов, особенно Mn, Zn и Se.

Список источников/References

1. Chen Lu, Li Xia, Li Zengmei, Deng L. Analysis of 17 elements in cow, goat, buffalo, yak, and camel milk by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). RSC Advances. 2020;10(12):6736-6742.

2. EUR-Lex. Access to European Union Law [Internet]. Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0063> (accessed 20.08.2024).
3. Faulkner MJ, Weiss WP. Effect of source of trace minerals in either forage-or by-product-based diets fed to dairy cows: 1. Production and macronutrient digestibility. *J Dairy Sci.* 2017; 100(7):5358-67. doi: 10.3168/jds.2016-12095
4. Gaucheron F. Milk and dairy products: a unique micronutrient combination. *Journal of the American College of Nutrition.* 2011;30(5 Suppl 1):400S-409S. doi: 10.1080/07315724.2011.10719983
5. Gaucheron F. The minerals of milk. *Reprod Nutr Dev.* 2005;45(4):473-483. doi: 10.1051/rnd:2005030
6. Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Moruzi RF, Degi DM, Orăsan SA, Muselin F. Effects of glycine chelated Zn, Cu, Mn and Fe supplementation on some milk parameters and serum trace elements levels in dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;105(3):35-39. doi:10.33284/2658-3135-105-3-34
7. Gorska A, Oprzadek K. Concentration of trace elements in raw milk depending on the lactation period and age of cows. *Acta Veterinaria Brno.* 2011;80(2):203-206. doi: 10.2754/avb201180020203
8. Haug W, Lentz K, Schmid H. Variability of selenium content in cow milk and its relationship to dietary intake. *Journal of Dairy Science.* 2020;103(5):4500-4508.
9. Hercberg S, Galan P. Nutritional deficiencies in developing countries: the need for fortified foods. *The Food & Nutrition Bulletin.* 2010;31(2):S317-S328.
10. Hidioglou M. Trace element deficiencies and fertility in ruminants: a review. *J Dairy Sci.* 1979;62(8):1195-206. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(79)83400-1
11. Hurrell RF, Egli I, Reddy MB. Iron bioavailability from cow milk and its implications for human nutrition. *Food & Nutrition Bulletin.* 2019;40(1):45-53.
12. Kahn SA, Smith JA, Jones RL. Mineral content of milk from different breeds of cows. *Dairy Research Journal.* 2019;12(2):123-130.
13. Kelleher SL, McCarthy J, O'Brien M. The influence of diet on copper levels in cow milk. *Journal of Animal Science.* 2020;98(3):1234-1240.
14. Kellogg DW, Tomlinson DJ, Socha MT, Johnson AB. Review: Effects of zinc methionine complex on milk production and somatic cell count of dairy cows: Twelve-trial summary. *Prof. Anim. Sci.* 2004;20(4):295-301. doi: 10.15232/S1080-7446(15)31318-8
15. Mackenzie AM, Moeini MM, Telfer SB. The effect of a copper, cobalt and selenium bolus on fertility and trace element status of dairy cattle. *BSAP Occasional Publication.* 2001;26(2):423-427. doi: 10.1017/S0263967X00034030
16. Maret W. Zinc in cellular regulation: The role of metallothionein and other zinc ligands. *Journal of Biological Inorganic Chemistry.* 2020;25(1):1-18.
17. Navarro-Alarcón M, Cabrera-Vique C, Ruiz-López MD, Olalla M, Artacho R, Giménez R, Quintana V, Bergillos T. Levels of Se, Zn, Mg and Ca in commercial goat and cow milk fermented products: Relationship with their chemical composition and probiotic starter culture. *Food Chemistry.* 2011;129(3):1126-1131. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.05.090
18. Nocek JE, Johnson AB, Socha MT. Digital characteristics in commercial dairy herds fed metal-specific amino acid complexes. *J Dairy Sci.* 2000;83(7):1553-1572. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(00)75028-4
19. Overton TR and Yasui T. Practical applications of trace minerals for dairy cattle. *Journal of Animal Science.* 2014;92(2):416-426. doi: 10.2527/jas.2013-7145
20. Pilarczyk R, Wójcik J, Czerniak P, Sablik P, Pilarczyk B, Tomza-Marciniak A. Concentrations of toxic heavy metals and trace elements in raw milk of Simmental and Holstein-Friesian cows from organic farm. *Environ Monit Assess.* 2013;185(10):8383-8392. doi: 10.1007/s10661-013-3180-9
21. Proskura N, Podlasińska J, Proskura WS, Frost-Rutkowska A, Dybus A, Szydłowski K. Concentrations of macroelements and trace elements in milk of Jersey cows. *Indian Journal of Animal Research.* 2017;51(1):89-92. doi: 10.18805/IJAR.10977

22. Rabiee AR, Lean IJ, Stevenson MA, Socha MT. Effects of feeding organic trace minerals on milk production and reproductive performance in lactating dairy cows: a meta-analysis. *J Dairy Sci.* 2010; 93(9):4239-4251. doi: 10.3168/jds.2010-3058
23. Raynal-Ljutovac K, Lagriffoul G, Paccard P, Guillet I, Chilliard Y. Composition of goat and sheep milk products: an update. *Small Rumin Res.* 2008b;79(1):57-72. doi: 10.1016/J.SMALLRUMRES.2008.07.009
24. Raynal-Ljutovac K, Lagriffoul G, Paccard P, Guillet I, Chilliard Y. Composition of goat and sheep milk products: An update. *Small Ruminant Research.* 2008a;79(1):57-72. doi: 10.1016/j.smallrumres.2008.07.009
25. Reilly C. The nutritional trace metals. Blackwell Publishing Ltd; 2004: 238 p.
26. Siciliano-Jones JL, Socha MT, Tomlinson DJ, De-Fraen JM. Effect of trace mineral source on lactation performance, claw integrity, and fertility of dairy cattle. *J Dairy Sci.* 2008;91(5):1985-1995. doi: 10.3168/jds.2007-0779
27. Silva BB, Teixeira AR, Ferreira SLC. The role of trace elements in human health: A comprehensive review. *Biological Trace Element Research.* 2020;194(2):451-471.
28. Spears JW, Weiss WP. Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *Vet J.* 2008;176(1):70-76. doi: 10.1016/j.tvjl.2007.12.015
29. USDA. FoodData Central. U.S. Department of Agriculture 2021 [Internet]. Available from: <https://fdc.nal.usda.gov/>
30. Wu G. Principles of animal nutrition, 1th ed. FL, Boca Rato: Taylor 506 & Francis Group, LLC; 2018:800 p.

Информация об авторах:

Джордж Влад Гойлян, аспирант, кафедра токсикологии, факультет ветеринарной медицины, Университет естественных наук «Король Румынии Мишель I» из Тимишоары, 300645, Тимишоара, Румыния, Каля Арадулуй 119.

Ромео Теодор Кристина, доктор ветеринарных наук, профессор, заведующая кафедрой токсикологии факультета ветеринарной медицины Университета естественных наук «Король Румынии Мишель I» из Тимишоары, 300645, Тимишоара, Румыния, Каля Арадулуй 119.

Александру Октавиан Дома, доктор ветеринарных наук, доцент, Факультет ветеринарной медицины, Университет естественных наук «Король Румынии Мишель I» из Тимишоары, 300645, Тимишоара, Румыния, Каля Арадулуй 119.

Евгения Думитреску, доктор ветеринарных наук, доцент кафедры фармакологии и фармации, факультет ветеринарной медицины, Университет естественных наук им. короля Румынии Михаила I из Тимишоары, 300645, Тимишоара, Румыния, Каля Арадулуй 119.

Михай Фолеску, аспирант кафедры фармакологии и фармации факультета ветеринарной медицины, Университет естественных наук «Король Румынии Мишель I» из Тимишоары, 300645, Тимишоара, Румыния, Каля Арадулуй 119.

Флорин Муселин, доктор ветеринарных наук, магистр наук, доцент кафедры токсикологии факультета ветеринарной медицины Университета естественных наук «Король Румынии Мишель I» из Тимишоары, 300645, Тимишоара, Румыния, Каля Арадулуй 119; Румынская академия - филиал Тимишоара, 300223, Тимишоара, Румыния, Вв. Михай Витеазу 24.

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С.192-205.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 192-205.

Научная статья

УДК 636.088.31

doi:10.33284/2658-3135-107-4-192

Кавитированные концентраты как стимулирующий фактор продуктивности дойных коров

Надежда Михайловна Ширнина¹, Валерий Валерьевич Кононец²

^{1,2}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹shirнина.2021@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3908-3865>

²vale056@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8482-4466>

Аннотация. В статье приведены результаты эксперимента о положительном влиянии кавитированных концентратов (зерносмесь и пшеничные отруби) в составе рациона молочных коров красной степной породы на питательную ценность, поедаемость и биодоступность питательных веществ организмом. Биохимический анализ кавитированных зерносмеси и пшеничных отрубей, в пересчёте на сухое вещество исходного сырья свидетельствует, что при равноценных энергетических значениях имелись некоторые изменения биохимических показателей. Так, содержание сырого протеина и сырого жира повысилось на 8,5 и 2,5 %; 6,4 и 1,09 % в пользу кавитированных кормов. Содержание же сырой клетчатки и крахмала в зерносмеси снизилось на 3,5 и 3,7 %, пшеничных отрубях – на 19,4 и 3,9 %. Увеличение суммы сахаров в зерносмеси составило 15,2 г, в пшеничных отрубях – на 6,2 г. Поедаемость кормов рациона, в среднем за опыт по сравнению с контролем была выше у коров I и II опытных групп: по грубым – на 2,3 и 3,7 %, сочным – 3,6 и 6,0 %. За учётный период опыта молочная продуктивность у коров, получавших рацион с традиционной подготовкой концентратов, составляла 2070 кг, что на 22,9 % меньше, чем у сверстниц, получавших с рационом кавитированную зерносмесь, и на 26,2 %, чем у животных, получавших кавитированные пшеничные отруби. При этом, имея небольшие различия по содержанию в молоке жира и белка (3,48-3,55 % и 3,28-3,30 %), увеличение надоев в I и II опытных группах повлияло на выход «молочного жира» и «массовой доли белков». Так, эти показатели составили в контроле 72,45, в I – 90,35 и II – 90,88 кг и 68,1; 84,0; 85,7 кг, что выше в сравнении с контролем на 24,7 и 23,3 %; 25,4 и 25,8 %. Выявлена положительная связь между содержанием обменной энергии в рационе и суточным удоём, при увеличении данного показателя в рационе на 2,51 и 2,76 % суточный удой повысился на 22,9 и 26,2 % соответственно. Высокая положительная корреляционная зависимость выявлена между количеством белка в молоке и содержанием сахаров в рационе ($r=0,99$), что говорит о большой степени взаимозависимости. Содержание обменной энергии в рационе коррелировало с количеством жира в суточном удоёе ($r=0,99$).

Ключевые слова: лактирующие коровы, красная степная порода, кормление, структура рационов, дерть зерносмеси, кавитированная зерносмесь, кавитированные пшеничные отруби, молочная продуктивность, качество молока

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0002).

Для цитирования: Ширнина Н.М., Кононец В.В. Кавитированные концентраты, как стимулирующий фактор продуктивности дойных коров // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 192-205. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-192>

Original article

Cavitated concentrates as a stimulating factor for the productivity of dairy cows

Nadezhda M Shirnina¹, Valeriy V Kononets²

¹Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹shirnina.2021@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3908-3865>

²vale056@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8482-4466>

Abstract. The article presents the results of the experiment on the positive effect of cavitated concentrates (grain mixture and wheat bran) in the diet of dairy cows of the Red Steppe breed on nutritional value, palatability and bioavailability of nutrients. Biochemical analysis of cavitated grain mixture and wheat bran, in terms of dry matter of the original raw materials indicates that with equivalent energy values, there were some changes in biochemical indicators. Thus, the content of crude protein and crude fat increased by 8.5 and 2.5%; 6.4 and 1.09% in favor of cavitated feeds. The content of crude fiber and starch in the grain mixture decreased by 3.5 and 3.7%, in wheat bran - by 19.4 and 3.9%. The increase for sugars in the grain mixture was 15.2 g, in wheat bran - by 6.2 g. The feed intake of the diet, on average during the experiment compared to the control, was higher in cows of the I and II experimental groups: for roughage - by 2.3 and 3.7%, for succulent - 3.6 and 6.0%. During the record period of the experiment, the milk productivity of cows receiving a diet with traditional concentrate preparation was 2070 kg, which is 22.9% less than that of their peers receiving a cavitated grain mixture with the diet, and 26.2% less than that of animals receiving cavitated wheat bran. At the same time, having small differences in the content of fat and protein in milk (3.48-3.55% and 3.28-3.30%), the increase in milk yield in experimental groups I and II affected the yield of "milk fat" and "protein mass fraction". Thus, these indicators were 72.45 in the control, 90.35 in I and 90.88 kg and 68.1; 84.0; 85.7 kg in II, which is higher in comparison with the control by 24.7 and 23.3%; 25.4 and 25.8%. A positive relationship was revealed between the content of metabolizable energy in the diet and daily milk yield, with an increase in this indicator in the diet by 2.51 and 2.76%, the daily milk yield increased by 22.9 and 26.2%, respectively. A high positive correlation was found between the amount of protein in milk and the sugar content in the diet ($r=0.99$), indicating a high degree of interdependence. The content of exchange energy in the diet correlated with the amount of fat in daily milk yield ($r=0.99$).

Keywords: lactating cows, Red Steppe breed, feeding, structure of diets, grain mixture grinding, cavitated grain mixture, cavitated wheat bran, milk productivity, milk quality

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0002).

For citation: Shirnina NM, Kononets VV. Cavitated concentrates as a stimulating factor for the productivity of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):192-205. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-192>

Введение.

Организация полноценного кормления крупного рогатого скота, в том числе молочного, основывается в первую очередь на потребности сухого вещества и количества его в рационе. При этом на его потребление влияет подготовка корма к скармливанию, способствующая хорошим физическим и вкусовым свойствам, переваримости нутриентов, продуктивности и здоровью животных и т. д.

Низкое качество объёмных кормов с недостаточным количеством в сухом веществе лимитирующих питательных веществ вынуждает животноводческие хозяйства использовать дорогостоящие концентрированные корма. Которые по количеству питательных веществ и энергии превышают другие корма больше чем в 2 раза (Фенченко Н.Г. и др., 2017; Фролов А.И. и др., 2019; Золотарёв А. и др., 2020).

Неправильное скормливание концентрированного корма коровам может порождать большое количество других проблем – нарушение обмена веществ, воспроизводительных функций и т. д. (Подопед Л.И., 2000; Jiménez-Pulido IJ et al., 2024).

Учитывая важность использования в рационах коров концентрированных кормов, необходимо изыскание новых приёмов повышения их питательной ценности и доступности нутриентов через технологию приготовления, что является важной задачей сельхозпроизводителей (Гусаров И.В. и Обряева О.Д., 2022; Серкова А.Н. и Смирнова Л.В., 2022).

Наряду с нормированием общего количества растворимых сахаров, в последние годы стали уделять внимание соотношению в рационе крахмала и сахара. В составе концентрированных кормов содержится до 500 г крахмала и до 20 г сахаридов. По литературным данным, усвояемость крахмала в природной форме, в зависимости от вида, не более 65 %. В этой связи одной из задач биотехнологий становится перевод зернового крахмала в более биодоступную форму для лучшего его усвоения животными (Дускаев Г.К. и др., 2015; Krieg J et al., 2017).

К аналогичному выводу пришли А.П. Калашников с коллегами (2003), которые указывают, что в организме жвачных животных крахмал гораздо медленнее гидролизует микроорганизмами, чем сахара, при постепенном освобождении глюкозы в качестве источника энергии.

Данные Книга М.И. (1961) свидетельствуют о различном воздействии крахмала и сахаридов на сложный процесс лактации, так, при замене в рационе сахарной свёклы картофелем удои снижаются на 2-3 %, живая масса при этом увеличивается больше, чем при свёкле. Увеличение крахмала в рационе молочных коров от 6-8 кг на голову негативно влияет на содержание жира в молоке. Сахар, приобретённый в результате гидролиза крахмала в кишечнике, всасывается из него в неизменном виде и служит для синтеза белка молока в молочной железе, являясь источником энергии для организма.

Проведённые опыты на молочных коровах Харитоновым Е. с коллегами (2019) показали, что крахмала в рационе должно быть больше, чем сахара, с оптимальным количеством 1,5 г крахмала на 1,0 г сахара. Сахар необходим при синтезе лактозы молока, обусловленное его количество употребляется на создание в молочной железе триглицеридов и глицерина молочного жира. При этом сахар является источником углерода, который используется для образования цепи заменимых белков молока синтезируемых в молочной железе.

Также ряд учёных, изучающих проблему углеводного питания лактирующих коров, пришли к однозначному выводу, что в их организме больше всего расходуется молочной железой сахара, поступившего с кормами (Курилов Н.В., 1971; Миронова И.В. и др., 2022; Jiménez-Pulido IJ et al., 2022; Tomé-Sánchez I et al., 2021).

Известно, что во многих хозяйствах страны в рационах крупного рогатого скота дефицит легкопереваримых углеводов может составлять до 40-50 % от нормы. Такое положение негативно сказывается на физиологическом состоянии организма, что приводит к понижению продуктивности молока и качественных его характеристик.

В последние годы для повышения эффективности рационов крупного рогатого скота перспективными стали влаготепловые обработки концентратов – гидробаротермическая, ферментативная, кавитационное воздействие, повышающие содержание сахаров за счёт расщепления трудногидролизуемых углеводов и крахмала (Волюнкина М., 2011; Панышев А.И. и др., 2014).

Заслуживают внимание и такие технологии, как осоложивание, экстрадирование, микронизация, дрожжевание (Шагалиев Ф. и др., 2012).

Биологическая обработка концентратов путём дрожжевания особенно эффективна для видов, имеющих сравнительную полноценность белка (отруби, мучки, зерноотходы), где потери от обработки не столь существенны (Подопед Л.И., 2000).

Среди перечисленных отходов для молочного скота больше всего используются отруби, жмыхи и шроты. Если сравнивать отруби с зерновым фуражом, то в них больше содержится клетчатки, но они богаты витаминами и минеральными веществами, особенно фосфором. На общую

питательность отрубей влияет содержание мучнистых веществ, так, при производстве высших сортов муки может остаться примерно 28 % от массы зерна (Аксёнов В.В., 2008).

В связи с тем, что отруби на порядок ниже по стоимости зерна, используемого на фураж, употребление их в рационах коров заведомо снижает себестоимость продукции. Однако наряду с этим, с целью повышения их питательности, а также устранения отрицательного влияния на пищеварение, необходима их предварительная подготовка (Санова З.С., 2020).

Кавитационная обработка концентрированных кормов совместно с ферментным препаратом позволяет получить корм с более высокими питательными характеристиками. Что говорит об эффективном применении в рационах жвачных животных данного корма (Байков А.С., 2020; Ширнина Н.М. и др., 2022).

Обработка концентрированных кормов на фураж с помощью биотехнологии кавитационного воздействия способствует сокращению дефицита энергии сахаров в рационе молочных коров (Гридюшко И.Ф., Истранин Ю.В., 2018). Сущность такой обработки заключается в том, что при воздействии энергии ударных волн зерно разрушается с выделением крахмала и клейковины. При этом происходит гидролиз крахмала с преобразованием в сахара (Аксёнов В.В., 2008).

Обзор научных источников свидетельствует о важности применения передовых технологий, направленных на повышение питательной ценности концентрированных кормов и использования их при кормлении дойных коров.

Цель исследования.

Оценка продуктивного эффекта использования кавитированных концентратов в рационе дойных коров красной степной породы.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Коровы красной степной породы 3-4 лактации.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции, принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009) Руководство по работе с лабораторными животными (http://fnbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все процедуры над животными были выполнены в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФНЦ БСТ РАН.

Схема эксперимента. Эксперимент проводился в условиях сельскохозяйственного предприятия Покровского сельскохозяйственного колледжа – филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский ГАУ». Проведение опыта заключалось в обосновании замены дерти зерносмеси в составе основного рациона (ОР) дойных коров (n=30) в соответствии с питательностью на зерносмесь и пшеничные отруби, подготовленные кавитационно. Основным концентрированным кормом в хозяйстве являлась смесь дерти пшеницы и ячменя. Проведение научно-хозяйственного опыта представлено в таблице 1.

Основной рацион коров контрольной группы состоял из сена злакового 2,66 кг, бобового – 3,0, силоса кукурузного – 19,0, дерти зерносмеси – 4,26 кг. В I и II опытных группах согласно схемы опыта рационы были идентичными с контрольной, но лишь с той разницей, что в этих группах дерть зерносмеси была заменена на кавитированные зерносмесь и пшеничные отруби, согласно питательности. Концентрированные корма не зависимо от способа подготовки раздавались поверх грубых или сочных кормов, перед утренней и вечерней дойками.

Таблица 1. Схема эксперимента
Table 1. Experimental design

Группа / Group	Количество животных / Number of animals	Периоды, сутки / Periods, days			Условия кормления / Feeding conditions
		подготовительный / preparatory	основной / basic	в т. ч. учётный / including record period	
Контрольная / Control	10	30	182	10	ОР + дерть зерносмеси / BD + grain mixture grinding
I опытная / I Experimental	10	30	182	10	ОР + кавитированная зерносмесь / BD + cavitated grain mixture
II опытная / II Experimental	10	30	182	10	ОР + кавитированные отруби / BD + cavitated bran

Альтернативный традиционному дроблению способ подготовки концентратов кавитационным воздействием осуществлялся на установке УЖК-1000 (ООО «Энергия Плюс», г. Бердск, Россия). Основным элементом данной установки – измельчитель-диспергатор РИД-2. В нём компоненты измельчаются, смешиваются и нагреваются, происходит также их стерилизация. На начальном этапе при температуре не выше +28 °С с целью разжижения и ферментации сырья вводился препарат «Биофарм» (ООО «Энергия Плюс», г. Бердск, Россия), способствующий расщеплению сложных органических соединений до хорошо усвояемых сахаридов.

Рационы силосно-концентратного типа для дойных коров были составлены на основе детализированных норм кормления, с учётом живой массы и продуктивности. В начале основного периода опыта рационы были рассчитаны на получение суточного удоя 14 кг. Их общая питательность составляла 13,7 ЭКЕ с содержанием сухого вещества 14,2 кг, при концентрации обменной энергии в 1 кг сухого вещества 9,6 МДж.

Дефицит сахара, предусмотренный нормами, за счёт кавитационной обработки концентрированных кормов в рационах всех подопытных групп животных не был оптимизирован. Результативность технологии кавитационной-подготовки концентратов в рационах дойных коров реализовывалась на основе данных, определяющих величину молочной продуктивности (удой) и главных качественных показателей молока (содержание жира и белка). Содержание жира и белка определяли один раз в месяц в среднесуточной пробе молока от каждой коровы.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>).

Статистическая обработка. С помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) и обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США) выполняли статистический анализ. Который включал расчёт среднего значения (M) и стандартные ошибки среднего ($\pm$ SEM). По t-критерию Стьюдента определяли достоверность различий сравниваемых показателей. Величина значимой разницы установлена на $P \leq 0,05$.

Результаты исследования.

Питательность и химический состав концентратов до кавитации и после, а также с пересчётом на сухое вещество представлены в таблице 2.

Таблица 2. Биохимический состав концентратов
 Table 2. Biochemical composition of concentrates

Показатели/ <i>Indicators</i>	Зерносмесь / <i>Grain mixture</i>			Пшеничные отруби / <i>Wheat bran</i>		
	дроб- лёная / <i>crushed</i>	кавити- рован- ная / <i>cavitated</i>	пересчёт на СВ исход- ного корма/ <i>conversion to dry matter of the origi- nal feed</i>	тради- ционные / <i>traditiona- l</i>	кавити- рованные / <i>cavitated</i>	пересчёт на СВ исход- ного корма / <i>conversion to dry matter of the origi- nal feed</i>
Количество, кг / <i>Quantity, kg</i>	1	1	1	1	1	1
Сухое вещество, кг / <i>Dry matter, kg</i>	0,893	0,420	0,893	0,9	0,297	0,9
Энергетические кор- мовые единицы (ЭКЕ) / <i>Feed energy units (FEU)</i>	1,1	0,522	1,11	0,89	0,31	0,89
Обменная энергия, МДж/ <i>Exchange energy, MJ</i>	11,0	5,22	11,1	8,9	3,1	8,9
Сырой протеин, г / <i>Crude protein, g</i>	130	66,30	141	134,1	47,84	137,5
Сырая клетчатка, г / <i>Crude fiber, g</i>	40,2	12,18	25,9	74,7	21,0	60,22
Крахмал, г / <i>Starch, g</i>	350,0	158,5	337,0	142,0	26,9	136,5
Сумма сахаров, г / <i>Total sugars, g</i>	11,6	12,6	26,8	34,2	14,1	40,4
Сырой жир, г / <i>Crude fat, g</i>	27,7	14,69	31,24	36,9	11,96	34,15
Кальций, г / <i>Calcium, g</i>	1,5	0,75	1,6	2,3	0,84	2,4
Фосфор, г / <i>Phosphorus, g</i>	3,4	1,6	3,4	8,6	3,04	8,7
Сера, г / <i>Sulfur, g</i>	1,3	0,61	1,3	1,9	0,84	1,9
Йод, мг/ <i>Iodine, mg</i>	0,15	0,07	0,15	1,7	0,76	1,7
Кобальт, мг/ <i>Cobalt, mg</i>	0,16	0,08	0,17	0,11	0,05	0,11
Медь, мг/ <i>Copper, mg</i>	4,0	1,97	4,2	10,3	4,62	10,4
Цинк, мг/ <i>Zinc, mg</i>	25,9	12,27	26,1	75,0	33,33	75,0
Марганец, мг/ <i>Manganese, mg</i>	25,0	11,76	25,0	110,0	48,89	110,0
Железо, мг/ <i>Iron, mg</i>	50,0	23,51	50,0	160,0	71,11	160,0
Витамин Е, мг/ <i>Vitamin E, mg</i>	40,0	18,81	40,0	20,0	8,89	20,0

Разбор табличных данных свидетельствует, что испытываемые корма в пересчёте на сухое вещество исходного сырья по энергетическим показателям остались практически на одном уровне. Тогда как содержание сырых, протеина и жира на 11,0 г (8,5 %); 3,4 (2,5 %) и 1,8 (6,4 %); 0,4 г (1,09 %) –

в пользу кавитированных образцов. При этом воздействие кавитирования на содержание клетчатки и крахмала показало, что в смесях из цельного зерна клетчатка снизилась на 35,6 %, пшеничных отрубях – на 19,4 %, понижение крахмала составило соответственно 3,7 и 3,9 %.

Отдельно обозначим воздействие технологии кавитирования в испытуемых концентратах на содержание сахаров, сопоставление с исходным сырьём свидетельствует, что их сумма увеличилась в зерносмеси после обработки на 15,2 г (в два раза), пшеничных отрубях – на 6,2 г (18,1%).

Оптимальной структурой рациона для дойных коров принято считать соотношение основных кормов к концентрированным 60 к 40 %. Поэтому принятую нами структуру можно считать оптимальной, где на долю концентрированных кормов приходится 34,5 % зерносмеси, 3,7 жмыха подсолнечного, грубых – 29,9 и сочных – 31,9 %.

В контрольной и опытных группах коров была сохранена структура рациона, что позволило достоверно оценить влияние испытуемых концентратов на молочную продуктивность животных за основной период эксперимента.

Важным фактором эффективности использования питательных веществ рациона является потребление заданных кормов рациона (табл. 3).

Таблица 3. Рационы лактирующих коров по поедаемости кормов, в среднем за опыт, на одно животное

Table 3. Diets of lactating cows by feed consumption, on average for the experiment

Показатель / <i>Indicators</i>	Группа / <i>Group</i>		
	контроль- ная/ <i>control</i>	опытная I/ <i>experimental I</i>	опытная II/ <i>experimental II</i>
1	2	3	4
Сено злаковое, кг / <i>Cereal hay, kg</i>	2,20	2,26	2,30
Сено бобовое, кг / <i>Legume hay, kg</i>	2,65	2,70	2,73
Силос кукурузный, кг / <i>Corn silage, kg</i>	15,85	16,42	16,80
Зерносмесь (пшеница+ ячмень), кг / <i>Grain mixture (wheat + barley) kg</i>	3,92	-	-
Зерносмесь кавитированная, кг / <i>Cavitated grain mixture, kg</i>	-	11,30	
Отруби пшеничные кавитированные, кг / <i>Cavitated wheatbran, kg</i>	-	-	13,90
Жмых подсолнечный, кг / <i>Sunflower meal, kg</i>	0,45	0,45	0,45
Соль поваренная, г / <i>Tablesalt, g</i>	73,0	73,0	73,0
Фосфат, г / <i>Phosphate, g</i>	55,0	55,0	-
Премикс, г / <i>Premix, g</i>	39,2	39,2	48,8
В рационе содержится: / <i>The diet contains:</i>			
ЭКЕ, МДж / <i>ECU, MJ</i>	11,9	12,2	12,3
Обменной энергии, МДж / <i>Metabolizable energy, MJ</i>	119,36	122,35	122,71
Сухого вещества, кг / <i>Dry matter, kg</i>	12,10	12,35	13,11
Сырого протеина, г / <i>Crude protein, g</i>	1649,4	1772,5	1850,0
Переваримого протеина, г / <i>Digestible protein, g</i>	1187,0	1244,0	1284,0
Сырого жира, г / <i>Crude fat, g</i>	377,0	398,0	446,0
Клетчатки, г / <i>Fiber, g</i>	2536,0	2538,0	2775,8
Крахмала, г / <i>Starch, g</i>	1550,0	1510,0	565,0

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
Сахаров, г / <i>Sugars, g</i>	256,0	323,0	415,0
Кальция, г / <i>Calcium, g</i>	74,7	77,3	83,2
Фосфора, г / <i>Phosphorus, g</i>	52,85	51,51	63,63
Серы, г / <i>Sulfur, g</i>	27,06	27,07	27,98
Меди, мг / <i>Copper, mg</i>	98,93	96,76	113,2
Цинка, мг / <i>Zinc, mg</i>	639,28	628,61	629,03
Марганца, мг / <i>Manganese, mg</i>	635,55	630,54	1007,76
Железа, мг / <i>Iron, mg</i>	1826,24	1876,18	2489,54
Кобальта, мг / <i>Cobalt, mg</i>	7,49	7,49	7,52
Йода, мг / <i>Iodine, mg</i>	8,93	8,59	10,72
Каротина, мг / <i>Carotene, mg</i>	214,14	213,91	214,11
Витамина Е, мг / <i>Vitamin E, mg</i>	1268,33	1338,21	1318,91
Витамина Д, тыс. МЕ / <i>Vitamin D, thousand IU</i>	1,47	1,62	1,63

Сравнение поедаемости кормов рациона между группами подопытных коров за всё время основного периода опыта в средних величинах свидетельствует, что коровы I и II групп потребляли больше контрольной на 2,7 и 4,5 % сена злакового и на 1,9 и 3,0 % – бобового, силоса кукурузного – на 3,6 и 6,0 %. Концентрированные корма животные всех подопытных групп съедали без остатка.

В целом подопытные животные съедали 2,20-2,30 кг сена злакового, 2,65 -2,73 кг бобового, 15,9-16,8 кг силоса кукурузного. В контроле –3,92 кг дерти зерносмеси, в том числе 0,45 жмыха подсолнечного и 0,039 кг премикса, а в I и II опытных группах – кавитированной зерносмеси 11,3 кг, в том числе 0,45 жмыха подсолнечного и 0,039 кг – премикса, отрубей – 13,9 кг, в том числе 0,45 жмыха подсолнечного и премикса – 0,049 кг.

За сутки потребление питательных веществ в контроле составило: сухого вещества – 12,1 кг; обменной энергии – 119,7 МДж; сырого протеина – 1649,4 г, на 1 ЭКЕ приходилось 99,7 переваримого протеина.

В то время как опытные I и II группы потребили 12,3 и 13,1 кг сухого вещества; 122,3 и 122,7 МДж обменной энергии; 1772,5 и 1850 г сырого протеина, на ЭКЕ приходилось 102,0 и 104,4 переваримого протеина соответственно.

Следует отметить, что на уровень молочной продуктивности коров влияют много факторов, главные из которых: порода, количество лактаций, кормление, способ доения и т. д.

Учёт надоев молока за время основного периода эксперимента показал, что группа коров, получавшая в рационе дроблёную зерносмесь, имела надой 2070,0 кг, тогда как у двух других, где в рационе были кавитированные зерносмесь и пшеничные отруби, он увеличился на 22,9 и 26,2 %.

При этом, имея небольшие различия по содержанию в молоке жира и белка (3,48-3,55 % и 3,28-3,30 %), увеличение надоев в I и II опытных группах повлияло на выход «молочного жира» и «массовой доли белков». Так, эти показатели составили в контроле 72,45, в I – 90,35 и II – 90,88 кг и 68,1; 84,0; 85,7 кг, что выше в сравнении с контролем на 24,7 и 23,3 %; 25,4 и 25,8 %.

Кроме того, в связи с употреблением в рационе концентратов, обработанных кавитационно, способствующих не только восполнению дефицита сахаров, но и биодоступности нутриентов, выявлена коррелятивная взаимосвязь с такими показателями, как суточный удой и качество молока основного периода эксперимента (табл. 4).

Из таблицы 4 следует, стимуляцию молокообразования у коров со средним уровнем продуктивности можно производить не только за счёт дополнительного скармливания концентратов, но и путём их определённой подготовки. Так, данные среднесуточного удоя трёх сравниваемых групп животных свидетельствуют, что наиболее эффективной обработкой оказалось кавитационное воздействие.

Таблица 4. Коррелятивная взаимосвязь между питательностью рациона лактирующих коров и качеством молока за период опыта

Table 4. Correlative relationship between nutritional value of lactating cows' diet and milk quality during the experimental period

Показатель/ <i>Indicators</i>	Суточный удой, кг / <i>Daily milk yield, kg</i>	Количество белка в суточном удое, г / <i>Amount of protein in daily milk yield, g</i>	Количество жира в суточном удое, г / <i>Amount of fat in daily milk yield, g</i>
ОЭ, МДж / <i>EE, MJ</i>	0,99	0,88	0,99
Сырой протеин, г / <i>Crude protein, g</i>	0,96	0,98	0,91
Сырой жир, г / <i>Crude fat, g</i>	0,80	0,98	0,72
Сахар, г / <i>Sugar, g</i>	0,87	0,99	0,80

Выявлена положительная связь между суточным удоем и содержанием обменной энергии, поступившей с кормами рациона, при повышении энергии на 2,51 и 2,76 % удой молока увеличился на 23,0 и 26,2 %.

Высокая положительная корреляционная взаимосвязь была выявлена между содержанием сахаров в рационе и количеством белка в суточном удое ($r=0,99$), что говорит о высокой степени взаимозависимости. Содержание жира в суточном удое тесно коррелировало с обменной энергией в рационе ($r=0,99$).

Всё вышеизложенное, несомненно, подтверждает актуальность кавитационного способа обработки фуражной зерносмеси и пшеничных отрубей и использования их в рационах при кормлении дойных коров.

Обсуждение полученных результатов.

Подготовка концентрированных кормов к скармливанию животным должна быть направлена на уменьшение потерь энергии корма путём повышения его питательности и поедаемости, переваримости и усвояемости.

В этой связи, с учётом важности и необходимости их использования в рационах лактирующих коров, повышение питательности и биодоступность питательных веществ, путём определённой технологии подготовки является значимой задачей учёных и практиков (Гусаров И.В. и Обряева О.Д., 2022; Серкова А.Н. и Смирнова Л.В., 2022).

При этом важным моментом является снижение себестоимости животноводческой продукции, решению которого может способствовать использование отходов производств – вторичных сырьевых ресурсов.

Научные работы по этому вопросу указывают, что основная причина слабого использования вторичных сырьевых ресурсов – наличие трудногидролизуемых углеводов, замедляющих переваривание и усвоение питательных веществ организмом животного (Гридюшко И.Ф. и Истранин Ю.В., 2018; Санова З.С., 2020).

Итоги проведённых нами сравнительных испытаний двух технологий подготовки концентрированных кормов (дробление и кавитация) при использовании в рационах дойных коров красной степной породы показали положительный результат в пользу кавитационной обработки.

Так, учёт полученного молока за время основного этапа эксперимента показал, что коровы, получавшие рацион с традиционной подготовкой концентратов, имели в среднем надой 2070 кг, в то время как у опытных групп, получавших с рационом кавитационно обработанные зерносмесь и пшеничные отруби, он был выше на 22,9 и 26,2 %.

Выявлена позитивная связь между содержанием обменной энергии в рационе и суточным удоем: при росте данного показателя на 2,51 и 2,76 % суточный удой увеличился на 23,0 и 26,2 % соответственно.

Установлена коррелятивная взаимосвязь с такими позициями, как продуктивность и качественные показатели молока.

Положительная корреляционная зависимость была обнаружена в суточном удое между содержанием сахаров в рационе и количеством белка в суточном удое ($r=0,99$), содержанием жира в суточном удое и обменной энергией в рационе ($r=0,99$).

В итоге можно сказать, что внедрение на сельхозпредприятиях передовых технологий кормоприготовления, содействующих увеличению производства продукции, создаёт значимую предпосылку эффективности ведения молочного животноводства.

Заключение.

Применение в составе рационов дойных коров красной степной породы кавитированных зерносмеси или пшеничных отрубей в условиях Оренбуржья способствуют повышению продуктивности на 22,9 и 26,2 % по сравнению с традиционным дроблением. Имея небольшие различия по содержанию в молоке жира и белка, увеличение надоев в I и II опытных группах повлияло на выход «молочного жира» и «массовой доли белков». Так, эти показатели в сравнении с контролем увеличились на 24,7 и 23,3 %; 25,4 и 25,8 %.

Список источников

1. Аксёнов В.В. Системный подход к интенсификации процессов биоконверсии нативных крахмалов и крахмалосодержащего сырья // Вестник КрасГАУ. 2008. № 5. С. 315-320. [Aksjonov VV. Sistemnyj podhod k intensivifikacii processov bio-konversii nativnyh krahmalov i krahmalosoderzhashhego syr'ja. Soobshhenie I. Provedenie biokonversii nativnyh krahmalov v usloviyah gazovihrevogo peremeshivaniya. Bulletin of KSAU. 2008;5:315-320. (In Russ.)].
2. Байков А.С. О целесообразности использования кавитированного фуражного зерна и отходов мукомольного производства в рационах молодняка крупного рогатого скота // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 1. С. 158-167. [Baykov AS. On the feasibility of using cavitated feed grain and waste of flour milling in the diets of young cattle. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(1):158-167. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-1-158
3. Волынкина М. Эффективность использования ферментных препаратов в рационах молочных коров // Главный зоотехник. 2011. № 9. С. 30-33. [Volynkina M. The efficiency of using of enzymes in rations of dairy cows. Glavnyj zootehnik. 2011;9:30-33. (In Russ.)].
4. Гридюшко И.Ф., Истранин Ю.В. Продукты переработки рапса - важный источник протеина в рационах молодняка крупного рогатого скота // Приоритетные и инновационные технологии в животноводстве – основа модернизации агропромышленного комплекса России: сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., Ставрополь: АГРУС, 2018. С. 159-166. [Gridjushko IF, Istranin JuV. Produkty pererabotki rapsa - vazhnyj istochnik proteina v racionah molodnjaka krupnogo rogatogo skota. (Conference proceedings) Prioritetnye i innovacionnye tehnologii v zhivotnovodstve – osnova modernizacii agropromyshlennogo kompleksa Rossii: mezhdunar. nauch.- prakt. konf. nauchnyh sotrudnikov i prepodavatelej (g. Stavropol', 25 dek. 2018 g.). Stavropol': AGRUS; 2018:159-166. (In Russ.)].
5. Гусаров И.В., Обряева О.Д. Интегративность факторов системы нормированного кормления высокопродуктивных коров // Молочное и мясное скотоводство. 2022. № 5. С. 47-52. [Gusarov IV, Obryaeva OD. Integrativity of factors of the standardized feeding system of highly productive cows. Dairy and Beef Cattle Farming. 2022;5:47-52. (In Russ.)]. doi: 10.33943/MMS.2022.81.71.008
6. Зерно ячменя ярового в экструдированном, дроблёном и плющеном виде. Сравнение эффективности в кормопроизводстве / Н.Г. Фенченко, Ф.М. Шагалиев, С.С. Ардаширов, И.З. Хуснутдинов // Современный фермер. 2017. № 10. С. 42-45. [Fenchenko NG, Shagaliev FM, Ardashirov SS,

Khusnutdinov IZ. Zerno yachmenya yarovogo v ekstrudirovannom, drobленом i plyushchenom vide. Sravnenie effektivnosti v kormoproizvodstve. Sovremennyyi fermer. 2017;10:42-45. (In Russ.).

7. Золотарёв А., Седюк И., Золотарёва С. Продуктивность дойных коров при использовании новейших технологий кормления // Научно-технический бюллетень Института животноводства Национальной академии аграрных наук Украины. 2020. № 124. С. 79-88. [Zolotaryov A, Sedyuk I, Zolotaryova S. Productivity of milking cows using new feeding technology. Nauchno-tehnicheskij bjulleten' Instituta zhivotnovodstva Nacional'noj akademii agrarnyh nauk Ukrainy. 2020;124:79-88. (In Russ.). doi: 10.32900/2312-8402-2020-124-79-88

8. Использование энерго-углеводного корма Танрем для повышения продуктивности коров / И.В. Миронова, А.В. Плешков, А.А. Нигматьянов и др. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (94). С. 299-305. [Mironova IV, Pleshkov AV, Nigmatyanov AA. The use of energy-carbohydrate feed Tanrem to increase the productivity of cows. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;2(94):299-305. (In Russ.). doi: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-299-30

9. Книга М.И. Сахарная свекла в рационе молочных коров // Вестник сельскохозяйственной науки. 1961. № 6. С.42-49. [Kniga MI. Saharnaja svekla v racione molochnyh korov. Vestnik sel'skohozjajstvennoj nauki. 1961;6:42-49. (In Russ.).

10. Курилов Н.В. Потребность жвачных в глюкозе и значение легкопереваримых углеводов в использовании питательных веществ рационов // Вестник сельскохозяйственной науки. 1971. № 9. С. 23-29. [Kurilov NV. Potrebnost' zhvachnyh v gljukoze i znachenie legkope-revarimyh uglevodov v ispol'zovanii pitatel'nyh veshhestv racionov. Vestnik sel'skohozjajstvennoj nauki. 1971;9:23-29. (In Russ.).

11. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ.пособие / А.П. Калашников и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 2003. 456 с. [Kalashnikov AP, et al. Normy i raciony kormlenija sel'skohozjajstvennyh zhivotnyh: sprav.posobie. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Agropromizdat;2003:456 p. (In Russ.).

12. Панышев А.И., Ситников В.А., Николаев С.Ю. Влияние гидробаротермической подготовки концентрированных кормов к скармливанию на переваримость питательных веществ рациона лактирующими коровами // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 556. [Panychev AI, Sitnikov VA, Nikolaev SU. Influence of preparation gidrobarotermicheskoy concentrated feed for feeding on digestibility of nutrients of diets of lactating cows. Modern Problems of Science and Education. 2014;4:556. (In Russ.).

13. Переваримость сухого вещества in situ и доступность крахмала различных видов зерновых / Г.К. Дускаев, А.С. Феромонтова, Г.И. Левахин и др. // Вестник мясного скотоводства. 2015. № 4(92). С. 126-130. [Duskaev GK, Ferapontova AS, Levakhin GI, et al. Digestibility of dry matter in situ and availability of starch from different kinds of crops Summary. Herald of Beef Cattle Breeding. 2015;4(92):126-130. (In Russ.).

14. Подопед Л.И. Основы эффективного кормления дойных коров: справ.- метод. руководство. Одесса, 2000. 205 с. [Podoped LI. Osnovy jeffektivnogo kormlenija dojnyh korov: sprav.- metod. rukovodstvo. Odessa; 2000:205 p. (In Russ.).

15. Санова З.С. Эффективность использования отходов переработки пшеницы в кормлении мясных бычков // Эффективное животноводство. 2020. № 5(162). С. 69-71. [Sanova ZS. Effektivnost' ispol'zovanija othodov pererabotki pshenicy v kormlenii mjasnyh bychkov. Effektivnoe zhivotnovodstvo. 2020;5(162):69-71. (In Russ.). doi: 10.24411/9999-007A-2020-10029

16. Серкова А.Н., Смирнова Л.В. Использование энергетической кормовой добавки в рационах высокопродуктивных коров айрширской породы // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2022. № 9(206). С. 52-67. [Serkova AN, Smirnova LV. The use of an energy feed additive in the rations of highly productive cows of ayrshire breed. Kormlenie sel'skohozjajstvennyh zhivotnyh i kormoproizvodstvo. 2022;9(206):52-67. (In Russ.). doi: 10.33920/sel-05-2209-06

17. Фролов А.И., Бетин А.Н. Влияние органического комплекса на продуктивность и качество молока коров // Вестник АПК Верхневолжья. 2019. № 2(46). С. 28-31. [Frolov AI, Betin AN.

The effect of the organic complex on the productivity and quality of cow's milk. Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2019;2(46):28-31. (*In Russ.*). doi: 10.35694/YARCX.2019.46.2.006

18. Харитонов Е., Березин А., Лысова Е. Легкодоступные углеводы в рационах лактирующих коров // Животноводство России. 2019. № 2. С.35-37. [Kharitonov E, Berezin A, Lysova E. Readily available carbohydrates in diets of lactating cows. Zhivotnovodstvo Rossii. 2019;2:35-37. (*In Russ.*)].

19. Ширнина Н.М., Рахимжанова И.А., Кононец В.В. Использование энергии лактирующими коровами красной степной породы при скормлинии рационов с концентратами различной подготовки // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 1(93). С. 248-254. [Shirmina NM, Rakhimzhanova IA, Kononets VV. The use of energy by lactating cows of the red steppe breed when feeding rations with concentrates of various preparations. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;1(93):248-254. (*In Russ.*)]. doi: 10.37670/2073-0853-2022-93-1-248-254

20. Экструдированные корма для коров / Ф. Шагалиев, В. Назыров, Ф. Хасанова и др. // Животноводство России. 2012. № 10. С. 59. [Shagaliev F, Nazzyrov V, Khasanova F. Et al. Ekstrudirovannye korma dlya korov. Zhivotnovodstvo Rossii. 2012;10:59. (*In Russ.*)].

21. Jiménez-Pulido IJ, Rico D, De Luis D, Martín-Diana AB. Combined strategy using high hydrostatic pressure, temperature and enzymatic hydrolysis for development of fibre-rich ingredients from oat and wheat by-products. Foods. 2024;13(3):378. doi: 10.3390/foods13030378

22. Jiménez-Pulido IJ, Rico D, Martínez-Villaluenga C, Pérez-Jiménez J, Luis D, Martín-Diana AB. Sprouting and hydrolysis as biotechnological tools for development of nutraceutical ingredients from oat grain and hull. Foods. 2022;11(18):2769. doi: 10.3390/foods11182769

23. Krieg J, et al. In situ and in vitro ruminal starch degradation of grains from different rye, triticale and barley genotypes. Animal. 2017;11(10):1745-1753. doi: 10.1017/S1751731117000337

24. Tomé-Sánchez I, Martín-Diana AB, Peñas E, Frias J, Rico D, Jiménez-Pulido I, Martínez-Villaluenga C. Bioprocessed wheat ingredients: characterization, bioaccessibility of phenolic compounds, and bioactivity during in vitro digestion. Front Plant Sci. 2021;12:790898. doi: 10.3389/fpls.2021.790898

References

1. Aksyonov VV. System approach to intensification of bioconversion processes of native starches and starch-containing raw materials. Bulletin of KSAU. 2008;5:315-320.

2. Baykov AS. On the feasibility of using cavitated feed grain and waste of flour milling in the diets of young cattle. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(1):158-167. doi: 10.33284/2658-3135-103-1-158

3. Volynkina M. The efficiency of using of enzymes in rations of dairy cows. Chief Zoo-technician. 2011;9:30-33.

4. Gridyushko IF, Istranin YuV. Rapeseed processing products - an important source of protein in the diets of young cattle (Conference proceedings) Priority and innovative technologies in animal husbandry - the basis for modernization of the agro-industrial complex of Russia: collection of scientific articles based on materials of the Intern. scientific-practical. conf. Stavropol': AGRUS; 2018:159-166.

5. Gusarov IV, Obryaeva OD. Integrativity of factors of the standardized feeding system of highly productive cows. Dairy and Beef Cattle Farming. 2022;5:47-52. doi: 10.33943/MMS.2022.81.71.008

6. Fenchenko NG, Shagaliyev FM, Ardashirov SS, Khusnutdinov IZ. Extruded, crushed and flattened spring barley grain. Comparison of efficiency in forage production. Modern Farmer;2017(10):42-45.

7. Zolotarev A, Sedyuk I, Zolotareva S. Productivity of dairy cows using the latest feeding technologies. Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Animal Husbandry of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. 2020;124:79-88. doi: 10.32900/2312-8402-2020-124-79-88

8. Mironova IV, Pleshkov AV, Nigmatyanov AA. The use of energy-carbohydrate feed Tanrem to increase the productivity of cows. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;2(94):299-305. doi: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-299-30

9. Kniga MI. Sugar beet in the diet of dairy cows. Herald of Agricultural Science. 1961;6:42-49.
10. Kurilov NV. Glucose requirements of ruminants and the importance of easily digestible carbohydrates in the use of nutrient substances in diets. Herald of Agricultural Science. 1971;9:23-29.
11. Kalashnikov AP et al. Norms and diets for feeding farm animals: Ref. book. 3rd ed., add. and reworked. Moscow; 2003: 456 p.
12. Panychev AI, Sitnikov VA, Nikolaev SU. Influence of preparation gidrobarotermicheskoy concentrated feed for feeding on digestibility of nutrients of diets of lactating cows. Modern Problems of Science and Education. 2014;4:556.
13. Duskaev GK, Ferapontova AS, Levakhin GI, et al. Digestibility of dry matter in situ and availability of starch from different kinds of crops Summary. Herald of Beef Cattle Breeding. 2015;4(92):126-130.
14. Podoped LI. Fundamentals of effective feeding of dairy cows: reference and method. manual. Odessa; 2000:205 p.
15. Sanova ZS. Efficiency of using wheat processing waste in feeding beef bulls. Effective Animal Husbandry. 2020;5(162):69-71. doi: 10.24411/9999-007A-2020-10029
16. Serkova AN, Smirnova LV. The use of an energy feed additive in the rations of highly productive cows of ayrshire breed. Feeding of Farm Animals and Forage Production. 2022;9(206):52-67. doi: 10.33920/sel-05-2209-06
17. Frolov AI, Betin AN. The effect of the organic complex on the productivity and quality of cow's milk. Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2019;2(46):28-31. doi: 10.35694/YARCX.2019.46.2.006
18. Kharitonov E, Berezin A, Lysova E. Readily available carbohydrates in diets of lactating cows. Animal Husbandry in Russia. 2019;2:35-37.
19. Shirnina NM, Rakhimzhanova IA, Kononets VV. The use of energy by lactating cows of the red steppe breed when feeding rations with concentrates of various preparations. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;1(93):248-254. doi: 10.37670/2073-0853-2022-93-1-248-254
20. Shagaliev F, Nazzyrov V, Khasanova F et al. Extruded feed for cows. Animal Husbandry in Russia. 2012;10:59.
21. Jiménez-Pulido IJ, Rico D, De Luis D, Martín-Diana AB. Combined strategy using high hydrostatic pressure, temperature and enzymatic hydrolysis for development of fibre-rich ingredients from oat and wheat by-products. Foods. 2024;13(3):378. doi: 10.3390/foods13030378
22. Jiménez-Pulido IJ, Rico D, Martínez-Villaluenga C, Pérez-Jiménez J, Luis D, Martín-Diana AB. Sprouting and hydrolysis as biotechnological tools for development of nutraceutical ingredients from oat grain and hull. Foods. 2022;11(18):2769. doi: 10.3390/foods11182769
23. Krieg J, et al. In situ and in vitro ruminal starch degradation of grains from different rye, triticale and barley genotypes. Animal. 2017;11(10):1745-1753. doi: 10.1017/S1751731117000337
24. Tomé-Sánchez I, Martín-Diana AB, Peñas E, Frias J, Rico D, Jiménez-Pulido I, Martínez-Villaluenga C. Bioprocessed wheat ingredients: characterization, bioaccessibility of phenolic compounds, and bioactivity during in vitro digestion. Front Plant Sci. 2021;12:790898. doi: 10.3389/fpls.2021.790898

Информация об авторах:

Надежда Михайловна Ширнина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)308-179.

Валерий Валерьевич Кононец, соискатель, младший научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)308-179.

Information about the authors:

Nadezhda M Shirnina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Department of Feeding of Farm Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre of Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532)308-179.

Valeriy V Kononets, post-graduate student, Junior Research Associate of the Department of Animal Feeding and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre of Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532) 308-179.

Статья поступила в редакцию 04.09.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 04.09.2024; approved after reviewing 18.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 206-217.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 206-217.

Научная статья
УДК 636.2.084.412
doi:10.33284/2658-3135-107-4-206

**Эффективность использования растительных белковых концентратов
при оптимизации протеинового питания молочных коров**

Александр Витальевич Головин¹

¹Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста,
Московская область, п. Дубровицы, Россия

¹alexgol2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9853-1106>

Аннотация. Результаты исследований, полученные по итогам эксперимента, проведённого на двух группах коров голштинской породы (n=20), свидетельствуют о положительном эффекте от повышения нераспадаемой фракции сырого протеина (НРП) рациона лактирующих коров в период раздоя с 35 до 40,0 %, при замене подсолнечного шрота (1,2 кг) на соевый белковый концентрат (1,0 кг), который проявился в увеличении за первую треть лактации удоя на 259 кг ($P \leq 0,05$) и выхода жира и белка, соответственно на 11,0 кг и 9,4 кг ($P \leq 0,05$), при снижении содержания мочевины на 6,7 % ($P \leq 0,05$). Динамичный раздой коров, получавших белковый концентрат, повлиял на рост удоя за лактацию на 6,5 % ($P \leq 0,01$). Полученный эффект был также подкреплён биохимическими исследованиями крови, которые показали, что применение соевого белкового концентрата для балансирования рациона по НРП оказало положительный эффект на состояние белкового обмена при установленной тенденции повышения концентрации общего белка на 3,2 % и достоверном снижении концентрации мочевины на 13,6 % ($P \leq 0,05$). Оптимизация показателей протеинового питания высокоудойных коров в первую треть лактации при использовании соевого белкового концентрата, позитивно отразилась на себестоимости молока, которая снизилась по отношению к контролю на 1,6 % на фоне получения дополнительного дохода на 1 голову в размере 3885,4 руб.

Ключевые слова: рационы коров, нераспадаемый протеин, подсолнечный шрот, соевый белковый концентрат, удой коров, биохимический статус, экономические показатели

Acknowledgments: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2021-2023 гг. ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (№ 0445-2021-0002).

Для цитирования: Головин А.В. Эффективность использования растительных белковых концентратов при оптимизации протеинового питания молочных коров // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 206-217. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-206>

Original article

Efficiency of plant protein concentrates in optimizing protein nutrition of dairy cows

Alexander V Golovin¹

¹Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Moscow region, Dubrovitsy, Russia

¹alexgol2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9853-1106>

Abstract. The results of the research obtained from the results of the experiment conducted on two groups of Holstein cows (n=20) indicate a positive effect from increasing the indigestible fraction of crude protein (NDP) in the diet of lactating cows during the milking period from 35 to 40.0%, when replacing

sunflower meal (1.2 kg) with soy protein concentrate (1.0 kg), which manifested itself in an increase in milk yield by 259 kg ($P \leq 0.05$) during the first third of lactation and an increase in fat and protein yield by 11.0 kg and 9.4 kg ($P \leq 0.05$), with a decrease in urea content by 6.7% ($P \leq 0.05$). Dynamic milk yield of cows receiving protein concentrate affected the increase in milk yield per lactation by 6.5% ($p \leq 0.01$). The obtained effect was also supported by biochemical blood tests, which showed that the use of soy protein concentrate to balance the diet according to the NDP had a positive effect on the state of protein metabolism, with an established trend of increasing the concentration of total protein by 3.2% and a reliable decrease in the concentration of urea by 13.6% ($P \leq 0.05$). Optimization of protein nutrition indicators of high-yielding cows in the first third of lactation using soy protein concentrate had a positive effect on the cost of milk, which decreased in relation to the control by 1.6%, against the background of receiving additional income per 1 head in the amount of 3885.4 rubles.

Keywords: cow rations, indigestible protein, sunflower meal, soy protein concentrate, milk yield of cows, biochemical status, economic indicators

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2021-2023 FGBNU FRC VIZh named after L.K. Ernst (No. 0445-2021-0002).

For citation: Golovin AV. Efficiency of plant protein concentrates in optimizing protein nutrition of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):206-217. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-206>

Введение.

В состоянии отечественного молочного животноводства в последние десятилетия наметилась положительная динамика в повышении эффективности использования высокоудойных коров разной селекции, связанная с интенсивным развитием отрасли и введением новых технологий, важным элементом которых выступает качественное и сбалансированное кормление, ориентированное на удовлетворение потребностей животных в факторах питания, без организации которого невозможно устойчивое развитие отрасли (Волгин В.И. и др., 2018; Горлов И.Ф. и др., 2024; Кувшинов В.Н. и др., 2024).

При достижении стабильных результатов по реализации генетически заложенного потенциала продуктивности организацию кормления молочного скота следует производить на основе многофакторного подхода, включающего научные принципы детализированного нормирования по всему спектру потребностей в энергии и питательных веществах (Erickson PS et al., 2020).

Одним из самых дорогих, но важных составляющих полноценного кормления коров является протеин корма, затраты на который могут составлять до 55% от стоимости рациона. Однако эффективность использования протеина молочным скотом на продукцию находится в границах 25-30 %, для улучшения которой необходима балансировка показателей протеинового питания с использованием кормов с желаемыми параметрами качества и осуществлением подбора адаптивных белковых концентратов (Глухов Д., 2020; Дулепинских Л.Н. и др., 2023).

Наряду с этим в новотельный период при нормировании уровня сырого протеина в рационах лактирующих высокоудойных коров следует уделять достаточное внимание его качественным характеристикам и, в первую очередь, степени его деградации в преджелудках (Буряков Н.П. и Прохоров Е.О., 2017; Погосян Д.Г., 2014). Причём на удовлетворение потребности молочного скота в обменном протеине величина нераспадаемой в рубце фракции сырого протеина оказывает большое влияние (Hanigan MD et al., 2021). Несоблюдение этих требований снижает коэффициент эффективности использования азота рациона, молочную продуктивность и может приводить к различным расстройствам обмена веществ (Никишенко А.В. и Чехранова С.В., 2019; Сычева Л.В. и Юнусова О.Ю., 2023).

Вместе с тем при оптимизации протеинового питания животных с высоким уровнем продуктивности необходимо также уделять внимание сбалансированности рационов по незаменимым аминокислотам и, прежде всего, лимитирующим уровень молочной продуктивности – метионину и лизину, которые, в свою очередь, должны содержаться в оптимальном соотношении (Головин А.В., 2023; Харитонов Е.Л. и Березин А.С., 2018; Schwab CG and Broderick GA, 2017).

Учитывая вышеизложенное, следует заключить, что использование различных белковых концентратов растительного происхождения находит широкое применение в кормлении высокопродук-

тивного молочного скота с целью оптимизации протеинового питания, а эффект от их ввода в рационы не всегда оправдан должным образом по причине различий как в самих источниках растительного протеина, так и технологиях их получения (Буряков Н.П. и др., 2021; Chojnacka K et al., 2021).

Цель исследования.

Определить эффективность оптимизации протеинового питания высокоудойных коров в первую треть лактации белковым концентратом растительного происхождения по влиянию на показатели продуктивности, обмен веществ и себестоимость производимого молока, в результате проведения производственной апробации.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Молочные коровы голштинской породы (ООО «Лестехстрой», г. Москва).

Обращение с животными подопытных групп в ходе проведения исследования в производственных условиях осуществлялось с соблюдением требований ГОСТ 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур». При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Научно-производственный опыт проводился на коровах с живой массой около 600 кг и удоем 8000 кг молока по предыдущей лактации с февраля по май 2023 г. при привязном содержании. Для эксперимента отобрали 2 группы новотельных коров по 20 голов, подбор животных осуществлялся по принципу групп-аналогов. Эксперимент продолжался 100 первых дней лактации, последующий учёт фона кормления и результатов контрольных доений животных подопытных групп осуществлялся до 305 дня лактации.

В течение производственной апробации животным экспериментальных групп скармливали одинаковый основной рацион, раздаваемый в виде кормовой смеси, включающей как объёмистые, так и концентрированные корма.

Различия в кормлении животных подопытных групп состояли в том, что коровы контрольной группы дополнительно к кормовой смеси индивидуально получали по 1,2 кг подсолнечного шрота для нормирования концентрации сырого протеина (СП) в количестве 17,2 % в сухом веществе (СВ) рациона и величиной нераспадаемой в рубце фракции протеина (НРП) – 35,0 %, это удовлетворяло потребности новотельных коров в СП, но не позволяло сбалансировать рацион по НРП в соответствии с нормами потребностей, т. е. рацион коров контрольной группы был дефицитным по уровню НРП и, соответственно, обменного протеина (ОП), концентрация которого для высокопродуктивных коров с удоем 35,0 кг и более в период раздоя должна составлять около 10,0 % в СВ рациона (Некрасов Р.В. и др., 2018).

Коровам опытной группы для балансирования рационов по СП и НРП на фоне кормовой смеси скармливали 1,0 кг соевого белкового концентрата (экструдированного), который содержал 50 % СП и 80 % НРП, это позволяло повышать долю НРП в СП до 40,0 % и концентрацию ОП в СВ рациона до 10,0 %, на фоне равного с контрольной группой содержания СП – 17,2 %. Продолжительность скармливания соевого концентрата составила 80 дней, с 21 по 100 день лактации.

При проведении опыта осуществляли ежедекадный групповой учёт потребления кормов в течение 2-х смежных суток. Молочную продуктивность учитывали по показаниям индивидуальных доений животных подопытных групп дважды в месяц с определением содержания в молоке жира, белка и мочевины.

Энергетическую ценность рационов лакирующих коров и содержание основных питательных веществ определили в соответствии с химическим составом показателей кормов, который осуществляли по методам зоотехнического анализа: – сухое вещество по ГОСТ Р 52838-2007; сырая зола по ГОСТ 26226-95; – сырой протеин по ГОСТ Р 51417-99; – сырая клетчатка по ГОСТ Р 52839-2007; – сырой жир по ГОСТ 32905-2014; – легкопереваримые углеводы (сахар, крахмал) по ГОСТ 26176-2019; – кальций по ГОСТ 26570-95; – фосфор по ГОСТ 26657-97.

Степень распадемости сырого протеина в белковом концентрате и кормах установили на приборе «Искусственный рубец» Ankom Daisy II фирмы Ankom, массовую долю лизина и метио-

нина определили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии М-02-902-142-07 на приборе Shimadzu LC-20AD в испытательной лаборатории ООО «Премикс».

В конце первой трети лактации, через 3 часа после утреннего кормления произвели забор крови от животных из каждой экспериментальной группы для определения концентрации биохимических показателей сыворотки крови.

По завершении производственной апробации определили экономическую эффективность оптимизации протеинового питания молочных коров в первую треть лактации.

Оборудование и технические средства. Исследования качественных характеристик молока проводились при использовании инфракрасного анализатора качества молока «Fossomatic™ 7 DC» (Foss Analytical A/S, Дания) в отделе популяционной генетики и генетических основ разведения животных, а биохимические исследования крови произведены на автоматическом биохимическом анализаторе Erba Mannheim automatic XL-640 («Lachema s.r.o.», Чехия) в отделе физиологии и биохимии с.-х. животных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Статистическая обработка. Полученный по результатам исследований цифровой материал был подвергнут статистической обработке с использованием t-критерия Стьюдента, достоверными считали различия при $P \leq 0,05$ и $P \leq 0,01$.

Результаты исследования.

Как видно из цифрового материала таблицы 1, содержание СП в СВ рационов коров подопытных групп не различалось в межгрупповом аспекте и находилось на уровне 17,2 %, при равной энергетической обеспеченности (11,0 МДж/кг), а доля рубцово-нераспадаемого протеина в СП рациона животных опытной группы составила 40,0 % и превышала контроль на 0,5 абс. %, что положительным образом отразилось на увеличении концентрации ОП до 10,0 % в опытной группе, против 9,4 % в контрольной группе.

Таблица 1. Содержание основных питательных веществ в рационе
 Table 1. Content of essential nutrients in the diet

Показатели / Indicators	Контрольная / Control	Опытная / Experimental
Обменная энергия, МДж / Metabolic energy, MJ	258,8	257,3
Сухое вещество, кг / Dry matter, kg	23,6	23,4
КОЭ в СВ, МДж/кг / CME in DM, MJ/kg	11,0	11,0
Обменный протеин, % / Metabolic protein, %	9,4	10,0
Сырой протеин г / Crude protein, g	4050,4	4032,6
Распадаемый протеин г / Degradable protein, g	2630,9	2419,8
Нераспадаемый протеин, г / Non-degradable protein, g	1419,5	1612,8
Переваримый протеин, г / Digestible protein, g	2728,8	2847,6
Лизин, г / Lysine, g	148,1	163,0
Метионин, г / Methionine, g	86,5	82,7
Сырая клетчатка, г / Crude fiber, g	4135,4	4048,7
НДК, г / NDF, g	8010,2	7787,2
Крахмал, г / Starch, g	4526,3	4522,3
Сахар, г / Sugar, g	1705,9	1720,8
Сырой жир, г / Crude fat, g	944,6	917,2
Кальций, г / Calcium, g	173,7	168,5
Фосфор, г / Phosphorus, g	120,3	112,2

Наряду с этим в рационе коров опытной группы, получавших с задаваемым рационом соевый белковый концентрат, содержание незаменимой аминокислоты лизин превышало контроль (на 14,9 г), что позволило добиться наиболее оптимального отношения лимитирующих продуктив-

ность молочных коров лизина к метионину при значении – 2,0, а в дефицитном по лизину рационе коров контрольной группы отношение данных аминокислот составляло только 1,7.

Из таблицы 2 видно, что использование соевого белкового концентрата вместо части подсолнечного шрота в составе рациона с целью оптимизации протеинового питания, оказало позитивное влияние на валовой удой молока натуральной жирности, который у коров опытной группы за первые 100 дней лактации превосходил контроль на 259 кг или на 7,8 % ($P \leq 0,05$).

Таблица 2. Результаты учёта удоя коров подопытных групп, показателей качества молока и затрат кормов (n=20, M±SEM)

Table 2. Results of milk yield accounting of cows in experimental groups, milk quality indicators and feed costs (n=20, M±SEM)

Показатели / Indicators	Контрольная / Control	Опытная / Experimental
За 100 дней лактации / For 100 days of lactation		
Удой натурального молока, кг / Natural milk yield, kg	3304±82,7	3563±78,8*
Содержание жира, % / Natural fat milk yield, kg	3,82±0,17	3,85±0,16
Содержание белка, % / Protein content, %	3,08±0,13	3,12±0,12
Среднесуточный удой 4 % молока, кг / Average daily milk yield of 4% milk, kg	31,55±0,88	34,29±0,96*
Продукция молочного жира, кг / Milk fat production, kg	129,2±4,02	140,2±4,17
Продукция молочного белка, кг / Milk protein production, kg	104,5±3,32	113,9±2,78*
Концентрация мочевины, мг/100 мл / Urea concentration, mg/100 ml	32,45±0,82	30,27±0,57*
На 1 кг молока 4% жирности затрачено / Costs for 1 kg of 4% milk		
Обменной энергии, МДж / Metabolic energy, MJ	7,81	7,15
Сухого вещества, кг / Dry matter, kg	0,71	0,65
Концентрированных кормов, г / Concentrated feed, g	408	371
За 305 дней лактации / For 305 days of lactation		
Удой натурального молока, кг / Natural milk yield, kg	7961±124	8478±115**
Содержание жира, % / Natural fat milk yield kg,	3,83±0,17	3,86±0,18
Содержание белка, % / Protein content, %	3,09±0,14	3,11±0,13
Среднесуточный удой 4 % молока, кг / Average daily milk yield of 4% milk, kg	24,99±1,15	26,82±1,06
Продукция молочного жира, кг / Milk fat production, kg	304,9±5,89	327,2±6,43*
Продукция молочного белка, кг / Milk protein production, kg	246,0±4,62	263,7±4,87*
На 1 кг молока 4% жирности затрачено / Costs for 1 kg of 4% milk		
Обменной энергии, МДж / Metabolic energy, MJ	8,70	8,09
Сухого вещества, кг / Dry matter, kg	0,82	0,76
Концентрированных кормов, г / Concentrated feed, g	433	402

Примечание: * – $P \leq 0,05$, ** – $P \leq 0,01$ при сравнении с контрольной группой

Note: * – $P \leq 0.05$, ** – $P \leq 0.01$ when compared with the control group

Балансирование рациона по уровню НРП повысило массовую долю жира в молоке коров опытной группы на 0,03 абс. % за период опыта и, в свою очередь, позволило увеличить среднесуточный удой молока 4 % жирности у коров этой группы на 2,7 кг или на 8,7 % ($P \leq 0,05$) по сравнению с контрольной группой, а также способствовало росту продукции молочного жира на 11,0 кг или 8,5 %.

В производственной апробации также установлено положительное влияние повышения не-распадаемой фракции протеина до 40,0 % на содержание в молоке белка, которое в опытной группе превышало контроль на 0,04 абс. % и составило 3,12 %, что позитивно отразилось на увеличении продукции молочного белка на 9,4 кг или 9,0 % ($P \leq 0,05$). При этом в молоке коров опытной группы отмечалось достоверное снижение концентрации мочевины на 6,7 % ($P \leq 0,05$) по сравнению с контролем.

С целью оценки зоотехнической эффективности производства молока при применении соевого белкового концентрата в кормлении молочных коров для оптимизации протеинового питания в период раздоя, рассчитали затраты кормов, которые показали, что коровы из опытной группы на продуцирование 1 кг молока 4 % жирности затрачивали меньше СВ рациона на 0,06 кг по сравнению с контролем.

Для установления последствий от скармливания коровам рациона с использованием соевого белкового концентрата с целью балансирования его по уровню НРП в период раздоя, анализ результатов контрольных доений животных подопытных групп осуществлялся до 305 дня лактации, который показал положительное влияние оптимизации протеинового питания высокоудойных коров в первую треть лактации на уровень молочной продуктивности и в последующие периоды лактации.

Так, животные из опытной группы превосходили контроль по валовому удою молока натуральной жирности на 517 кг или 6,5 % ($P \leq 0,01$), а по удою молока 4 % жирности различия составили 7,3 %. Продукция молочного жира и белка у коров опытной группы была выше соответственно на 7,3 % и 7,2 % ($P \leq 0,05$) по сравнению с контролем. Животные из опытной группы на продуцирование 1 кг 4 % молока расходовали меньше кормов (СВ) на 0,04 кг.

В ходе проведения исследований по определению концентрации биохимических показателей крови коров подопытных групп, взятой в конце научно-производственного опыта, отмечалось положительное влияние от использования экструдированного соевого белкового концентрата, с целью оптимизации показателей протеинового питания коров в период раздоя на биохимический статус крови животных опытной группы (табл. 3).

Таблица 3. Показатели биохимического статуса крови коров (n=5, M±SEM)
 Table 3. Biochemical status indicators of cow blood (n=5, M±SEM)

Показатели / Indicators	Контрольная / Control	Опытная / Experimental
Общий белок, г/л / Total protein, g/l	84,13±1,35	86,86±0,44
Альбумин, г/л / Albumin, g/l	27,52±0,57	28,95±1,02
Глобулин, г/л / Globulin, g/l	56,61±1,41	57,91±0,74
А/Г коэффициент / A/G ratio	0,49	0,50
Мочевина, ммоль/л / Urea, mmol/l	5,75±0,17	4,97±0,29*
Креатинин, мкмоль/л / Creatinine, μmol/l	88,99±5,31	85,06±5,90
АЛТ, МЕ/л / ALT, IU/l	32,77±3,23	33,33±1,36
АСТ, МЕ/л / AST, IU/l	85,52±6,64	84,04±6,35
Отношение АСТ/АЛТ / AST/ALT ratio	2,61	2,52
Глюкоза, ммоль/л / Glucose, mmol/l	2,38±0,11	2,54±0,10
Холестерин, ммоль/л / Cholesterol, mmol/l	6,80±0,38	7,26±0,24
Триглицериды, ммоль/л / Triglycerides, mmol/l	0,16±0,01	0,15±0,01
Кальций, ммоль/л / Calcium, mmol/l	2,56±0,10	2,61±0,06
Фосфор, ммоль/л / Phosphorus, mmol/l	2,13±0,14	2,09±0,11
Магний, ммоль/л / Magnesium, mmol/l	1,13±0,09	1,19±0,03
Хлориды, ммоль/л / Chlorides, mmol/l	105,77±1,88	105,68±0,89
Щелочная фосфатаза, МЕ/л / Alkaline phosphatase, IU/l	42,17±5,35	39,75±5,43

Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении с контрольной группой
 Note: * – $P \leq 0,05$ when compared with the control group

Так, при определении показателей, характеризующих белковый обмен в организме животных, на фоне установленного снижения концентрации мочевины на 13,6 % ($P \leq 0,05$) в группе коров с увеличенной до 40 % долей рубцово-нераспадаемой фракции протеина в составе рациона

отмечалась тенденция к достоверности различий в повышении содержания общего белка в сыворотке крови на 3,2 %, по сравнению с контрольной группой.

По результатам проведения производственной апробации была рассчитана экономическая эффективность производства молока при оптимизации протеинового питания высокоудойных коров в первую треть лактации с применением соевого белкового концентрата в составе рациона (табл. 4).

Таблица 4. Показатели экономической эффективности (на 1 гол., руб.)

Table 4. Economic efficiency indicators (per 1 head, rub.)

Показатели / Indicators	Контроль / Control	Опытная / Experimental
Получено молока базисной жирности, ц / <i>Milk of basic fat content was obtained, c</i>	37,12	40,35
Цена реализации 1 ц молока / <i>Selling price of 1 c of milk</i>	4200,0	4200,0
Выручено средств от реализации / <i>Proceeds from sales</i>	155904,0	169470,0
Затраты на производство молока / <i>Milk production costs</i>	139624,3	149304,9
Себестоимость 1 ц молока / <i>Cost price of 1 c of milk</i>	3761,4	3700,2
Прибыль от реализации молока / <i>Profit from milk sales</i>	16279,7	20165,1

Включение соевого белкового концентрата в рацион животных опытной группы в период раздоя повысило на 5081,6 руб. стоимость скормленных за первые 100 дней лактации кормов. Наряду с этим в группе коров с увеличенным до 40 % уровнем НРП были выше и другие статьи расходов на производство молока в результате более высокой молочной продуктивности. В этой связи количество затраченных средств на производство молока базисной жирности в опытной группе превосходило контроль на 9680,6 руб., в итоге было получено снижение себестоимости 1 ц молока на 1,6 %.

Сумма денежных средств, вырученная от реализации молочной продукции в подопытных группах, существенно превышала затраты на производство молока, поэтому прибыль от реализации молочной продукции составила в пределах 16279,7-20165,1 руб., и в опытной группе она на 3885,4 руб. превосходила контрольную группу.

Обсуждение полученных результатов.

Итоговый результат научно-производственного опыта подтвердил данные, полученные ранее в научном эксперименте на высокоудойных коровах, по обоснованности увеличения доли не-распадаемого протеина в период раздоя с 35 до 40,0 % при использовании белковых концентратов растительного происхождения с высоким содержанием НРП – кукурузного глютенa (60 % СП и 80 % НРП) и соевого белкового концентрата, где было установлено положительное влияние на прибавку в удое, которая составила 5,8 и 7,6 % ($P \leq 0,05$), и уменьшении затрат кормов на производство молока (5,7-7,2 %), при снижении в крови коров опытных групп содержания мочевины на 15,5 и 21,7 % ($P \leq 0,05$) и отмеченной тенденции к достоверности в повышении концентрации лизина на 7,6 % в гидролизате сывороточных белков крови коров, получавших в составе рациона соевый белковый концентрат (Головин А.В. и др., 2023).

Основываясь на получении более выраженного эффекта от применения соевого белкового концентрата в научно-хозяйственном опыте, а также на том, что рационы коров опытных групп имели равную концентрацию НРП в СП – 40 % и одинаковое содержание ОП (10 % в СВ), при проведении производственной апробации выбор был сделан в пользу данного источника защищённого протеина, в котором отмечалось высокое содержание лимитирующей молочную продуктивность аминокислоты – лизина (29,9 г/кг), это позволило сбалансировать рацион коров этой группы по отношению сырых лизина к метионину, равному 2,0 (Калашников А.П. и др., 2003), против 1,7 – в контрольной группе.

Исходя из анализа существующих моделей расчёта потребностей при нормировании показателей протеинового питания, а также материалов собственных исследований, сделан вывод о том, что потребность жвачных животных в белке необходимо трактовать как потребность в аминокислотах, по причине выполнения ими роли первостепенных метаболитов при синтезе белков тканей тела и молока, а оптимальную потребность в них необходимо выражать по содержанию в ОП (Рядчиков В.Г. и др., 2019).

О целесообразности нормирования рационов лактирующих коров по обменным аминокислотам и, в первую очередь, по лизину и метионину по результатам своих исследований отмечали и другие авторы, которые утверждают, что ОП является основным источником истинно абсорбированных аминокислот (Харитонов Е.Л. и Березин А.С., 2018; Schwab CG and Broderick GA, 2017).

Полученные нами результаты исследований согласуются с выводами представленных работ ряда авторов и показывают важность балансирования рационов молочных коров с продуктивностью более 8000 кг молока в первую треть лактации как по уровню НРП, что напрямую влияет на концентрацию ОП в СВ рациона, так и по незаменимым аминокислотам, а использование соевого белкового концентрата показало высокую эффективность при оптимизации протеинового питания лактирующих коров (Головин А.В., 2024).

Заключение.

Оптимизация протеинового питания высокоудойных коров в период раздоя за счёт повышения содержания НРП в СП рациона с 35,0 % в контроле до уровня 40,0 % в опытной группе при использовании экструдированного соевого белкового концентрата (1,0 кг/гол. в сутки) положительным образом отразилась на динамике раздоя и прибавке в продуцировании молока, которая составила 7,8 % ($P \leq 0,05$) в первую треть лактации, и более высоким выходе молочного жира и белка соответственно на 8,5 % и 9,0 % ($P \leq 0,05$), при снижении затрат кормов (СВ) на продуцирование 1 кг 4 % молока на 0,06 кг. Динамичный раздой коров опытной группы повлиял на рост удоя за всю лактацию на 6,5 % ($P \leq 0,01$). Биохимические исследования крови показали, что повышение доли нераспадаемого протеина до 40 % в СП рациона коров опытной группы благоприятно влияло на интенсивность протекания белкового обмена, при выраженной тенденции повышения концентрации общего белка на 3,2 % и снижении концентрации мочевины на 13,6 % ($P \leq 0,05$). Расчёт экономических показателей продемонстрировал высокую эффективность применения экструдированного соевого белкового концентрата с целью нормирования протеинового питания высокоудойных коров в период раздоя, что отразилось на снижении себестоимости молока на 1,6 % и получении дополнительной прибыли при его производстве.

Список источников

1. Буряков Н.П., Прохоров Е.О. Безалкалоидный люпин сорта Дега в кормлении коров // Кормопроизводство. 2017. № 1. С. 40-44. [Buryakov NP, Prokhorov EO. Alkaloid-free lupine "Dega" in cow feeding. Kormoproizvodstvo. 2017;1:40-44. (In Russ.)].
2. Влияние новой кормовой добавки для высокопродуктивных коров КД-Биш на качество молочных продуктов / И.Ф. Горлов, М.И. Сложенкина, Н.И. Мосолова, О.В. Кудряшова, Н.А. Ткаченко, В.А. Пузанкова // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107. № 1. С. 73-82. [Gorlov IF, Slozhenkina MI, Mosolova NI, Kudryashova OV, Tkachenkova NA, Puzankova VA. Influence of the new feed additive KD-Bish on the quality of dairy products. Animal Husbandry and Fodder Production. 2024;107(1):73-82. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-73
3. Глухов Д. Эффективное использование протеина в рационах для коров // Животноводство России. 2020. № 12. С. 49-54. [Glukhov D. Efficient use of protein in cow diets. Animal Husbandry of Russia. 2020;12:49-54. (In Russ.)]. doi: 10.25701/ZZR.2020.57.97.001
4. Головин А.В. Влияние защищенных белковых добавок на продуктивность и обмен веществ коров // Ветеринария и кормление. 2023. № 3. С. 27-31. [Golovin AV. Influence of protected

protein supplements on the productivity and metabolism of cows. Veterinaria i kormlenie. 2023;3:27-31. (In Russ.]. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2023-3-6

5. Головин А.В. Нормирование рационов молочных коров по нераспадаемому протеину белковыми добавками растительного происхождения // Аграрная наука. 2024. № 8. С. 67-73. [Golovin AV. Rationing of diets of dairy cows for non-degradable protein with protein supplements of plant origin. Agrarian Science. 2024;8:67-73. (In Russ.]. doi: 10.32634/0869-8155-2024-385-8-67-73

6. Головин А.В., Игнатьева Л.П., Рыков Р.А. Влияние различных источников защищенного протеина на продуктивность и биохимический статус крови высокопродуктивных коров. // Молочное и мясное скотоводство. 2023. № 2. С. 31-35. [Golovin AV, Ignatieva LP, Rykov RA. Influence of various sources of protected protein on productivity and biochemistry blood status of highly productive cows. Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding. 2023;2:31-35. (In Russ.]. doi: 10.33943/MMS.2023.97.70.007

7. ГОСТ 26176-2019. Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов. Введ. 2020-08-01. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с. [GOST 26176-2019. Fodders, mixed feeds. Methods for determination of soluble and hydrolysable carbohydrates. Vved. 2020-08-01. Moscow: Standartinform; 2019:11 p. (In Russ.].

8. ГОСТ 26226-95. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения сырой золы. Введ. 1997-01-01. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. 5 с. [GOST 26226-95. Fodder, mixed fodder and mixed fodder raw material. Methods for determination of raw ash. Vved. 1997-01-01. Minsk: Mezghosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; 2003:5 p. (In Russ.].

9. ГОСТ 26570-95. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения кальция. Введ. 1997-01-01. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. 13 с. [GOST 26570-95. Fodder, mixed fodder and mixed fodder raw material. Methods for determination of calcium. Vved. 1997-01-01. Minsk: Mezghosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; 2003:13 p. (In Russ.].

10. ГОСТ 26657-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания фосфора. Введ. 1999-01-01. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 10 с. [GOST 26657-97. Fodders, mixed fodders, mixed fodder raw materials. Methods for determination of phosphorus content. Vved. 1999-01-01. Minsk: Mezghosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; 1999:10 p. (In Russ.].

11. ГОСТ 32905-2014 (ISO 6492:1999, MOD). Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения содержания сырого жира. Введ. 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с. [GOST 32905-2014 (ISO 6492:1999). Feeds, mixed feeds and raw material. Method for determination of fat content. Vved. 2016-01-01. Moscow: Standartinform; 2015:11 p. (In Russ.].

12. ГОСТ Р 51417-99. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение массовой доли азота и вычисление массовой доли сырого протеина. Метод Кьельдаля. Введ. 2001-01-01. М.: Госстандарт России, 2002. 5 с. [GOST R 51417-99. Feeds, mixed feeds and raw material. Determination of mass fraction of nitrogen and calculation of mass fraction of crude protein. Kjeldahl method. Vved. 2001-01-01. Moscow: Gosstandart Rossii; 2002:5 p. (In Russ.].

13. ГОСТ Р 52838-2007. Корма. Методы определения содержания сухого вещества. Введ. 2009-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с. [GOST R 52838-2007. Feeds. Methods for determination of dry matter content. Vved. 2009-01-01. Moscow: Standartinform; 2008:7 p. (In Russ.].

14. ГОСТ Р 52839-2007. Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации. Введ. 2009-01-01. М.: Стандартинформ, 2011. 9 с. [GOST R 52839-2007. Feeds. Methods for determination of crude fibre content with intermediate filtration. Vved. 2009-01-01. Moscow: Standartinform; 2011:9 p. (In Russ.].

15. Дулепинских Л.Н., Сычева Л.В., Юнусова О.Ю. Влияние белкового концентрата на молочную продуктивность коров // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 3(47). С. 20-25. [Dulepin-

skikh LN, Sycheva LV, Yunusova OY. Effect of protein concentrate on milk productivity of cows. Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy. 2023;3 (47):20-25. *(In Russ.)*.

16. Кувшинов В.Н., Дуборезов В.М., Цис Е.Ю. Продуктивность и качество молока при скармливании суспензии хлореллы высокопродуктивным коровам // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 1. С. 83-92. [Kuvshinov VN, Duborezov VM, Tsis EYu. Productivity and milk quality after feeding high-yielding cows with chlorella suspension. Animal Husbandry and Fodder Production. 2024;107(1):83-92. *(In Russ.)*. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-83

17. Никищенко А.В., Чехранова С.В. Белоксодержащая кормовая добавка «Горлинка» в рационах лактирующих коров // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2019. № 5. С. 15-25. [Nikishenko AV, Chekhranova SV. The protein-containing feed additive "Gorlinka" in the rations of lactating cows. Kormlenie sel'skhozjajstvennyh zhivotnyh i kormoproizvodstvo. 2019;5:15-25. *(In Russ.)*].

18. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / А.П. Калашников и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 2003. 456 с. [Kalashnikov AP, et al. Normy i raciony kormlenija sel'skhozjajstvennyh zhivotnyh: sprav. posobie. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Agropromizdat; 2003:456 p. *(In Russ.)*].

19. Нормы потребностей молочного скота и свиней в питательных веществах: монография / под ред. Р.В. Некрасов и др. М.: РАН. 2018. 290 с. [Nekrasov RV, et al. (eds.). Standards requirements of dairy cattle and pigs in nutrients: monografija. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2018:290 p. *(In Russ.)*].

20. Нормы потребности лактирующих коров в незаменимых аминокислотах / В.Г. Рядчиков, О.Г. Шляхова, А. Тантافي, Н.С. Комарова // Эффективное животноводство. 2019. № 9(157). С. 136-142. [Ryadchikov VG, Shlyakhova OG, Tantavi A, Komarova NS. Normy potrebnosti laktirujushhih korov v nezamenimyh aminokislotah. Effektivnoe zhivotnovodstvo. 2019;9(157):136-142. *(In Russ.)*].

21. Погосян Д.Г. Качество протеина в кормах для жвачных животных: монография. Пенза: ПГСХА, 2014. 133 с. [Pogosyan DG. Kachestvo proteina v kormah dlja zhvachnyh zhivotnyh: monografija. Penza: PGSKhA; 2014:133 p. *(In Russ.)*].

22. Полноценное кормление молочного скота – основа реализации генетического потенциала продуктивности / В.И. Волгин, Л.В. Романенко, П.Н. Прохоренко, З.Л. Федорова, Е.А. Корочкина. М.: РАН, 2018. 260 с. [Volgin VI, Romanenko LV, Prokhorenko PN, Fedorova ZL, Korochkina EA. Full feeding dairy cattle is the basis of realization of the genetic productivity potential. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2018:260 p. *(In Russ.)*].

23. Сычева Л.В., Юнусова О.Ю. Использование белкового концентрата в рационах высокопродуктивных коров // Вестник Ошского Государственного университета. Сельское хозяйство: Агрономия, ветеринария и зоотехния. 2023. № 3(4). С. 49-57. [Sycheva LV, Yunusova OYu. Use of protein concentrator in the diets of highly productive cows. Journal of Osh State University. Agriculture: Agronomy, Veterinary and Zootechnics. 2023;3(4):49-57. *(In Russ.)*. doi: 10.52754/16948696_2023_3_6

24. Харитонов Е.Л., Березин А.С. Физиологические основы оптимизации аминокислотного питания молочного скота // Вестник науки и образования. 2018. № 18-1(54). С. 56-60. [Khari-tonov EL, Berezin AS. Physiological bases of optimization of amino acid nutrition of dairy cattle. Vestnik nauki i obrazovaniya. 2018;18-1(54):56-60. *(In Russ.)*].

25. Эффективность применения белкового концентрата в рационах высокопродуктивных коров / Н.П. Буряков, М.А. Бурякова, А.С. Заикина, И.А. Касаткина, Д.Е. Алешин // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2021. № 2. С. 15-25. [Buryakov NP, Buryakova MA, Zaikina AS, Kasatkina IA, Aleshin DE. Efficiency of protein concentrate application in the rations of highly productive cows. Kormlenie sel'skhozjajstvennyh zhivotnyh i kormoproizvodstvo. 2021;2:15-25. *(In Russ.)*. doi: 10.33920/sel-05-2102-02

26. Chojnacka K, et al. Innovative high digestibility protein feed materials reducing environmental impact through improved nitrogen-use efficiency in sustainable agriculture. Journal of Environmental Management. 2021;291:112693. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112693

27. Erickson PS, Kalscheur KF. Nutrition and feeding of dairy cattle. *Animal Agriculture*. 2020;157-180. doi:10.1016/B978-0-12-817052-6.00009-4
28. Hanigan MD, Souza VC, Martineau R, Daley VL, Kononoff P. Predicting ruminally undegraded and microbial protein flows from the rumen. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(8):8685-8707. doi: 10.3168/jds.2020-19672
29. Schwab CG, Broderick GA. A 100-Year Review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(12):10094-10112. doi: 10.3168/jds.2017-13320

References

1. Buryakov NP, Prokhorov EO. Alkaloid-free lupine "Dega" in cow feeding. *Feed Production*. 2017;1:40-44.
2. Gorlov IF, Slozhenkina MI, Mosolova NI, Kudryashova OV, Tkachenkova NA, Puzankova VA. Influence of the new feed additive KD-Bish on the quality of dairy products. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(1):73-82. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-73
3. Glukhov D. Efficient use of protein in cow diets. *Animal Husbandry of Russia*. 2020;12:49-54. doi: 10.25701/ZZR.2020.57.97.001
4. Golovin AV. Influence of protected protein supplements on the productivity and metabolism of cows. *Veterinary Science and Feeding*. 2023;3:27-31. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2023-3-6
5. Golovin AV. Rationing of diets of dairy cows for non-degradable protein with protein supplements of plant origin. *Agrarian Science*. 2024;8:67-73. doi: 10.32634/0869-8155-2024-385-8-67-73
6. Golovin AV, Ignatieva LP, Rykov RA. Influence of various sources of protected protein on productivity and biochemistry blood status of highly productive cows. *Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding*. 2023;2:31-35. doi: 10.33943/MMS.2023.97.70.007
7. State Standard 26176-2019. Fodders, mixed feeds. Methods for determination of soluble and hydrolysable carbohydrates. Implementation date 2020-08-01. Moscow: Standartinform; 2019:11 p.
8. State Standard 26226-95. Fodder, mixed fodder and mixed fodder raw material. Methods for determination of raw ash. Implementation date 1997-01-01. Minsk: Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification; 2003:5 p.
9. State Standard 26570-95. Fodder, mixed fodder and mixed fodder raw material. Methods for determination of calcium. Implementation date 1997-01-01. Minsk: Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification; 2003:13 p.
10. State Standard 26657-97. Fodders, mixed fodders, mixed fodder raw materials. Methods for determination of phosphorus content. Implementation date 1999-01-01. Minsk: Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification; 1999:10 p.
11. State Standard 32905-2014 (ISO 6492:1999, MOD). Feeds, mixed feeds and raw material. Method for determination of fat content. Implementation date 2016-01-01. Moscow: Standartinform; 2015:11 p.
12. State Standard R 51417-99. Feeds, mixed feeds and raw material. Determination of mass fraction of nitrogen and calculation of mass fraction of crude protein. Kjeldahl method. Implementation date 2001-01-01. Moscow: Gosstandart Rossii; 2002:5 p.
13. State Standard R 52838-2007. Feeds. Methods for determination of dry matter content. Implementation date 2009-01-01. Moscow: Standartinform; 2008:7 p.
14. State Standard R 52839-2007. Feeds. Methods for determination of crude fibre content with intermediate filtration. Implementation date 2009-01-01. Moscow: Standartinform; 2011:9 p.
15. Dulepinskiikh LN, Sycheva LV, Yunusova OY. Effect of protein concentrate on milk productivity of cows. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2023;3(47):20-25.
16. Kuvshinov VN, Duborezov VM, Tsis EYu. Productivity and milk quality after feeding high-yielding cows with chlorella suspension. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(1):83-92. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-83

17. Nikishenko AV, Chekhranova SV. The protein-containing feed additive "Gorlinka" in the rations of lactating cows. *Feeding of agricultural animals and Feed production*. 2019;5:15-25.
18. Kalashnikov AP et al. Norms and diets for feeding farm animals: Ref. book. 3rd ed., add. and reworked. Moscow; 2003: 456 p.
19. Nekrasov RV, et al. (eds.). Standards requirements of dairy cattle and pigs in nutrients: monograph. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2018: 290 p.
20. Ryadchikov VG, Shlyakhova OG, Tantavi A, Komarova NS. Norms of lactating cows' needs for essential amino acids. *Effective Animal Nutrition*. 2019;9(157):136-142.
21. Pogosyan DG. Protein quality in ruminant feeds: a monograph. Penza: PGSKhA; 2014:133 p.
22. Volgin VI, Romanenko LV, Prokhorenko PN, Fedorova ZL, Korochkina EA. Full feeding dairy cattle is the basis of realization of the genetic productivity potential. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2018:260 p.
23. Sycheva LV, Yunusova OYu. Use of protein concentrator in the diets of highly productive cows. *Journal of Osh State University. Agriculture: Agronomy, Veterinary and Zootechnics*. 2023;3(4):49-57. doi: 10.52754/16948696_2023_3_6
24. Kharitonov EL, Berezin AS. Physiological bases of optimization of amino acid nutrition of dairy cattle. *Bulletin of Science and Education*. 2018;18-1(54):56-60.
25. Buryakov NP, Buryakova MA, Zaikina AS, Kasatkina IA, Aleshin DE. Efficiency of protein concentrate application in the rations of highly productive cows. *Feeding of Farm Animals and Fodder Production*. 2021;2:15-25. doi: 10.33920/sel-05-2102-02
26. Chojnacka K, et al. Innovative high digestibility protein feed materials reducing environmental impact through improved nitrogen-use efficiency in sustainable agriculture. *Journal of Environmental Management*. 2021;291:112693. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112693
27. Erickson PS, Kalscheur KF. Nutrition and feeding of dairy cattle. *Animal Agriculture*. 2020:157-180. doi:10.1016/B978-0-12-817052-6.00009-4
28. Hanigan MD, Souza VC, Martineau R, Daley VL, Kononoff P. Predicting ruminally undegraded and microbial protein flows from the rumen. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(8):8685-8707. doi: 10.3168/jds.2020-19672
29. Schwab CG, Broderick GA. A 100-Year Review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(12):10094-10112. doi: 10.3168/jds.2017-13320

Информация об авторе:

Александр Витальевич Головин, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела кормления с.-х. животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста; 142132, Московская область, г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967) 65-12-08.

Information about the author:

Alexander V Golovin, Dr. Sci. (Biology), Professor, Chief Researcher of the Department of Feeding of Agricultural Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Dubrovitsy, Russia, 60 Dubrovitsy settlement, Moscow Region, 142132, Podolsk, tel.: 8(4967) 65-12-08.

Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена после рецензирования 29.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 14.10.2024; approved after reviewing 29.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 218-226.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 218-226.

Научная статья
УДК 636.086
doi:10.33284/2658-3135-107-4-218

Влияние фитобиотиков в составе рациона на зоотехнические и биохимические показатели цыплят-бройлеров

Юрий Константинович Петруша¹

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия
¹shadow752@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8283-2972>

Аннотация. Статья посвящена оценке продуктивности и биохимического состава сыворотки крови цыплят-бройлеров на фоне применения фитобиотических кормовых добавок. Для проведения исследования было отобрано 100 семидневных цыплят-бройлеров кросса «Арбор Ай-кресс», из которых по принципу пар-аналогов сформировали четыре группы: в общий рацион I опытной группы добавляли фитобиотик Бутитан в дозировке 500 мг/кг корма, II – Ореганум в дозе 200 мг/кг корма, III – Пробиоцид-Фито в количестве 1 г/кг корма. Результаты исследования продемонстрировали, что фитобиотические кормовые добавки являются эффективным методом формирования продуктивных качеств у цыплят-бройлеров. В конце эксперимента (в возрасте 42 суток) максимальное значение живая масса достигла при скормлинии Ореганум, что превосходило значения контроля на 8,66 % ($P \leq 0,05$). В группе, получавшей Бутитан, масса птицы увеличилась на 5 %, а в группе, получавшей Пробиоцид-фито, на 3,7 % относительно контрольных значений. Применение фитобиотических кормовых добавок представляет собой перспективное направление, которое может быть рекомендовано для внедрения в практику птицеводства.

Ключевые слова: сельскохозяйственная птица, цыплята-бройлеры, рацион, полноценное кормление, фитобиотические препараты, фитобиотики, кормовые добавки, биологически активные вещества

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0003).

Для цитирования: Петруша Ю.К. Влияние фитобиотиков в составе рациона на зоотехнические и биохимические показатели цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 218-226. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-218>

Original article

Effect of phytobiotics in the diet on zootechnical and biochemical parameters of broiler chickens

Yury K Petrusha¹

¹Federal Research Centre of Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia
¹shadow752@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8283-2972>

Abstract. The article is devoted to the evaluation of productivity and biochemical composition of blood serum in broiler chickens against the background of phytobiotic feed additives. For the study, 100 seven-day-old broiler chickens of Arbor Acres cross were selected, from which four groups were formed according to the principle of pair-analogue: Butitan phytobiotic in the dose of 500 mg/kg of feed was add-

ed to the basic ration of I experimental group, II - Oreganum in the dose of 200 mg/kg of feed, III - Probiocid-Fito in the dose of 1 g/kg of feed. The results of the study showed that phytobiotic feed additives are an effective method of productive traits formation in broilers. At the end of the experiment (at 42 days of age), the maximum value of live weight was reached when oregano was fed, which was 8.66% higher than the control values ($P \leq 0.05$). In the group receiving Butitan, the weight of the birds increased by 5%, and in the group receiving Probiocid-fito, by 3.7% compared to the control values. The use of phytobiotic feed additives is a promising direction that can be recommended for implementation in poultry farming practice.

Keywords: poultry, broiler chickens, diet, complete feeding, phytobiotic preparations, phytobiotics, feed additives, biologically active substances

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0003).

For citation: Petrusha YK. The effect of phytobiotics in the diet on the zootechnical and biochemical parameters of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):218-226. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-218>

Введение.

В последние годы при разработках технологий кормления сельскохозяйственных животных и птиц всё чаще практикуется применение кормовых добавок, основанных на естественных природных веществах, таких как экстракты растений, эфирные масла, пробиотики и пребиотики, что предоставляет новые возможности для оптимизации процессов пищеварения (Elbaz AM et al., 2024). Естественные фитогенные кормовые добавки демонстрируют многообещающие результаты и оказывают положительное влияние на продуктивные показатели сельскохозяйственных птиц и животных. Многочисленные исследования подтверждают их потенциал в качестве эффективной альтернативы антибиотикам (Abou-Jaoudeh C et al., 2024). Фитогенные добавки, состоящие из экстрактов растений, эфирных масел и других природных соединений, обладают комплексным воздействием, способствуя улучшению процессов пищеварения, повышению усвояемости питательных веществ и модуляции микробиоты кишечника, что, в свою очередь, может приводить к увеличению среднесуточного прироста массы тела и улучшению коэффициента конверсии корма (Jahja EJ et al., 2022). Многие исследователи ранее продемонстрировали положительное влияние растительных добавок на темпы роста бройлеров (Рязанов В.А. и др., 2021). Растительные компоненты являются природными антиоксидантами, что также может способствовать увеличению продуктивных качеств сельскохозяйственных животных и птицы (Meligy AMA et al., 2023).

Цель исследования.

Изучить биологические эффекты фитобиотиков в составе рациона на зоотехнические и биохимические показатели цыплят-бройлеров кросса «Арбор Айкросс».

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Цыплята-бройлеры кросса «Арбор Айкросс».

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все процедуры над животными были выполнены в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФНЦ БСТ РАН.

Схема эксперимента. Для проведения исследования было отобрано 100 семидневных цыплят-бройлеров кросса «Арбор Айкросс» (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская»), из которых по принципу пар-аналогов сформировали четыре группы. Контрольная группа (n=25) бройлеров получала основной рацион (ОР), соответствующий рекомендациям по кормлению сельскохозяйственной птицы (Фисинин В.И. и др., 2023). В общий рацион I опытной группы (n=25) добавляли фитобиотик Бутитан в дозировке 500 мг/кг корма, в рацион II опытной группы (n=25) – Ореганум в дозировке 200 мг/кг корма, в рацион III опытной группы (n=25) – Пробиоцид®-Фито в дозировке 1 г/кг корма.

Биологические свойства препарата Бутитан обусловлены содержанием активного ингредиента и его синергетическим действием: экстракт сладкого каштана и бутират кальция входят в состав добавки. Экстракт сладкого каштана является источником полифенолов, способствует лучшему перевариванию и усвоению питательных веществ, улучшает состояние слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта и укрепляет иммунитет кишечника. По заявлениям производителя (ООО «Сиветра-Агро», Москва, Россия), в результате применения добавок значительно уменьшаются нарушения пищеварительной системы, улучшаются процессы переваривания и усвоения питательных веществ, повышается продуктивность, среднесуточное увеличение.

Препарат Ореганум изготовлен на основе вида *Origanum vulgare*, натурального эфирного масла растения орегано. Масло содержит более 46 активных ингредиентов и, по заявлениям производителя (ООО НПП «Сагро», Ростов-на-Дону, Россия), повышает иммунитет, стимулирует рост и снижает стресс у животных и птиц. Этот натуральный препарат позволяет полностью заменить кормовые антибиотики, а также повышает экономическую продуктивность и улучшает качество мяса.

Препарат Пробиоцид®-Фито – это комплекс дополнительных питательных веществ для нормализации пищеварительных процессов и повышения безопасности домашнего скота и птицы. По заявлениям производителя (ООО «Биотроф», Санкт-Петербург, Россия), живые бактерии, входящие в состав кормовой добавки, способствуют образованию полезных микробных сообществ в пищеварительном тракте и нормализации пищеварения. Смесь натуральных эфирных масел обладает антибактериальной активностью, антиоксидантным и противовоспалительным действием, а также благотворно влияет на иммунный статус организма. Снижает вероятность дисбактериоза и других осложнений, вызванных пищевыми и техническими стрессовыми состояниями.

Кормление бройлеров проводилось 2 раза в сутки, учёт поедаемости кормов – ежедневно. Кормление птицы осуществлялось согласно потребности организма в различные возрастные периоды. Продолжительность эксперимента составляла 35 суток. Птица содержалась в клетках КУН-05 площадью 4050 см² (90½×45½×45 см). Микроклимат в помещении соответствовал требованиям ОНТП-4-88. Динамику показателей роста оценивали путём еженедельного индивидуального взвешивания перед кормлением. На основании взвешивания рассчитан абсолютный и среднесуточный приросты. Забор крови у птиц проводился в 42-суточном возрасте из подкрыльцовой вены для дальнейшего биохимического анализа.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>). Анализ крови проводили на автоматическом биохимическом анализаторе CST240 («DIRUI IndustrialCo., Ltd», Китай).

Статистическая обработка. Статистический анализ выполняли с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel 2016» («Microsoft», США) и обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США), который включал расчёт среднего значения (M) и стандартные ошибки среднего ($\pm$ SEM). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Уровень значимой разницы был установлен на $P \leq 0,05$.

Результаты исследования.

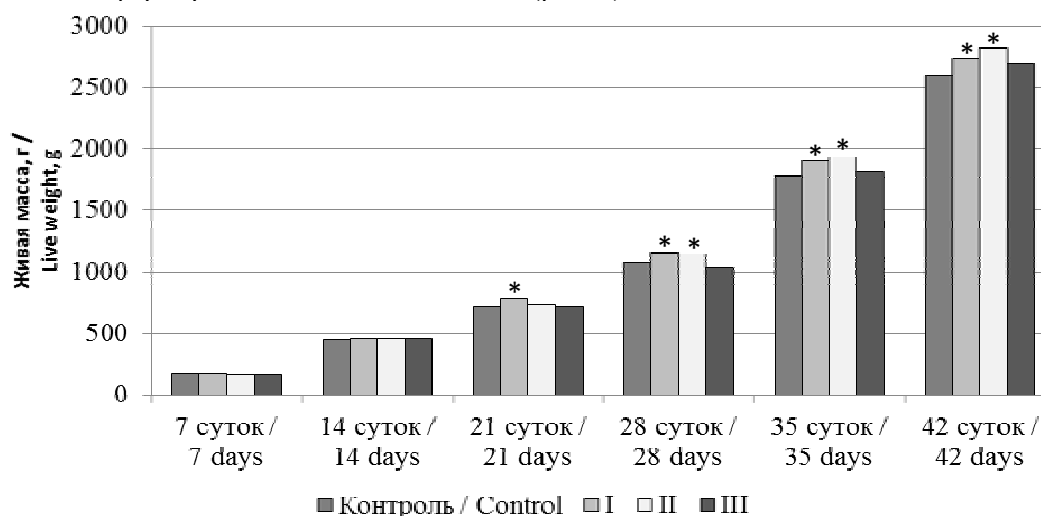
На основании оценки поедаемости кормов (табл. 1) было установлено, что в ростовой период меньшее количество корма было потреблено I опытной группой на 7,6 %, относительно кон-

трольной группы. Затраты корма на 1 кг прироста соответствовали потреблению и приросту живой массы, что выражалось в снижении данного показателя в I и II опытных группах на 10,2 % и 9 % соответственно при сравнении с контрольными значениями. Таким образом, препарат Бутитан оказал положительное влияние на потребление корма. Кормовая добавка Ореганум также проявила позитивное действие, тогда как фитобиотик Пробиоцид-Фито продемонстрировал наименьшее влияние.

Таблица 1. Поедаемость кормов цыплятами бройлерами, г/гол.
 Table 1. Feed consumption by broiler chickens, g/head

Показатель / Indicator	Группа / Group			
	контрольная / control	I	II	III
Стартовый рацион, г / Starting ration, g	1751	1618	1821	1847
Ростовой рацион, г / Growth ration, g	2312	2252	2229	2432
Всего за эксперимент, г / Total for the experiment, g	4063	3870	4050	4179
Затраты корма на 1 кг прироста живой массы / Feed costs per 1 kg of live weight gain	1,67	1,5	1,52	1,65

Кормление цыплят-бройлеров рационом с фитобиотическими препаратами положительно сказалось на формировании живой массы птиц (рис. 1).



Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении опытных групп с контрольной
 Note: * – $P \leq 0.05$ when comparing experimental groups with the control group

Рисунок 1. Динамика живой массы, г
 Figure 1. Dynamics of live weight, g

К 21 суткам исследования (возраст – 28 суток) в I и II опытных группах было установлено превосходство по живой массе при сравнении с контролем на 7,4 % ($P \leq 0,05$) и 6,7 % ($P \leq 0,05$) соответственно. В III экспериментальной группе масса была меньше на 3,45 % по сравнению с контролем.

В конце эксперимента (в возрасте 42 суток) максимальное значение живой массы было в опытной группе, получавшей Ореганум, что превосходило значения контроля на 8,66 % ($P \leq 0,05$). В группе, получавшей препарат Бутитан, масса птицы увеличилась на 5 %, а в группе, получавшей Пробиоцид-Фито, на 3,7 % относительно контрольных значений.

Аналогичная динамика была и по абсолютному приросту. Разница с контрольной группой по среднесуточному приросту составила: у I опытной группы – 5,77 % ($P \leq 0,05$), у II опытной группы – 9,28 % ($P \leq 0,05$) и у III опытной группы – 4 %.

В таблице 2 представлен прирост цыплят-бройлеров на фоне используемых рационов.

Таблица 2. Прирост цыплят-бройлеров, г
Table 2. Increase of broiler chickens, g

Показатель / Indicator	Группа / Group			
	контроль / control	I	II	III
Абсолютный прирост, г / Absolute increase, g	2425±50	2565±47,4*	2650±61,2	2522±54,9***
Среднесуточный прирост, г / The average daily increase, g	69,2±1,43	73,2±1,35*	75,7±1,75	72,0±1,57***

Примечание: * – $P \leq 0,05$; *** – $P \leq 0,001$ при сравнении опытных групп с контрольной

Note: * – $P \leq 0.05$; *** – $P \leq 0.001$ comparing experimental groups with the control group

На основании проведенных лабораторных исследований установлено влияние вводимых в рацион фитобиотиков на биохимические показатели сыворотки крови, состояние углеводного, белкового и липидного обменов цыплят-бройлеров (табл. 3). Было выявлено достоверное снижение уровня глюкозы в III опытной группе на 47 % и увеличение уровня белка на 3,2 % относительно контрольных значений.

Таблица 3. Биохимические показатели сыворотки крови
Table 3. Biochemical parameters of blood serum

Показатель / Indicator	Группа / Group			
	контроль / control	I	II	III
Глюкоза, ммоль/л / Glucose, mmol/l	11,7±0,65	11,8±0,23	12±0,39	6,2±0,06**
Общий белок, г/л / Total protein, g/l	31,5±1,01	31,4±1,87	35,1±1,55	32,4±0,44*
Холестерин, ммоль/л / Cholesterol, mmol/l	3,26±0,46	3,02±0,08	3,21±0,14	3,06±0,05
Триглицериды, ммоль/л / Triglycerides, mmol/l	0,36±0,09	0,46±0,09	0,48±0,08	0,15±0,01

Примечания: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$ при сравнении опытных групп с контрольной

Note: * – $P \leq 0.05$, ** – $P \leq 0.01$ comparing experimental groups with the control group

Обсуждение полученных результатов.

Изучение воздействия фитобиотических препаратов на организм сельскохозяйственных птиц представляет собой область значительного научного интереса. В последние годы наблюдается растущая потребность к применению добавок растительного происхождения в качестве альтернативы синтетическим антибиотикам и другим химическим добавкам в корморазработке. Снижение риска развития падежа и различных заболеваний желудочно-кишечного тракта связывают с формированием здоровой микробиоты, которая способна обеспечить высокую резистентность к колонизации кишечника патогенными микроорганизмами (Al-Hijazeen MA et al., 2022). Растительные экстракты, известные также под термином «фитобиотики», активно применяются в зоотехнической практике в кормлении сельскохозяйственных животных и птиц с начала XXI века. Основ-

ной целью их использования является обеспечение противомикробного, антипаразитарного, противовоспалительного и антиоксидантного воздействий на организм животных (Насонов И.В. и др., 2020). Фитобиотики содержат множество биологически активных компонентов, таких как флавоноиды, полифенолы, алкалоиды и эфирные масла, обладающих выраженной фармакологической активностью. Эти соединения способствуют улучшению общего состояния здоровья животных, повышая их устойчивость к инфекциям, а также способствуют нормализации микробиоты кишечника (Петруша Ю.К. и др., 2022).

В данном исследовании наблюдается формирование ответа организма цыплят-бройлеров на включение в рацион различных видов фитобиотических кормовых добавок. Механизм, лежащий в основе стимулирующего роста действия фитобиотиков, вероятно, обусловлен их способностью вызывать положительные изменения в составе и функциональной активности кишечной микробиоты, а также поддерживать анатомическую и физиологическую целостность кишечного эпителия (Дускаев Г.К. и др., 2020).

Однако из всех изученных биопрепаратов в данном эксперименте Ореганум оказался наиболее эффективным. Основным компонентом препарата «Ореганум» является эфирное масло, содержащее более 40 биологически активных веществ. Высокая антимикробная активность данного препарата обусловлена присутствием двух ключевых фенольных соединений — карвакрола и тимола, которые проявляют синергетические свойства в сочетании с другими активными компонентами, что усиливает их антимикробные эффекты. Фенолы эфирных масел ускоряют процесс обновления энтероцитов в кишечнике (цикличность — от 4 до 7 дней), что выражается в меньшей контаминации повреждённых энтероцитов, улучшении адсорбции питательных веществ корма, полном усвоении корма и ускорении роста животных (Alimohammadi Z et al., 2024). Бентонит, присутствующий в масле душицы, демонстрирует значительное влияние на нормализацию обменных процессов в организме птицы. Исследования указывают на его способность улучшать усвоение питательных веществ, микроэлементов и витаминов, что, в свою очередь, способствует оптимизации метаболических процессов (Valdez G et al., 2023). В птицеводстве применение Ореганума при откорме цыплят-бройлеров увеличивает их сохранность, снижает заболеваемость инфекционными болезнями, увеличивает среднесуточные привесы и улучшает конверсию корма (Madkour M et al., 2024). Данный препарат обладает селективной активностью исключительно в просвете кишечника, не проникая в системный кровоток, что подтверждает его локализованное действие. Важно отметить, что применение указанного фитобиотика не оказывает влияния на органолептические характеристики мяса и яиц, что позволяет сохранить их потребительские качества (Amer SA et al., 2021).

Результаты проведённых исследований наглядно свидетельствуют о значительной эффективности применения фитобиотических добавок в рационе цыплят-бройлеров. Научные данные подтверждают, что использование фитобиотиков способствует оптимизации динамики роста массы тела, а также содействует снижению затрат на корма, что является ключевым показателем экономической целесообразности в птицеводстве (Лаптев Г.Ю. и др., 2019; Манукян В.А. и др., 2021). Среди исследованных биопрепаратов Ореганум продемонстрировал наивысшие показатели эффективности. Данная добавка, содержащая экстракты растений, характеризуется высоким содержанием биологически активных соединений, что может обуславливать ее положительное влияние на метаболизм и общее состояние здоровья птиц. Вторым по эффективности препаратом выступил Бутитан, который также благоприятно сказывался на росте и развитии цыплят, хотя его результаты оказались ниже по сравнению с Ореганумом. Таким образом, полученные данные подчеркивают потенциал фитобиотических добавок как компонентов рационов для птицеводства, способствующих не только улучшению производственных показателей, но и оптимизации использования кормовых ресурсов. Применение биопрепаратов, таких как Ореганум и Бутитан, представляет собой перспективный подход для повышения эффективности и устойчивости производственных процессов в птицеводстве.

Заключение.

Установленный положительный эффект фитобиотиков расширяет знания о биологическом воздействии растительных биопрепаратов на организм цыплят-бройлеров и показывает перспективность их использования в технологических режимах выращивания сельскохозяйственной пти-

цы. Результаты исследования продемонстрировали, что из всех изучаемых препаратов наибольшей эффективностью в отношении продуктивного эффекта характеризовался Ореганум. Таким образом, фитобиотические кормовые добавки являются эффективным методом формирования продуктивных качеств у цыплят-бройлеров и их применение представляет собой перспективное направление, которое может быть рекомендовано для внедрения в практику птицеводства.

Список источников

1. Дускаев Г.К., Левахин Г.И., Докина Н.Н. Лекарственные растения и их применение в животноводстве // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 3. С. 204-214. [Duskaev GK, Levakhin GI, Dokina NN. Medicinal plants and their use in animal husbandry. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):204-214. (In Russ.).] doi: 10.33284/2658-3135-103-3-204
2. Комбикорма с разными источниками белка и аминокислот для мясных кур и петухов родительского стада бройлеров / В.И. Фисинин, Т.А. Егорова, И.А. Егоров и др. // Птицеводство. 2023. № 12. С. 43-49. [Fisinin VI, Egorova TA, Egorov IA et al. Compound feed with different sources of protein and amino acids for meat chickens and roosters of the parent broiler herd. *Pticevodstvo*. 2023;12:43-49. (In Russ.)] doi: 10.33845/0033-3239-2023-72-12-43-49
3. Манукян В.А., Харитонов Д.И., Байковская Е.Ю. Влияние применения эфирного масла лемонграсса в кормлении на неспецифический иммунитет цыплят-бройлеров // Птицеводство. 2021. № 7-8. С. 34-37. [Manukyan VA, Kharitonova DI, Baykovskaya EYu. The effects of an acidifier with essential oil of lemongrass on non-specific immunity, intestinal microbiota, and productive performance in broilers. *Pticevodstvo*. 2021;7-8:34-37. (In Russ.).] doi: 10.33845/0033-3239-2021-70-7-8-34-37
4. Оценка безопасности новых кормовых добавок "ЛауриТан", "БутиТан" на основе α-моноглицеридов / И.В. Насонов, Н.В. Кныш, Н.В. Зинина, С.С. Койпиш, С.А. Лукьянчик, О.Л. Логвинов // Экология и животный мир. 2020. № 2. С. 61-65. [Nasonov IV, Knysh NV, Zinina NV, Koypish SS, Lukyanchik SA, Logvinov OL. Safety assessment of new forage additives "Lauritan", "Butitan" based on α-monoglycerides. *Ecology and Animal World*. 2020;2:61-65. (In Russ.).]
5. Петруша Ю.К., Лебедев С.В., Гречкина В.В. Фитобиотики в кормлении сельскохозяйственной птицы (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 1. С. 103-118. [Petrusha YK, Lebedev SV, Grechkina VV. Phytobiotics in poultry feeding (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(1):103-118. (In Russ.).] doi: 10.33284/2658-3135-105-1-103
6. Фитобиотики как альтернатива антибиотикам в животноводстве (обзор) / В.А. Рязанов, М.Я. Курилкина, Г.К. Дускаев, В.М. Габидулин // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 4. С. 108-123. [Ryazanov VA, Kurilkina MYa, Duskaev GK, Gabidulin VM. Phytobiotics as an alternative to antibiotics in animal husbandry (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(4):108-123. (In Russ.).] doi: 10.33284/2658-3135-104-4-108
7. Фитобиотик Интебио® на защите иммунитета птицы / Г.Ю. Лаптев, Л.А. Ильина, Е.А. Йылдырым, В.А. Филиппова, А.В. Дубровин, О.Б. Новикова, И.И. Кочиш // Птицеводство. 2019. № 7-8. С. 25-30. [Laptev GYu, Ilyina LA, Yildirim EA, Filippova VA, Dubrovin AV, Novikova OB, Kochish II. Phytobiotic Intebio® protects the immunity. *Pticevodstvo*. 2019;7-8:25-30. (In Russ.).] doi: 10.33845/0033-3239-2019-68-78-25-30
8. Abou-Jaoudeh C, Khalil J, El-Hayek E, Abou-Khalil R. Food safety control in poultry industry: prevalence and antimicrobial susceptibility of *Escherichia coli* isolated from raw chicken and the potential use of *Origanum* essential oils as alternative to antibiotics. *Br Poult Sci*. 2024;65(4):494-501. doi: 10.1080/00071668.2024.2346307
9. Al-Hijazeen MA, Al-Rawashdeh MS, Al-Rabadi GJ. Cooked broiler meat quality affected by different Mediterranean medicinal plants in the diet. *Anim Biosci*. 2022;35(2):290-298. doi: 10.5713/ab.21.0264
10. Alimohammadi Z, Shirzadi H, Taherpour K, Rahmatnejad E, Khatibjoo A. Effects of cinnamon, rosemary and oregano on growth performance, blood biochemistry, liver enzyme activities, excreta microbiota and ileal morphology of *Campylobacter jejuni*-challenged broiler chickens. *Vet Med Sci*. 2024;10(6):e70034. doi: 10.1002/vms3.70034

11. Amer SA, Tolba SA, AlSadek DMM, Abdel Fattah DM, Hassan AM, Metwally AE. Effect of supplemental glycerol monolaurate and oregano essential oil blend on the growth performance, intestinal morphology, and amino acid digestibility of broiler chickens. BMC Vet Res. 2021;17(1):312. doi: 10.1186/s12917-021-03022-5
12. Elbaz AM, El-Sonousy NK, Arafa AS, Sallam MG, Ateya A, Abdelhady AY. Oregano essential oil and Bacillus subtilis role in enhancing broiler's growth, stress indicators, intestinal integrity, and gene expression under high stocking density. Sci Rep. 2024;14(1):25411. doi: 10.1038/s41598-024-75533-8
13. Jahja EJ, Yuliana R, Simanjuntak WT, Fitriya N, Rahmawati A, Yulinah E. Potency of Origanum vulgare and Andrographis paniculata extracts on growth performance in poultry. Vet Anim Sci. 2022;19:100274. doi: 10.1016/j.vas.2022.100274
14. Madkour M, Aboelenin MM, Habashy WS, Matter IA, Shourrap M, Hemida MA, Elolimy AA, Aboelazab O. Effects of oregano and/or rosemary extracts on growth performance, digestive enzyme activities, cecal bacteria, tight junction proteins, and antioxidants-related genes in heat-stressed broiler chickens. Poult Sci. 2024;103(9):103996. doi: 10.1016/j.psj.2024.103996
15. Meligy AMA, El-Hamid MIA, Yonis AE, Elhaddad GY, Abdel-Raheem SM, El-Ghareeb WR, Mohamed MHA, Ismail H, Ibrahim D. Liposomal encapsulated oregano, cinnamon, and clove oils enhanced the performance, bacterial metabolites antioxidant potential, and intestinal microbiota of broiler chickens. Poult Sci. 2023;102(6):102683. doi: 10.1016/j.psj.2023.102683
16. Valdez G, Shyur LF, Wang SY, Chen SE. Phytochemicals in Ginger, Origanum vulgare, and Syzygium aromaticum and Their Potential as a Feed Additive against Clostridium perfringens in Broiler Production. Animals (Basel). 2023;13(23):3643. doi: 10.3390/ani13233643

References

1. Duskaev GK, Levakhin GI, Dokina NN. Medicinal plants and their use in animal husbandry. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(3):204-214. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-204
2. Fisinin VI, Egorova TA, Egorov IA et al. Compound feed with different sources of protein and amino acids for meat chickens and roosters of the parent broiler herd. Poultry Farming. 2023;12:43-49. doi: 10.33845/0033-3239-2023-72-12-43-49
3. Manukyan VA, Kharitonova DI, Baykovskaya EYu. The effects of an acidifier with essential oil of lemongrass on non-specific immunity, intestinal microbiota, and productive performance in broilers. Poultry Farming. 2021;7-8:34-37. doi: 10.33845/0033-3239-2021-70-7-8-34-37
4. Nasonov IV, Knysh NV, Zinina NV, Koypish SS, Lukyanchik SA, Logvinov OL. Safety assessment of new forage additives "Lauritan", "Butitan" based on α -monoglycerides. Ecology and Animal World. 2020;2:61-65.
5. Petrusha YK, Lebedev SV, Grechkina VV. Phytobiotics in poultry feeding (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):103-118. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-103
6. Ryazanov VA, Kurilkina MYa, Duskaev GK, Gabidulin VM. Phytobiotics as an alternative to antibiotics in animal husbandry (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(4):108-123. doi: 10.33284/2658-3135-104-4-108
7. Laptev GYu, Ilyina LA, Yildirim EA, Filippova VA, Dubrovin AV, Novikova OB, Kochish II. Phytobiotic Intebio® protects the immunity. Poultry Farming. 2019;7-8:25-30. doi: 10.33845/0033-3239-2019-68-78-25-30
8. Abou-Jaoudeh C, Khalil J, El-Hayek E, Abou-Khalil R. Food safety control in poultry industry: prevalence and antimicrobial susceptibility of Escherichia coli isolated from raw chicken and the potential use of Origanum essential oils as alternative to antibiotics. Br Poult Sci. 2024;65(4):494-501. doi: 10.1080/00071668.2024.2346307
9. Al-Hijazeen MA, Al-Rawashdeh MS, Al-Rabadi GJ. Cooked broiler meat quality affected by different Mediterranean medicinal plants in the diet. Anim Biosci. 2022;35(2):290-298. doi: 10.5713/ab.21.0264

10. Alimohammadi Z, Shirzadi H, Taherpour K, Rahmatnejad E, Khatibjoo A. Effects of cinnamon, rosemary and oregano on growth performance, blood biochemistry, liver enzyme activities, excreta microbiota and ileal morphology of *Campylobacter jejuni*-challenged broiler chickens. *Vet Med Sci.* 2024;10(6):e70034. doi: 10.1002/vms3.70034
11. Amer SA, Tolba SA, AlSadek DMM, Abdel Fattah DM, Hassan AM, Metwally AE. Effect of supplemental glycerol monolaurate and oregano essential oil blend on the growth performance, intestinal morphology, and amino acid digestibility of broiler chickens. *BMC Vet Res.* 2021;17(1):312. doi: 10.1186/s12917-021-03022-5
12. Elbaz AM, El-Sonousy NK, Arafa AS, Sallam MG, Ateya A, Abdelhady AY. Oregano essential oil and *Bacillus subtilis* role in enhancing broiler's growth, stress indicators, intestinal integrity, and gene expression under high stocking density. *Sci Rep.* 2024;14(1):25411. doi: 10.1038/s41598-024-75533-8
13. Jahja EJ, Yuliana R, Simanjuntak WT, Fitriya N, Rahmawati A, Yulinah E. Potency of *Origanum vulgare* and *Andrographis paniculata* extracts on growth performance in poultry. *Vet Anim Sci.* 2022;19:100274. doi: 10.1016/j.vas.2022.100274
14. Madkour M, Aboelenin MM, Habashy WS, Matter IA, Shourrap M, Hemida MA, Elolimy AA, Aboelazab O. Effects of oregano and/or rosemary extracts on growth performance, digestive enzyme activities, cecal bacteria, tight junction proteins, and antioxidants-related genes in heat-stressed broiler chickens. *Poult Sci.* 2024;103(9):103996. doi: 10.1016/j.psj.2024.103996
15. Meligy AMA, El-Hamid MIA, Yonis AE, Elhaddad GY, Abdel-Raheem SM, El-Ghareeb WR, Mohamed MHA, Ismail H, Ibrahim D. Liposomal encapsulated oregano, cinnamon, and clove oils enhanced the performance, bacterial metabolites antioxidant potential, and intestinal microbiota of broiler chickens. *Poult Sci.* 2023;102(6):102683. doi: 10.1016/j.psj.2023.102683
16. Valdez G, Shyur LF, Wang SY, Chen SE. Phytochemicals in Ginger, *Origanum vulgare*, and *Syzygium aromaticum* and Their Potential as a Feed Additive against *Clostridium perfringens* in Broiler Production. *Animals (Basel).* 2023;13(23):3643. doi: 10.3390/ani13233643

Информация об авторе:

Юрий Константинович Петруша, младший научный сотрудник лаборатории прецизионных технологий в сельском хозяйстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, Россия, Оренбургская область, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел. 89058877200.

Information about the author:

Yuri K Petrusha, Junior Researcher at the Laboratory of Precision Technologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, Orenburg region, Russia, 460000. tel. 89058877200.

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 26.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 26.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 227-241.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 227-241.

Научная статья
УДК 636.085:636.92
doi:10.33284/2658-3135-107-4-227

**Разработка полнорационного комбикорма с заданными свойствами
для зайцеобразных на основе апипродукции и его апробация**

**Марина Александровна Сенченко¹, Екатерина Андреевна Горнич², Ирина Сергеевна Ткачева³,
Михаил Константинович Чугреев⁴, Людмила Эдуардовна Мельникова⁵**

^{1,2,4,5} Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

³Федеральный научно-исследовательский центр развития охотничьего хозяйства, Москва, Россия

¹senchenko@yarcx.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1659-3037>

²gornich@yarcx.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3992-7386>

³oxotkontr-tis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7988-7112>

⁴chugreev_mk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5876-8715>

⁵l.melnikova@yarcx.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7600-8633>

Аннотация. Современная ситуация, сложившаяся в российской экономике и международной политике, весьма непростая, остро стоит проблема импортозамещения. Поэтому цель нашего исследования: создание функционального полнорационного комбикорма для зайцеобразных на основе местного низкобюджетного экологически безопасного природного сырья, биологически активных ингредиентов, разработка способа его изготовления и применения, проведение апробации и изучение влияния на биологические и хозяйственно полезные показатели кроликов. В статье представлены результаты исследований, проведенных на кроликах породы советская шиншилла. Изучен химический состав, питательность традиционного и функционального комбикормов, проведен сравнительный анализ. Установлено влияние использования функционального комбикорма на массу некоторых внутренних органов кроликов; на основные экстерьерные показатели; на зоотехнические показатели; на качество крольчатины.

Ключевые слова: кролики, кормление, функциональный комбикорм, лактулоза, прополис, селен, кора ивы и осины

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2023-2025 гг. ФГБОУ ВО «Ярославский ГАУ» (№ 123081600042-1).

Для цитирования: Разработка полнорационного комбикорма с заданными свойствами для зайцеобразных на основе апипродукции и его апробация / М.А. Сенченко, Е.А. Горнич, И.С. Ткачева, М.К. Чугреев, Л.Э. Мельникова // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 227-241. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-227>

Original article

**Development and approbation of a full-ration anicultural products based concentrated
feed for the lagomorphs**

**Marina A Senchenko¹, Ekaterina A Gornich², Irina S Tkacheva³, Mikhail K Chugreev⁴,
Lyudmila E Melnikova⁵**

^{1,2,4,5} Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

³Federal Research Center for the Development of Hunting Economy, Moscow, Russia

¹senchenko@yarcx.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1659-3037>

²gornich@yarcx.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3992-7386>

³oxotkontr-tis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7988-7112>

⁴chugreev_mk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5876-8715>

⁵l.melnikova@yarcx.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7600-8633>

Abstract. The current situation in the Russian economy and international politics is very difficult, the problem of import substitution is acute. Therefore, the purposes of our research are to develop a func-

tional full-ration concentrated feed for the lagomorphs based on the local low-budget environmentally friendly natural raw materials as well as biologically active ingredients, to elaborate a method of its manufacture and use, to test and to study its impact on biological and economically positive indicators of rabbits. The article presents the results of studies conducted on the rabbits of the Soviet chinchilla breed. Chemical composition and nutritional value of a traditional and a functional concentrated feed has been studied, a comparative analysis has been done. The effect of a functional concentrated feed use on the weight of some internal organs of rabbits as well as on the main exterior indicators, zootechnical indicators, and the quality of rabbit meat has been defined.

Keywords: rabbits, feeding, functional compound feed, lactulose, propolis, selenium, willow and aspen bark

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2023-2025 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Yaroslavl State Agrarian University» (No. 123081600042-1).

For citation: Senchenko MA, Gornich EA, Tkacheva IS, Chugreev NK, Melnikova LE. Development and approbation of a full-ration apicultural products based concentrated feed for the lagomorphs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):227-241. (in Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-227>

Введение.

Современная ситуация, сложившаяся в российской экономике и международной политике, весьма непростая, остро стоит проблема импортозамещения. Агропромышленный комплекс не является исключением. Тем не менее существуют реальные резервы для повышения эффективности сельскохозяйственного производства. При этом в ряде случаев можно обходиться без значительных финансовых инвестиций, а за счёт использования биологических особенностей самих животных. Для решения таких ключевых вопросов как, например, повышение продуктивности и сохранности молодняка, наряду с антибиотикотерапией и профилактическими мероприятиями, важным направлением служит применение функциональных кормов и различных стимуляторов. В природных системах человек, руководствуясь поставленными целями, планирует получение необходимого объёма и качества получаемой продукции (Дьяченко А.В., 2019). В современном кролиководстве широко разрабатываются альтернативные методы стимуляции роста и профилактики заболеваний, такие как применение в рационах пробиотков, пребиотиков, витаминов и фитобиотиков (Рязанов В.А. и др., 2021; Золотарева А.Г. и др., 2023).

Кормление – один из самых затратных аспектов в кролиководстве и дичеразведении. От него во многом зависит состояние организма животных и, соответственно, объёмы и качество конечной продукции (Квартников М.П. и Квартникова Е.Г., 2021). Поэтому для повышения эффективности кролиководства целесообразно использовать имеющиеся резервы – биологические особенности самих животных, при этом не привлекая кредиты и иные ёмкие инвестиции (Чугреев М.К. и др., 2023).

В последнее время повысилась осведомлённость общественности о потенциальных рисках для здоровья, вызванных чрезмерным использованием кормовых антибиотиков и синтетических фармацевтических препаратов (Попова Г.М. и др., 2023). Применение функциональных кормов с заданными свойствами позволит снизить использование антибиотиков в кролиководстве, нормализовать и стабилизировать состояние кишечной микрофлоры животных, следовательно, повысить иммунитет и обеспечить производство крольчатины высокого качества с улучшенными потребительскими свойствами (Шенцова Е.С. и др., 2019; Дерканосова А.А. и др., 2021). Актуальность темы исследований продиктована также сложной международной обстановкой, заставляющей отечественных производителей в кратчайшие сроки решить проблему импортозамещения (Курчаева Е. и др., 2020).

Следует отметить, что комбикорм с указанными свойствами востребован при выращивании диких зайцеобразных, в частности зайца-беляка и зайца-русака, в искусственных и полувольных условиях. В настоящее время численность этих видов сокращается практически линейно во многих регионах России. В нескольких регионах они занесены в Красную книгу (Завалеева С.М. и др., 2021).

Цель исследования.

Создание кормового средства для зайцеобразных на основе местного низкобюджетного экологически безопасного природного сырья, биологически активных ингредиентов, разработка способа его изготовления и применения, проведение апробации и изучение влияния на биологические и хозяйственно полезные показатели кроликов.

Задачи: 1) создать функциональное кормовое средство для зайцеобразных с заявленными действиями. Произвести выработку опытного образца (партии), выполнить его экспертизу и сравнительный анализ традиционного и разработанного комбикормов по химическому составу и по питательности; 2) установить влияние использования функционального комбикорма на массу некоторых внутренних органов кроликов; 3) установить влияние использования функционального комбикорма на основные экстерьерные показатели: на прямую длину тела и на обхват груди кроликов; 4) изучить влияние использования предложенного корма на некоторые зоотехнические показатели; 5) изучить влияние использования функционального комбикорма в кормлении кроликов на качество крольчатины.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Кролики породы советская шиншилла.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Для проведения эксперимента были сформированы методом пар-аналогов контрольная и опытная группы кроликов в возрасте 30 дней породы советская шиншилла по 17 голов самцов в каждой. Эксперимент начался при достижении кроликами возраста 45 дней и продолжался 75 суток до наступления возраста 120 дней. Тип кормления – сухой с использованием разработанного полнорационного функционального комбикорма «ЯрГАУ-004-КР» (ЯрГАУ, г. Ярославль, Россия) – в опытной группе и традиционного комбикорма ПК-92 – в контрольной группе.

Во время эксперимента содержание и кормление обеих групп животных были аналогичными. Крольчата потребляли от 50 до 150 г комбикорма на голову в сутки за период роста от 45- до 120-дневного возраста. Давать комбикорм «ЯрГАУ-004-КР» опытной группе начали с 45-дневного возраста. Кроликов кормили 2 раза в сутки. При этом содержание кроликов – в отдельных клетках. Вода давалась вволю. Вакцинация проводилась в возрасте 45 дней бивалентной вакциной против миксоматоза и вирусной геморрагической болезни кроликов. Взвешивали кроликов на весах МИДЛ 6001 каждые 5 дней.

Изучаемые показатели: живая масса, масса сердца, масса печени, масса селезенки, масса почек, масса кишечника, массу туши, убойный выход, коэффициент мясности, прямую длину туловища, обхват груди за лопатками, индекс сбитости, кислотность *pH* мяса, влагосвязывающую способность (ВСС) мяса. Органолептическая оценка крольчатины.

Исследования послеубойных свойств мяса проводили по общепринятым методикам. При определении водосвязывающей способности мяса (ВСС) использовали пресс-метод Грау-Гамма в модификации ВНИИМП (по содержанию связанной воды). Кислотность мяса определяли сразу после убоя (через 40 мин), через 8 часов и через сутки хранения в холодильнике при температуре +4 °C.

Оборудование и технические средства. Работа выполнялась на кафедре «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции» Ярославского государственного аграрного университета в 2023-2024 гг. Анализ химического состава и питательности образцов комбикормов выполнен в лаборатории Ярославского НИИЖК – филиала ФНЦ «ВИК им. В.Р. Ви-

льямса». Живую массу определяли методом индивидуального взвешивания на весах NewClassic ML6001 («МЕТТЛЕР ТОЛЕДО», Швейцария) с точностью до 0,1 г.

Статистическая обработка. С помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel 2010» («Microsoft», США). Достоверность разности определяли по t-критерию Стьюдента. Выбран обычный уровень значимости ($P \leq 0,05$). Достоверность разности определяли по экстерьерным показателям (длина туловища, обхват груди, индекс сбитости) и массе внутренних органов кроликов.

Результаты исследований.

Предложен комбикорм с заявленными свойствами для кроликов и зайцев, разработана рецептура, технические условия и технологическая инструкция, проведена апробация «ЯрГАУ-004-КР» (ЯрГАУ, г. Ярославль, Россия).

В состав комбикорма входят биологически активные ингредиенты: пребиотик лактулоза (0,01-0,05 %); СО₂-экстракт пчелиного прополиса (0,1-0,5 %) и/или масляный экстракт пчелиного прополиса (2,0-5,0 %); микроэлемент селен в форме селенопирана (0,0000375-0,0000525 %); аминокислота глицин (0,0025-0,005 %); натуральное природное сырьё (20,0 %) – кора осины (*Populus tremula* L., 1753) и кора ивы козьей (*Salix caprea* L., 1753), взятые в равных количествах.

Изомер молочного сахара лактулоза обладает пребиотическим действием, нормализует баланс микрофлоры кишечника. В коре ивы и осины содержится салицин (*Salicin*), который в организме окисляется до салициловой кислоты. Салициловая кислота и салицилаты обладают противовоспалительным действием.

Состав комбикорма: в 1 кг готового комбикорма содержится 0,8 г лактулозы, 0,4 г янтарной кислоты, 0,04 г лизоцима, пшеницы – 10,0-15,0 %, ячменя – 15,0 %, овса – 10,0-15,0 %; кукурузы – 20,0 %; травяной муки – 20,0 %; осиновой и ивовой коры – 20,0 %.

С 60-дневного возраста давалось по 200 г корма на 1 кролика в сутки; с 90-дневного – по 280 г; с 120-дневного – по 200 г.

Изучен химический состав и питательность предложенного функционального комбикорма «ЯрГАУ-004-КР», выработанного в трёх вариантах по количественному содержанию натурального природного сырья (20 %; 30 %; 40 %), состоящего из коры осины и коры ивы, в сравнении со стандартным комбикормом.

В таблице 1 представлены некоторые основные показатели, взятые по абсолютно сухому веществу, кроме переваримого протеина, который определялся по натуральной влажности.

Данные таблицы 1 показывают, что кормовых единиц в образце стандартного комбикорма содержалось 1,31, т. е. больше, чем в каждом из трёх образцов функционального комбикорма «ЯрГАУ-004-КР». Содержание крахмала в образце стандартного комбикорма оказалось самым высоким – 31,48 %, в образце I функционального комбикорма – 27,84 %, образце II – 15,48 %, в образце III – 14,99 %. Содержание сырого протеина в образце стандартного комбикорма оказалось самым высоким – 14,19 %, в образце I функционального комбикорма – 12,33 %, образце II – 13,35 %, в образце III – 12,28 %. Содержание сырой клетчатки в образце стандартного комбикорма оказалось самым низким – 4,20 %, в образце I функционального комбикорма – 13,51 %, образце II – 15,86 %, в образце III – 15,01 %. Содержание обменной энергии в образце стандартного комбикорма оказалось самым высоким – 12,70 МДж, в образце I функционального комбикорма – 12,08 МДж, образце II – 11,95 МДж, в образце III – 12,08 МДж. Содержание переваримого протеина в образце стандартного комбикорма оказалось самым высоким – 86,42 г/кг, в образце I функционального комбикорма – 72,06 г/кг, образце II – 80,56 г/кг, в образце III – 71,66 г/кг. Содержание золы в образце стандартного комбикорма оказалось самым низким – 3,95 %, в образце I функционального комбикорма – 5,09 %, образце II – 5,58 %, в образце III – 5,06 %.

Таким образом, выявленная незначительная разница в содержании основных компонентов во всех трёх образцах функционального комбикорма позволяет предположить, что все они могут быть вполне применимы в кормлении, и нам представляется целесообразным продолжить исследования по изучению ответных реакций организма кроликов на его использование.

Таблица 1. Химический состав функционального и стандартного комбикормов
 Table 1. Chemical composition of functional and standard compound feeds

Показатели / Indicators	Контрольный вариант (стандартный комбикорм) / Control variant (standard compound feed)	I вариант функционального комбикорма (содержание коры 20 %) / Variant I of functional compound feed (bark content 20%)	II вариант функционального комбикорма (содержание коры 30 %) / Variant II of functional compound feed (bark content 30%)	III вариант функционального комбикорма (содержание коры 40 %) / Variant III of functional compound feed (bark content 40%)
Кормовые ед., кг / Feed units, kg	1,31	1,18	1,16	1,18
Крахмал, % / Starch, %	31,48	27,84	15,48	14,99
Сырой протеин, % / Crude protein, %	14,19	12,33	13,35	12,28
Сырая клетчатка, % / Crude fiber, %	4,20	13,51	15,86	15,01
Обменная энергия, МДж / Metabolizable energy, MJ	12,70	12,08	11,95	12,08
*Переваримый протеин, г/кг / Digestible protein, g/kg	86,42	72,06	80,56	71,66
Содержание золы, % / Ash content, %	3,95	5,09	5,58	5,06

Примечание: * – содержание переваримого протеина определялось по натуральной влажности
 Note: * – digestible protein content was evaluated by the natural moisture content

В ходе исследований изучено влияние комбикорма «ЯрГАУ-004-КР» (с включением 20 % коры осины и коры ивы) на массу сердца, печени, селезёнки, почек и тонкого кишечника кроликов (табл. 2).

Таблица 2. Масса внутренних органов кроликов, (n=17)
 Table 2. Weight of internal organs of rabbits, (n=17)

Масса внутренних органов, г / Weight of internal organs, g	Контрольная группа / Control group		Опытная группа / Experimental group		
	M±m	Cv, %	M±m	Cv, %	По отношению к контролю, % / Relative to control, %
Сердце / Heart	8,97±0,35	13,07	9,52±0,23 *	8,64	+6,1
Печень / Liver	118,6±3,14 (индекс 3,62 % / index of 3.62 %)	8,95	126,1±2,78 * (индекс 3,45 % / index of 3.45 %)	3,42	-5,2
Селезёнка / Spleen	1,23±0,11	5,51	1,56±0,08 *	3,27	+26,8
Почка / Kidney	19,8±0,82	5,38	20,5±0,96	3,19	+3,3
Тонкий кишечник с химусом / Small intestine with chime	223,5±13,04	18,46	212,6±11,07	11,62	-4,9

Примечание: разность достоверна по отношению к контролю: * – P≤0,05
 Note: the difference is significant in relation to the control: * – P≤0.05

Из данных таблицы 2 видно: масса сердца кроликов в опытной группе – 9,52 г, что на 6,1 % больше, чем в контроле (8,97 г); масса печени в опытной группе – 126,1 г, что на 5,2 % меньше, чем в контроле (118,6 г). У животных опытной группы, получавших функциональный комбикорм, обладающий, кроме прочих свойств, ещё антиоксидантным и седативным, снижающими уровень стресса и его негативных последствий, масса селезёнки оказалась выше на 26,8 % и составила 1,56 г. На этот факт следует обратить особое внимание, ввиду того, что он позволяет предположить наличие опосредованного воздействия ингредиентов комбикорма, повышающего адаптационные возможности организма к стрессу.

Масса почки кроликов опытной группы – 20,5 г, что на 3,3 % больше чем в контроле (19,8 г); масса кишечника с химусом в опытной группе – 212,6 г, что на 4,9 % меньше чем в контроле (223,5 г).

Влияние комбикорма на прямую длину тела и на обхват груди показано в таблице 3.

Таблица 3. Экстерьерные показатели кроликов, (n=17)

Table 3. Exterior indicators of rabbits, (n=17)

Показатели / Indicators	Контрольная группа / Control group		Опытная группа / Experimental group		
	$M \pm m$	$C_v, \%$	$M \pm m$	$C_v, \%$	По отношению к контролю / Relative to control, %
Длина туловища, см / Torso length, cm	63,5 $\pm$ 2,54	5,3	66,4 $\pm$ 3,11*	4,1	+2,9 (4,6 %)
Обхват груди, см / Chest girth, cm	40,7 $\pm$ 2,18	7,5	43,1 $\pm$ 2,76*	5,6	+2,4 (5,9 %)
Индекс сбитости, % / Index of compactness, %	64,1		64,9		+0,8

Примечание: разность достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$

Note: the difference is significant in relation to the control: * – $P \leq 0.05$

Данные таблицы 3 показывают, что прямая длина туловища животных опытной группы – 66,4 см, что на 4,6 % больше чем в контроле (63,5 см); обхват груди за лопатками в опытной группе – 43,1 см, что на 5,9 % больше, чем в контроле (40,7 см). Индекс сбитости в опытной группе составил 64,9 %, в контроле – 64,1 %.

Кролики опытной группы оказались более выровнены по экстерьеру: коэффициент вариации показателя длины туловища в опытной группе составил 4,1 %, обхвата груди – 5,6 % в контроле – 5,3 % и 7,5 %.

В ходе исследований изучено влияние использования функционального комбикорма на некоторые зоотехнические показатели кроликов (табл. 4). На начало эксперимента живая масса кроликов в контрольной группе составляла 1048,6 г, а в опытной группы – в среднем 1060,4 г, то есть животные были выровнены по этому показателю.

Данные таблицы 4 показывают, что живая масса кроликов опытной группы в конце эксперимента составила 3655,4 г, что на 11,6 % больше, чем в контроле (3275,4 г).

Абсолютный прирост живой массы у кроликов опытной группы – 2606,8 г, что на 17,7 % больше, чем в контроле (2215,0 г); среднесуточный прирост в опытной группе – 29,5 г, что на 18,0 % больше, чем в контроле; соответственно и масса туши в опытной группе превышала такую на 16,4 % и составила 2204,2 г, а в контроле – 1893,2 г.

Table 4. Growth rate of rabbits and slaughter meat yield, (n=17)

Примечание: разность достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$
 Note: the difference is significant in relation to the control: * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$

В рамках данного направления исследований особый интерес представляет показатель убойного выхода мяса. В опытной группе он составил 58,7 %, что на 1,9 % больше, чем в контроле (56,8 %). Коэффициент мясности в опытной группе оказался 6,0, в контроле – 5,8.

Table 5. Dynamics of live weight of young rabbits, kg

Примечание: разность достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$
 Note: the difference is significant in relation to the control: * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$

Данные таблицы 5 показывают, что среднесуточный привес в период от 30- до 45-дневного возраста составлял 30,8 г по контрольной группе и 30,5 г – по опытной группе; в период от 45 до 60 дней соответственно – 30,8 г и 39,5 г; в период от 60 до 90 дней соответственно – 36,3 г и 40,3 г; в период от 90 до 120 дней соответственно – 22,1 г и 26,8 г.

Известно, что кролики породы советская шиншилла проявляют весьма интенсивный темп роста в первые два месяца жизни, но потом он замедляется и выравнивается. Анализ таблицы 5 показывает, что в среднем живая масса кроликов в возрасте 1 месяц составляла в опытной группе 591,6 г а в контрольной группе – 598,3 г; в возрасте 45 дней в опытной группе – 591,6 г, а в контрольной группе – 598,3 г. До полуторамесячного возраста животные обеих групп содержались в аналогичных условиях и получали одинаковый корм, разница в живой массе между группами не просматривалась. В возрасте 45 дней всех кроликов вакцинировали, животным опытной группы начали давать функциональный комбикорм «ЯрГАУ-004-КР». К двухмесячному возрасту живая масса кроликов опытной группы составляла 1641,0 г, что больше, чем в контроле на 7,8 %. Этот факт может говорить о том, что использование предложенного комбикорма позволяет животным легче перенести период после вакцинации, не снижая привесы.

К трёхмесячному возрасту среднее значение живой массы кроликов в опытной группе оказалась больше на 9,2 %, чем в контроле и составило 2851,4 г, к четырёхмесячному возрасту – больше на 11,6 % и составило 3655,4 г.

Коэффициент вариации среднего значения живой массы в ходе эксперимента в опытной группе был ниже, чем в контроле и на 120 сутки составлял 7,5 %, а в контроле – 12,8 %. Таким образом, можно предположить, что предложенный комбикорм стимулирует рост кроликов и делает их более однородными по живой массе.

Также в ходе настоящих исследований было изучено влияние использования функционального комбикорма на качество крольчатины.

Проведена органолептическая оценка крольчатины опытной и контрольной групп. В результате различий между группами не выявлено.

Оценивая крольчатину на предмет её пригодности переработке в первую очередь обращают внимание на показатель кислотности (*pH*), влагосвязывающую способность (ВСС) и микробиологическую стабильность. Мы их определяли у парной крольчатины и через разные промежутки времени при температуре +2...+4 °С и относительной влажности воздуха 75 % (табл. 6).

Таблица 6. Показатели качества мяса кроликов на разных сроках автолиза

Table 6. Indicators of rabbit meat quality at different stages of autolysis

Время измерения после убоя / <i>Time of measurement after slaughter</i>	Значение <i>pH</i> / <i>pH value</i>			Значение влагосвязывающей способности, % / <i>Water-binding capacity value, %</i>		
	Контрольная группа / <i>Control group</i>	Опытная группа / <i>Experimental group</i>	По отношению к контролю / <i>Relative to control</i>	Контрольная группа / <i>Control group</i>	Опытная группа / <i>Experimental group</i>	По отношению к контролю / <i>Relative to control</i>
Парное мясо (в начале автолиза) / <i>Fresh meat (at the beginning of autolysis)</i>	6,82	6,57	- 0,25	-	-	-
Через 8 часов / 8 hours later	5,47	5,38	- 0,09	-	-	-
Через 24 часа / 24 hours later	5,39	5,23	- 0,16	62,5	67,8	+5,3

Данные таблицы 6 показывают, что значение показателя *pH* парного мяса, то есть в начале автолиза, составляло в опытной группе 6,57, в контрольной группе – 6,82. Через 8 часов после убоя, когда наступило полное окоченение, оно снизилось в опытной группе до 5,38, в контрольной группе – до 5,47, а через 24 часа оно ещё немного снизилось в опытной группе – до 5,23, в контрольной группе – до 5,39 и стабилизировалось.

У мяса кроликов опытной группы значение показателя *pH* оказалось ниже, чем в контроле на всех трёх изученных стадиях: в начале автолиза – на 0,25, через 8 часов – на 0,09, через 24 часа – на 0,16. Это можно объяснить, вероятно, свойствами использованного комбикорма, обусловленными присутствием в его составе функциональных ингредиентов. Аминокислота глицин, являясь нейромедиатором тормозного типа, обладает седативным действием. Надо полагать, поступая в организм с кормом, она может нивелировать уровень стресса кроликов в процессе их выращивания. Пребиотик лактулоза имеет кислую реакцию и подкисляет содержимое кишечника, стимулируя перистальтику и развитие бифидофлоры. Такое её действие, вероятно, может оказывать влияние на понижение значения показателя *pH* в мясе как прямо, так и опосредованно через микрофлору.

Влагосвязывающая способность (ВСС) является одним из важных показателей качества любого мяса, который характеризует его внешний вид до варки, состояние при варке и сочность при употреблении в пищу. На этот показатель влияют количество и качество белка, содержащегося в мясе. Мясо нежнее и сочнее при повышенной влагосвязывающей способности. Лучшие технологические свойства характерны мясу с большей влагоёмкостью.

Влагосвязывающую способность (ВСС) крольчатины определяли через сутки после убоя, опытной группе её значение составило 67,8 %, в контроле – 62,5 %.

Влагоудерживающая способность парного мяса (после убоя) – очень высокая. Это объясняется относительно высоким показателем *pH* этого мяса. При понижении *pH*, приближающегося к изоэлектрической точке (после окончания стадии окоченения), снижается способность мяса к связыванию воды. Опираясь на полученные данные, рекомендуется использовать крольчатину, хранящуюся при температуре +2...+4 °С, для переработки не ранее 8-10 часов после убоя.

Обсуждение полученных результатов.

Изучен химический состав и питательность предложенного комбикорма, выработанного в трёх вариантах по количественному содержанию натурального природного сырья (20 %; 30 %; 40 %), состоящего из коры осины и коры ивы, в сравнении со стандартным комбикормом. Выявленная незначительная разница в содержании основных компонентов во всех трёх образцах функционального комбикорма позволяет предположить, что все они могут быть вполне успешно применимы в кормлении и нам представляется целесообразным продолжить исследования по изучению ответных реакций организма кроликов и других зайцеобразных на использование предложенного комбикорма с разным процентным содержанием натурального природного сырья.

Можно предположить, что выявленное существенное увеличение массы селезёнки у животных опытной группы говорит о вероятных её морфофункциональных изменениях, в частности об улучшении кроветворной и иммунной функций, опосредованно повышающих адаптационные возможности организма к стрессу. Увеличение массы селезёнки на 26,8 % в опытной группе кроликов, получавших функциональный комбикорм, обладающий пребиотическим, антиоксидантным, иммуностимулирующим и седативным свойствами, можно предположительно объяснить активизирующим воздействием интерлейкина на процесс кроветворения, на повышение иммунитета и стимуляцию обменных процессов организма.

Прямая длина туловища кроликов в опытной группе составила 66,4 см и оказалась на 4,6 % больше, чем в контрольной группе; обхват груди за лопатками составил 43,1 см и оказался больше на 5,9 %; индекс сбитости в опытной группе составил 64,9 %, контрольной группе – 64,1 %, в обеих группах его значение соответствует эйрисомному типу конституции.

Коэффициент вариации показателя прямой длины туловища у кроликов опытной группы составил 4,1 %, обхвата груди за лопатками – 5,6 %, в контроле – 5,3 % и 7,5 %. Это может говорить о том, что использование разработанного комбикорма делает кроликов более однородными по экстерьеру.

К концу эксперимента живая масса кроликов в опытной группе оказалась больше, чем в контроле на 11,6 % и составила 3655,4 г.

Масса туши в опытной группе составила 2204,2 г, что превысило значение этого показателя контрольной группы на 16,4 %. Абсолютный прирост живой массы за время эксперимента составил 2606,8 г, что превысило значение этого показателя контрольной группы на 17,7 %. Убойный выход крольчатины в опытной группе оказался 58,7 %, что превысило значение этого показателя контрольной группы на 1,9 %. Значение коэффициента мясности у животных опытной группы оказалось 6,0, а в контроле – 5,8.

При исследованиях в Волгоградской области, проводившихся в хозяйстве Мосоловой А.Н. на калифорнийских кроликах, было выявлено, что при использовании кормовых добавок "Хлорелакт" и «ЛактуВет-1» увеличиваются приросты живой массы (Золотарева А.Г. и др., 2023).

Установлено, что применение в системе кормления кроликов пробиотика «Субтилис-С» стимулирует их рост и развитие, повышает сохранность поголовья (Дерканосова А.А. и др., 2022). Результаты, полученные в ходе реализации математических моделей в ИАЭП - филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, показали, что имеются возможности для сокращения расхода кормов, увеличения прироста живой массы молодняка кроликов. Реализовать этот потенциал возможно за счёт использования биологических особенностей самих кроликов и применения современных методик и оборудования. Важно правильно выстроить технологический процесс (Соколов А.М. и др., 2023; Плаксин И.Е. и Трифанов А.В., 2019).

Среднесуточный привес в период от 30- до 45-дневного возраста составлял 30,8 г по контрольной группе и 30,5 г – по опытной группе; в период от 45 до 60 дней соответственно – 30,8 г и 39,5 г; в период от 60 до 90 дней соответственно – 36,3 г и 40,3 г; в период от 90 до 120 дней соответственно – 22,1 г и 26,8 г. Использование пробиотического комплекса «Субтилис-С» в составе комбикормов также повышает среднесуточные приросты (Дерканосова А.А. и др., 2022).

Коэффициент вариации среднего значения живой массы в ходе эксперимента в опытной группе был ниже, чем в контроле и на 120 суток составлял 7,5 %, а в контроле – 12,8 %. Таким образом, можно предположить, что предложенный комбикорм стимулирует рост кроликов и делает их более однородными по живой массе.

Были выполнены исследования, в которых использовался препарат «Нитамин». Кролики, получавшие препарат, быстрее росли и у них живая масса в конце эксперимента оказалась на 12,9 % больше, чем в контроле (Бачинская В.М. и др., 2023).

Органолептические показатели мяса кроликов опытной и контрольной групп соответствовали требованиям действующего стандарта. По данным С.П. Архипова с коллегами (2021), органолептические показатели крольчатины улучшились в связи с применением добавки «Янтовет», мясной бульон имел более выраженный вкус.

В ходе исследований изучены основные показатели, характеризующие пригодность мяса к промышленной переработке: кислотность (pH), влагосвязывающая способность (ВСС) у парной крольчатины и через разные промежутки времени при температуре +2...+4 °С и относительной влажности воздуха 75 %.

Мясо с высоким показателем pH более подвержено воздействию микроорганизмов. Такое мясное сырьё имеет меньше степеней свободы в технологическом плане при его использовании для приготовления разных продуктов.

У мяса кроликов опытной группы значение показателя pH оказалось ниже, чем в контрольной группе на всех трёх изученных стадиях: в начале автолиза – на 0,25, через 8 часов – на 0,09, через 24 часа – на 0,16. Это можно объяснить, вероятно, свойствами использованного комбикорма,

обусловленными присутствием в его составе функциональных ингредиентов. При исследованиях влияния аминоселетона на качество мяса кроликов pH мяса в контрольной группе составило $5,88 \pm 0,06$, а опытной – $5,89 \pm 0,09$ (Хохлова Н.А. и Востроилова Г.А., 2020).

Снижение значения показателя pH , то есть смещение его в кислую сторону, происходит в результате накопления в мясе молочной кислоты. Если при выращивании животное испытывало стресс, или он имел место перед забоем, то резервы гликогена оказываются израсходованными и из-за этого уменьшается образование молочной кислоты в мясе, что обуславливает высокое значение pH , а следовательно, слабый аромат мясного сырья и снижение срока хранения такого мяса в охлаждённом состоянии. Мясо с высоким показателем pH более подвержено воздействию микроорганизмов. Такое мясное сырьё имеет меньше степеней свободы в технологическом плане при его использовании для приготовления разных продуктов.

Влагосвязывающая способность (ВСС) крольчатины определялась через 24 часа после убоя, её значение составило в опытной группе 67,8 %, в контрольной группе 62,5 %. Мясо с большей влагоёмкостью характеризуется лучшими технологическими свойствами. Данные Черненко Е.Н. с коллегами (2015) говорят о том, что пробиотик «Биогумитель» повышает влагосвязывающую способность мяса кроликов.

Заключение.

Таким образом, в ходе настоящих исследований разработан полнорационный комбикорм для кроликов на основе пчелиного прополиса с использованием натурального природного сырья и некоторых биологически активных ингредиентов. Изготовлена опытная партия и проведена апробация в эксперименте.

Список источников

1. Бачинская В.М., Гончар Д.В., Райкова Л.Н. Влияние жидкой витаминной добавки на прирост живой массы и гематологические показатели кроликов // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2023. № 1(45). С. 107-113. [Bachinskaya VM, Gonchar DV, Raikova LN. Influence of the medicinal drinking additive on the increase in live weight and hematological parameters of rabbits. Russian Journal Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology. 2023;1(45):107-113. (In Russ.). doi: 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202301016]
2. Влияние средства «Янтовет» на органолептические показатели мяса кроликов / С.П. Архипова, Л.Ф. Якупова, О.А. Грачева, М.К. Гайнуллина // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2021. Т. 248, № 4. С. 11-14. [Arkhipova SP, Yakupova LF, Gracheva OA, Gainullina MK. Influence of the «Yantovet» meat on organoleptic indicators of rabbit meat. Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2021;248(4):11-14. (In Russ.). doi: 10.31588/2413-4201-1883-248-4-11-14]
3. Дьяченко А.В. Метатеоретические исследования императивов сохранения природного потенциала // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1(53). С. 1-7. [Dyachenko AV. Metatheoretical studies of the imperatives of preserving natural potential. Proceedings of lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. 2019;1(53):1-7. (In Russ.). doi:10.32786/2071-9485-2019-01-5]
4. Использование жома топинамбура и пробиотического препарата в составе полнорационных гранулированных комбикормов для кроликов / А.А. Дерканосова, Е.Е. Курчаева, А.В. Востроилов, Р.Н. Звягин, А.Н. Звягин, И.В. Максимов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83, № 1 (87). С. 169-178. [Derkanosova AA, Kurchaeva EE, Vostroilov AV, Zvyagin RN, Zvyagin AN, Maksimov IV. The use of artichoke pulp and probiotic preparation in the composition of complete granular feed for rabbits. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021;1(87):169-178. (In Russ.). doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-169-178]

5. Исследование эффективности белково-пребиотической кормовой добавки на рост и развитие кроликов / А.Г. Золотарева, И.Ф. Горлов, М.И. Сложенкина, А.А. Мосолов, О.А. Княжеченко // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 216-231. [Zolotareva AG, Gorlov IF, Slozhenkina MI, Mosolov AA, Knyazhechenko OA. A study of the effectiveness of protein-prebiotic feed additive on the growth and development of rabbits. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(4):216-231. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-216
6. Квартников М.П., Квартникова Е.Г. Переваримость питательных веществ полнорационного комбикорма крольчихами в первую четверть сукрольности // Ветеринария Кубани. 2021. № 5. С. 33-35. [Kvartnikov MP, Kvartnikova EG. Digestibility of nutrients of full-fledged compound feed by rabbits in the first quarter of pregnancy. Veterinaria Kubani. 2021;5:33-35. (In Russ.)]. doi: 10.33861/2071-8020-2021-5-33-35
7. Математические модели расхода кормов и прироста живой массы молодняка кроликов / А.М. Соколов, Д.А. Сошнев, А.В. Трифанов, И.Е. Плаксин, В.И. Базыкин // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 2(115). С. 123-140. [Sokolov AM, Soshnev DA, Trifanov AV, Plaksin IE, Bazykin VI. Mathematical models of feed consumption and live weight gain in young rabbits. AgroEcoEngineering. 2023;2(115):123-140. (In Russ.)]. doi: 10.24412/2713-2641-2023-2115-123-139
8. Плаксин И.Е., Трифанов А.В. Обоснование технико-экономических показателей технологического модуля для разведения и откорма кроликов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2(99). С. 317-326. [Plaksin IE, Trifanov AV. Justification of technical and economic performance of the technological module for rabbit growing and fattening. Tehnologii i tehicheskie sredstva mehanizirovanogo proizvodstva produkci rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2019;2(99):317-326. (In Russ.)]. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10178
9. Повышение физиологического статуса и качества мяса кроликов на фоне применения пробиотического комплекса «СПОРОТЕРМИН» в составе комбикормов / Е.С. Шенцова, А.В. Востроилов, Л.И. Лыткина, Е.Е. Курчаева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81. № 3. С. 57-63. [Shentsova ES, Vostroilov AV, Lytkina LI, Kurchaeva EE. Improving physiological status and meat quality of rabbits by the application of probiotic complex «Sporotermine» in compound feeds. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019;3(81):57-63. (In Russ.)]. doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-57-63
10. Попова Г.М., Нуржанов Б.С., Дускаев Г.К. О возможностях использования фитобиотических добавок в рационах сельскохозяйственных животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. № 106. № 2. С. 152-175. [Popova GM, Nurzhanov BS, Duskaev GK. About the possibilities of using phytobiotic additives in the diets of farm animals (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(2):152-175. (In Russ.)]. doi:10.33284/2658-3135-106-2-152
11. Рапсовый шрот и пробиотики в комбикормах для кроликов / Е. Курчаева, Т. Тертычная, А. Шевцов, Н. Сердюкова // Комбикорма. 2020. № 7-8. С. 40-41. [Kurchaeva E, Tertychnaya T, Shevtsov A, Serdyukova N. Rapsovyj shrot i probiotiki v kombikormah dlja krolikov. Compound Feed. 2020;7-8:40-41. (In Russ.)]. doi: 10.25741/2413-287X-2020-07-3-108
12. Структурные особенности поджелудочной железы зайца-русака и зайца-беляка / С.М. Завалеева, Е.Н. Чиркова, Н.Н. Садыкова, А.В. Чалкина // Аграрный вестник Верхневолжья. 2021. № 1(34). С. 36-38. [Savaliyeva SM, Chirkova EN, Sadykova NN, Chalkina AV. Structural features of brown hare and white hare pancreas. Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region. 2021;1(34):36-38. (In Russ.)]. doi: 10.35523/2307-5872-2021-34-1-36-38
13. Фитобиотики как альтернатива антибиотикам в животноводстве / В.А. Рязанов, М.Я. Курилкина, Г.К. Дускаев, В.М. Габидулин // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 4. С. 108-123. [Ryazanov VA, Kurilkina MYa, Duskaev GK, Gabidulin VM. Phytobiotics as an alternative to antibiotics in animal husbandry. Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(4):108-123. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-104-4-108

14. Хохлова Н.А., Востроилова Г.А. Экспериментальная оценка влияния тканевого препарата аминоселетон на качество мяса кроликов // Ветеринарный фармакологический вестник. 2020. № 4(13). С. 51-60. [Khokhlova NA, Vostroilova GA. Experimental assessment of the effect of the tissue drug aminoseleton on the rabbit meat quality. Bulletin of Veterinary Pharmacology. 2020;4(13):51-60. (*In Russ.*)]. doi: 10.17238/issn2541-8203.2020.4.51
15. Черненко Е.Н., Миронова И.В. Качество мяса кроликов при скормливании пробиотика «Биогумитель» // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 10(132). С. 104-108. [Chernenkov YeN, Mironova IV. Rabbit meat quality when feeding Biogumitel probiotic. Bulletin of Altai State Agrarian University. 2015;10(132):104-108. (*In Russ.*)].
16. Чугреев М.К., Сенченко М.А., Мельникова Л.Э., Михайлова Ю.А. Функциональный комбикорм для кроликов с бифидогенными, антиоксидантными и иммуностимулирующими действиями: состав, технология приготовления, апробация // Вестник АПК Верхневолжья. 2023. № 4(64). С. 52-63. [Chugreev MK, Senchenko MA, Melnikova LE, Mikhailova YuA. Functional mixed feed for rabbits with bifidogenic, antioxidant and immunostimulating effects: composition, preparation technology, testing. Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2023;4 (64):52-63. (*In Russ.*)]. doi: 10.35694/YARCX.2023.64.4.007
17. Эффективность использования пробиотического комплекса «Субтилис-С» в отрасли промышленного кролиководства / А.А. Дерканосова, Е.Е. Курчаева, Л.И. Лыткина и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84, № 4(94). С. 46-52. [Derkanosova AA, Kurchaeva EE, Lytkina LI, et al. The effectiveness of the use of the probiotic complex subtilis-c in the field of industrial rabbit breeding. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022;4(94):46-52. (*In Russ.*)]. doi: 10.20914/2310-1202-2022-4-46-52

References

1. Bachinskaya VM, Gonchar DV, Raikova LN. Influence of the medicinal drinking additive on the increase in live weight and hematological parameters of rabbits. Russian Journal Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology. 2023;1(45):107-113. doi: 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202301016
2. Arkhipova SP, Yakupova LF, Gracheva OA, Gainullina MK. Influence of the «Yantovet» meat on organoleptic indicators of rabbit meat. Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2021;248(4):11-14. doi: 10.31588/2413-4201-1883-248-4-11-14
3. Dyachenko AV. Metatheoretical studies of the imperatives of preserving natural potential. Proceedings of lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. 2019;1(53):1-7. doi:10.32786/2071-9485-2019-01-5
4. Derkanosova AA, Kurchaeva EE, Vostroilov AV, Zvyagin RN, Zvyagin AN, Maksimov IV. The use of artichoke pulp and probiotic preparation in the composition of complete granular feed for rabbits. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021;1(87):169-178. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-169-178
5. Zolotareva AG, Gorlov IF, Slozhenkina MI, Mosolov AA, Knyazhechenko OA. A study of the effectiveness of protein-prebiotic feed additive on the growth and development of rabbits. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(4):216-231. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-216
6. Kvartnikov MP, Kvartnikova EG. Digestibility of nutrients of full-fledged compound feed by rabbits in the first quarter of pregnancy. Veterinary science of Kuban. 2021;5:33-35. doi: 10.33861/2071-8020-2021-5-33-35
7. Sokolov AM, Soshnev DA, Trifanov AV, Plaksin IE, Bazykin VI. Mathematical models of feed consumption and live weight gain in young rabbits. AgroEcoEngineering. 2023;2(115):123-140. doi: 10.24412/2713-2641-2023-2115-123-139
8. Plaksin IE, Trifanov AV. Justification of technical and economic performance of the technological module for rabbit growing and fattening. Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2019;2(99):317-326. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10178

9. Shentsova ES, Vostroilov AV, Lytkina LI, Kurchaeva EE. Improving physiological status and meat quality of rabbits by the application of probiotic complex «Sporoterm» in compound feeds. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019;3(81):57-63. doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-57-63
10. Popova GM, Nurzhanov BS, Duskaev GK. About the possibilities of using phytobiotic additives in the diets of farm animals (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(2):152-175. doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-152
11. Kurchaeva E, Tertychnaya T, Shevtsov A, Serdyukova N. Rapeseed meal and probiotics in compound feeds for rabbits. Compound Feed. 2020;7-8:40-41. doi: 10.25741/2413-287X-2020-07-3-108
12. Savalieva SM, Chirkova EN, Sadykova NN, Chalkina AV. Structural features of brown hare and white hare pancreas. Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region. 2021;1(34):36-38. doi: 10.35523/2307-5872-2021-34-1-36-38
13. Ryazanov VA, Kurilkina MYa, Duskaev GK, Gabidulin VM. Phytobiotics as an alternative to antibiotics in animal husbandry. Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(4):108-123. doi: 10.33284/2658-3135-104-4-108
14. Khokhlova NA, Vostroilova GA. Experimental assessment of the effect of the tissue drug aminoseleton on the rabbit meat quality. Bulletin of Veterinary Pharmacology. 2020;4(13):51-60. doi: 10.17238/issn2541-8203.2020.4.51
15. Chernenkov YeN, Mironova IV. Rabbit meat quality when feeding Biogumitel probiotic. Bulletin of Altai State Agrarian University. 2015;10(132):104-108.
16. Chugreev MK, Senchenko MA, Melnikova LE, Mikhailova YuA. Functional mixed feed for rabbits with bifidogenic, antioxidant and immunostimulating effects: composition, preparation technology, testing. Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2023;4 (64):52-63. doi: 10.35694/YARCX.2023.64.4.007
17. Derkanosova AA, Kurchaeva EE, Lytkina LI, et al. The effectiveness of the use of the probiotic complex subtilis-c in the field of industrial rabbit breeding. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022;4(94):46-52. doi: 10.20914/2310-1202-2022-4-46-52

Информация об авторах:

Марина Александровна Сенченко, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Ярославский государственный аграрный университет, 150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58, сот.: 8-910-975-19-28.

Екатерина Андреевна Горнич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Ярославский государственный аграрный университет, 150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58, сот.: 8-920-118-71-57.

Ирина Сергеевна Ткачева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научно-исследовательский центр развития охотничьего хозяйства, 105118, г. Москва, улица Вольная, 13, сот.: 8-964-764-48-36

Михаил Константинович Чугреев, доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Ярославский государственный аграрный университет, 150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58, сот.: 8-903-511-53-83.

Людмила Эдуардовна Мельникова, доцент кафедры «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Ярославский государственный аграрный университет, 150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58, сот.: 8-905-639-67-21.

Information about the authors:

Marina A Senchenko, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Tutaevskoe highway, 58, 150042, tel.: 8-910-975-19-28.

Ekaterina A Gornich, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Tutaevskoe highway, 58, 150042, tel.: 8-920-118-71-57.

Irina S Tkacheva, Cand. Sci (Biology), Leading Researcher, Federal Research Center for the Development of Hunting, Moscow, Volnaya Street, 13, 105118, tel.: 8-964-764-48-36

Mikhail K Chugreev, Dr. Sci (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Tutaevskoe highway, 58, 150042, tel.: 8-903-511-53-83.

Lyudmila E Melnikova, Associate Professor of the Department of Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Tutaevskoe highway, 58, 150042, tel.: 8-905-639-67-21.

Статья поступила в редакцию 12.10.2024; одобрена после рецензирования 30.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 12.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 242-254.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 242-254.

ФИЗИОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ

Научная статья
УДК 636.223.1
doi:10.33284/2658-3135-107-4-242

Кишечный микробиом и функциональный прогноз метаболических путей, связанных с накоплением жировой и мышечной ткани у мясного скота

Виталий Александрович Рязанов¹, Владимир Иванович Колпаков²,
Екатерина Ивановна Тарасова³, Алексей Николаевич Ручай⁴

^{1,2,3,4}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹vita7456@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0903-9561>

²vkolpakov056@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9658-7034>

³ekaterina45828@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6325-7389>

⁴ran@csu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5996-669X>

Аннотация. Снижение экономических потерь, улучшенное использование кормов, сохранение здоровья и повышение качества готовой продукции в животноводческой отрасли – основные задачи, которые необходимо решить. Учёные всего мира уже предлагают использовать животных по их генетическому отбору, характеризующему качественные фенотипические признаки. Применяются способы измерения внешних данных и мясных качеств крупного рогатого скота с использованием передовых систем распознавания тел живых животных, включающих камеры глубины и мягкой реконструкции трехмерной формы. Тем не менее одним из критериев оценки животных может быть анализ генетического банка микроорганизмов, тесно связанного с функциональной активностью пищеварительной системы животного. Комплексная оценка экспрессии генов, таксономической структуры микробиома, экстерьерных характеристик и мясной продуктивности в совокупности будет давать более точные прогнозы по использованию, отбору животных. В нашем исследовании приводятся результаты метагеномного секвенирования (NGS) кишечного содержимого молодняка (n=40), выращиваемого на откормочной площадке, и проводится аннотация связи микробиома с его живым весом и степенью мраморности, предсказываются метаболические пути, с которыми были связаны эти гены. В ходе анализа (LEfSe) установлено таксономическое отличие в кишечном содержимом у животных, имеющих высокую и низкую живую массу, рода *Clostridium sensu stricto*, *Clostridium* XIVa, *Treponema*, преобладали у животных, имеющих более низкую живую массу.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, телки, абердин-ангусская порода, живая масса, мраморность, микробиом кишечника, функциональный прогноз, метаболические пути

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0003).

Для цитирования: Кишечный микробиом и функциональный прогноз метаболических путей, связанных с накоплением жировой и мышечной ткани у мясного скота / В.А. Рязанов, В.И. Колпаков, Е.И. Тарасова, А.Н. Ручай // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 242-254. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-242>

PHYSIOLOGY OF ANIMALS

Original article

Gut microbiome and functional prediction of metabolic pathways associated with fat and muscle tissue accumulation in beef cattle**Vitaly A Ryazanov¹, Vladimir I Kolpakov², Ekaterina I Tarasova³, Alexey N Ruchay⁴**^{1,2,3,4} Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia¹vita7456@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0903-9561>²vkolpakov056@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9658-7034>³ekaterina45828@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6325-7389>⁴ran@csu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5996-669X>

Abstract. Reducing economic losses, improving feed utilization, maintaining health and improving the quality of finished products in the livestock industry are the main tasks that need to be solved. Scientists around the world are already proposing to use animals based on their genetic selection, which characterizes high-quality phenotypic traits. Methods are used to measure the external data and meat qualities of cattle using advanced systems for recognizing live animal bodies, including depth cameras and soft reconstruction of three-dimensional shape. However, one of the criteria for assessing animals can be the analysis of the genetic bank of microorganisms, closely related to the functional activity of the animal's digestive system. A comprehensive assessment of gene expression, taxonomic structure of the microbiome, exterior characteristics and meat productivity in combination will provide more accurate forecasts for the use and selection of animals. Our study presents the results of metagenomic sequencing (NGS) of the intestinal contents of young animals (n=40) raised in a feedlot, and annotates the association of the microbiome with their live weight and marbling degree, predicting the metabolic pathways with which these genes were associated. The analysis (LEfSe) revealed a taxonomic difference in the intestinal contents of animals with high and low live weight, the genera *Clostridium sensu stricto*, *Clostridium XIVa*, *Treponema* were predominant in animals with lower live weight.

Keywords: cattle, heifers, Aberdeen Angus breed, live weight, marbling, intestinal microbiome, functional prognosis, metabolic pathways

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0003).

For citation: Ryazanov VA, Kolpakov VI, Tarasova EI, Ruchay AN. Gut microbiome and functional prediction of metabolic pathways associated with fat and muscle tissue accumulation in beef cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):242-254. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-242>

Введение.

Отбор и селекция крупного рогатого скота с наилучшими продуктивными показателями зачастую основываются на анализе экспрессии генов с выявлением множества функциональных локусов, связанных с фенотипическими проявлениями организма (Al-Husseini W et al., 2014; Gerasimov NP et al., 2023). Также благодаря развитию науки стали применяться способы и методы оценки животных, облегчающие экспертизу выявления полезных признаков (Ruchay A et al., 2022). В последнее время исследователи с целью улучшения стада и показателей продуктивности стали уделять больше внимания генетическому банку микроорганизмов, населяющих различные отделы пищеварительного тракта животного (Jami E and Mizrahi I, 2012; Dervabin D et al., 2024), для возможности расширения комплексной оценки животных. Микроорганизмам отводится важная роль в ферментировании структурных и неструктурных углеводов (Gharechahi J et al., 2021) на протяжении всего пищеварительного пути (Xu Q et al., 2021), большинство заболеваний животных также тесно связано с ними (Jang D et al., 2018). Так, известно о связи между таксономической структурой бактериального сообщества и остаточным потреблением корма (Lopes DRG et al., 2021; Liu Y et al., 2022), от данного показателя зависит, насколько животное будет продуктивнее (Jiang H et al., 2021; Chen B et al., 2022). Имеются данные о связи бактерий и образовании различных веществ, принимающих участие в метаболизме (Moszak M et al., 2020). К основным отрядам, участвующим в ферментации углеводов у крупного рогатого скота, относят *Bacteroidales* и *Clostridiales*, *Ruminococcus* и *Fibrobacter*, а также *Succinivibrionaceae* (Wallace RJ et al., 2015).

От выработки тех или иных белков и ферментов будут зависеть пути накопления и формирования мышечной и жировой ткани в организме (Hart EH et al., 2018), что в конечном итоге характеризует качество продукции (Li Z et al., 2023). Результаты исследований *in vitro* (Lebeis SL et al., 2015) показали, что гены организма влияют на формирование микробного сообщества. По всей видимости, данное явление связано со способностью прокариотов приобретать ДНК из окружающей их среды посредством механизмов горизонтального переноса генов (Tabrett A and Horton MW, 2020).

Таким образом, изучение таксономической структуры бактериального сообщества и её функциональной связи с метаболическими реакциями в организме крупного рогатого скота, сопряжёнными с фенотипическими проявлениями, остаётся интересной и актуальной задачей.

Цель исследования.

Выявить различия в таксономической структуре кишечного содержимого у мясного скота и определить взаимосвязь между показателями фенотипических характеристик (живая масса и степень мраморности) и кишечным микробиомом.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Молодняк (тёлки) крупного рогатого скота абердин-ангусской породы. Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все процедуры над животными были выполнены в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФНЦ БСТ РАН.

Схема эксперимента. Животные (n=40) содержались в отдельной группе на откормочной площадке в Костромской области (Россия). Они были одного пола и возраста (532±1,43 дня). Условия кормления и содержания стандартизированы для всей группы. Тёлкам давали кормосмесь, состоящую из сочных и концентрированных кормов. Рацион содержал 53,5 % сухого вещества, 11,75 % белка, 10,3 % клетчатки, 2,35 % жира, 5,4 % золы. По завершении откорма скот был забит на коммерческой бойне, принадлежащей мясоперерабатывающему заводу. Животных идентифицировали с помощью RFID-чипа, а туши – с помощью меток и охлаждали в течение 24-48 часов после забоя. После охлаждения тушу разделяли на товарные куски. Морфологические характеристики животных оценивали в соответствии с рекомендациями, опубликованными Комитетом по контролю за содержанием и использованием лабораторных животных Федерального исследовательского центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (ФНЦ БСТ РАН).

Образцы содержимого прямой кишки (*rectum*) в количестве (n=40) отбирали индивидуально от каждой головы, способом ручным захватом из ампулообразного расширения, с последующим помещением их в микропробирки типа «Eppendorf» объёмом 1,5 мл, содержащие консервант DNA/RNA Shield (Zymo Research, США). Хранение и транспортировку осуществляли до Испытательного центра ФНЦ БСТ РАН в морозильной камере.

Индексы альфа- и бета-разнообразия были рассчитаны в соответствии с рекомендациями (Liu YX et al., 2021) с использованием программы PAST 4.13, которые были представлены с помощью анализа основных координат (PCoA).

Определение генома микроорганизмов содержимого кишечника осуществляли с помощью системы секвенирования MiSeq («Illumina», США) методом секвенирования нового поколения (NGS). Тотальную ДНК из образцов содержимого кишечника выделяли при помощи набора FastDNA® SPIN Kit for Faeces («MP Biomedicals Inc.», Solon, OH, США) с использованием

лизирующего матрикса Lysing Matrix E. Образцы гомогенизировали на приборе TissueLyser LT («Qiagen», Venlo, Нидерланды). Время гомогенизации было увеличено до 5 минут по сравнению с протоколом производителя. Качество выделенной ДНК проверяли методом горизонтального электрофореза в 1 % агарозном геле, и спектрофотометрическим методом на приборе Nanodrop 8000 («Thermo Fisher Scientific», Waltham, MA, США). Концентрацию ДНК измеряли на приборе Qubit 4 Fluorometer («Life Technologies», Carlsbad, CA, США) при помощи набора dsDNA High Sensitivity Assay Kit.

Приготовление ДНК-библиотек выполнено в соответствии с протоколом Illumina (Part #15044223, Rev. B.). Ампликоны региона V3-4 гена 16S SSU rRNA были получены с использованием праймеров S-D-Bact-0341-b-S-17 и S-D-Bact-0785-a-A-21. Парноконцевое секвенирование ампликоновых ДНК-библиотек было выполнено на платформе Illumina MiSeq с использованием набора реактивов MiSeq Reagent Kit v.3 (600-cycle) («Illumina», San Diego, CA, США).

Данные секвенирования подвергались биоинформатической обработке поэтапно. Удаление праймеров-адаптеров (-g CCTACGGGAGGCAGCAGTG -G GACTACACGGGTATCTA -e 0.2 --discard-untrimmed), слияние (-fastq_mergepairs -fastq_maxdiffs 10 -fastq_pctid 80), фильтрация (fastq_filter: -minlen 400 (bp), -maxee 1,0), дерепликация (-fastx_uniques), кластеризация на уровне 97 % (алгоритм UPARSE), глобальное выравнивание (usearch_global: -strand plus -id 0.97). Из дальнейшего анализа были удалены синглтоны и даблтоны (последовательности, встречающиеся однократно или дважды). Результаты секвенирования обрабатывали с использованием пакета анализа данных MATLAB R2020a (9.12.0.1884302) («MathWorks, Inc.», США).

Прогнозирование функциональной связи метагенома кишечника и хозяйственных признаков осуществляли с помощью инструмента PICRUSt1 с базой данных KEGG PATHWAY: Metabolic pathways (KEGG ENZYME). Результат анализа предсказывал количество генов, участвующих в метаболических или химических путях.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>) и центра ЦКП «Персистенция микроорганизмов» (<https://ikvs.info/institut/labora-torii/czkip/>) Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН (г. Оренбург, Россия).

Статистическая обработка. Линейную корреляцию между показателями живой массы животных и бактериальным сообществом рассчитывали с помощью пакета статистического анализа «GraphPad Software Prism 8.0.1» («GraphPad Software Inc.», США), где в качестве переменных выступали определённые OTUs. Проверку репрезентативности, статистический анализ полученных данных и построение графиков осуществляли с помощью программного обеспечения «GraphPad Software Prism 8.0.1» (США). Данные считались высоко достоверными при $P \leq 0,01$, $P \leq 0,05$ – значимость, $P \leq 0,1$ – различия на уровне статистической тенденции.

Результаты исследований.

Для сравнения исследуемых показателей животные были разделены на две группы по 20 голов в каждой по следующему принципу – в группу со средней живой массой m_1 ($601,2 \pm 2,63$ кг) вошли животные, имеющие качество мраморности Top Choice, Choice, в группу m_2 – со средней живой массой ($644,8 \pm 2,84$ кг) и степенью накопления жира Prime, Choice.

Таксономическая структура микробиомов кишечного содержимого в группах животных с живой массой m_1 и m_2 . Общее количество полученных последовательностей составило 874 137, которые были сгруппированы в 22 119 OTU с кластеризацией на уровне 97 %. В кишечном содержимом присутствовали типы бактерий, в наибольшей доле относящиеся к *Firmicutes* (67,0-67,7 %) и *Bacteroidetes* (20,8-21,2 %), в меньшей доле (2,6-7,3 %) присутствовали типы бактерий, относящиеся к *Proteobacteria*, unclassified *Bacteria*, *Spirochaetes*, *Actinobacteria*, *Candidatus Saccharibacteria*, *Tenericutes*, *Elusimicrobia*, *Campilobacterota*, *Verrucomicrobia*, *Synergistetes*, *Fibrobacteres*. В группе животных с живой массой m_1 не установлено наличие бактерий филума *Lentisphaerae*, *Deinococcus-Thermus*, в то время как в группе животных с живой массой m_2 данные типы бактерий были обнаружены в самой незначительной доле по отношению ко всем выявленным микроорганизмам (0,0057-0,0006 %) (рис. 1).

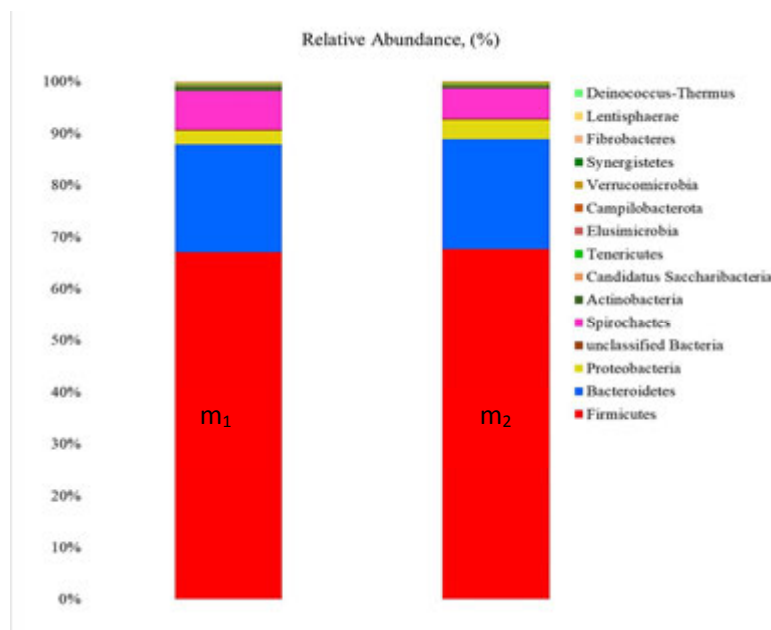


Рисунок 1. Относительное обилие микроорганизмов кишечного содержимого на уровне филумов для животных с живым весом m_1 и m_2 , %

Figure 1. Relative abundance of microorganisms in the intestinal content at the phylum level for animals with live weights m_1 and m_2 , %

Рассчитанные показатели индексов альфа-разнообразия (Shannon (H), Evenness, Simpson 1-D) бактериального сообщества кишечного содержимого в непараметрическом тесте (t) существенно не различались между группами m_1 и m_2 ($t=0,51$, уровень значимости $P=0,60$), в то же самое время индекс Чhao-1 в сравнении между группами m_1 и m_2 чётко отразил различия в альфа-многообразии ($t=8,2$, уровень значимости $P\leq 0,0001$), являющемся мерой видового разнообразия, в пределах этих бактериальных сообществ (рис. 2a) и индекс, показатель видового богатства, Fisher alpha ($t=7,7$ достоверность различий $P\leq 0,0001$) (рис. 2b).

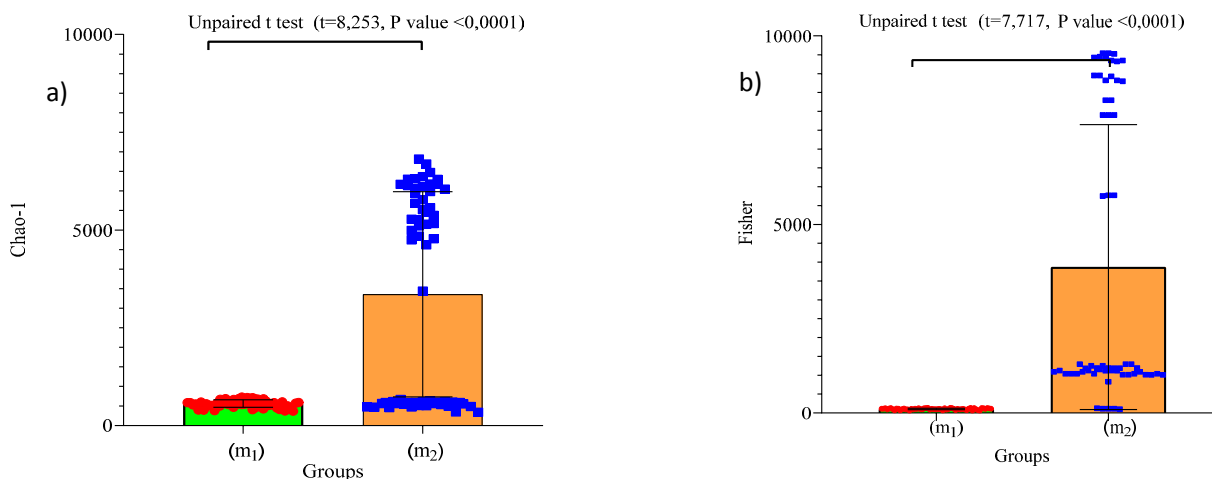


Рисунок 2. На рисунке представлены индексы альфа-разнообразия (a – Chao-1; b - Fisher-alpha)

Figure 2. The figure shows alpha diversity indices (a – Chao-1; b - Fisher-alpha)

Для определения более точного нахождения отличий в таксономической структуре кишечного содержимого на уровне рода в группах m_1 и m_2 был использован метод поиска различий Linear Discriminant Analysis Effect Size (LEfSe). Анализ выявил самые важные различия по семействам (рис. 3a) и родам (рис. 3b) для группы тёлочек с живой массой m_2 . Также установлено, у группы с живой массой m_1 доля бактерий в кишечном содержимом, представленная родами *Clostridium sensu stricto*, *Clostridium* XIVa, *Treponema*, была выше в среднем на 20,0 %, чем у группы m_2 . В группе m_2 доля родов с более высокими значениями OTU, относящихся к родам *Mediterraneibacter*, *Phascolarctobacterium*, *Succinivibrio*, *Monoglobus* и unclassified *Bacteroidales*, была больше, чем в группе m_1 .

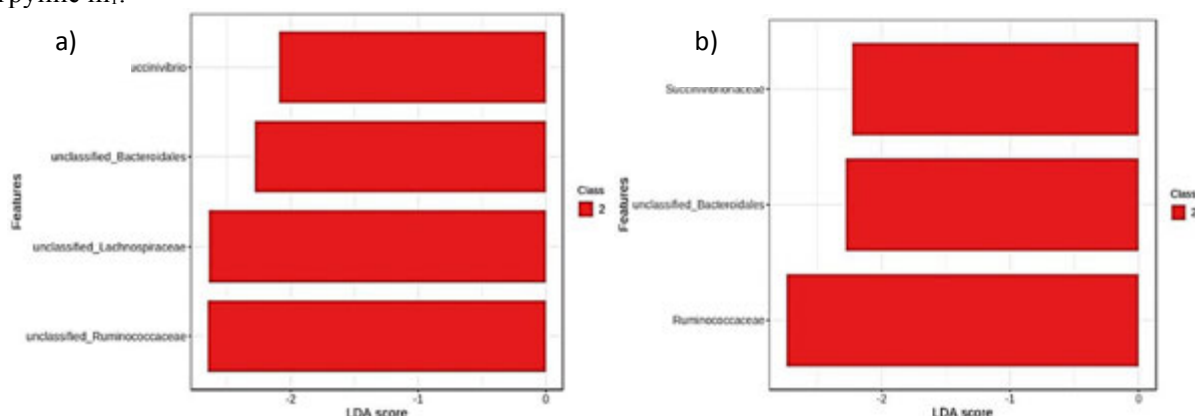


Рисунок 3. Линейный дискриминантный анализ (LDA) размера эффекта (LEfSe), размер эффекта был использован для расчёта таксонов, которые лучше всего различались между семействами (a) и родами (b) по группам m_1 и m_2

Figure 3. Linear discriminant analysis (LDA) of the effect size (LEfSe), the effect size was used to calculate the taxa that differed best between families (a) and genera (b) in groups m_1 and m_2

Чем меньше общих видов в сообществах или в разных точках градиента, тем выше бета-разнообразие, в группе животных с массой m_1 мера оценки степени различий или сходства Whittaker была больше, чем в группе m_2 (табл. 1). Значение Routledge, которое учитывает общее видовое богатство и степень совпадения видов, в группах m_1 и m_2 имело разные значения. Значения коэффициентов указывает на различия сообществ содержимого кишечника у исследуемых групп животных в тесте (Mann Whitney $P=0,7733$).

Таблица 1. Индексы бета-разнообразия образцов содержимого прямой кишки, (n=40)
 Table 1. Indices of beta diversity of samples of the contents of the rectum, (n=40)

Группы/ Groups	Глобальное бета-разнообразие /Global beta diversities							
	Whittaker	Harrison	Cody	Routledge	Wilson-Shmida	Mourelle	Harrison 2	Williams
m_1	2,68	0,134	5885	0,35336	9,1728	0,45864	0	0
m_2	2,60	0,137	4456	0,33429	8,0967	0,42614	0,10408	0,66415

Количественное расстояние Брэя-Кертиса сравнения бактериальных сообществ, выявило контраст общей дисперсии на уровне 36,2 % и 19,9 %, что может характеризовать данные сообщества как разобщённые или разнородные (рис. 4).

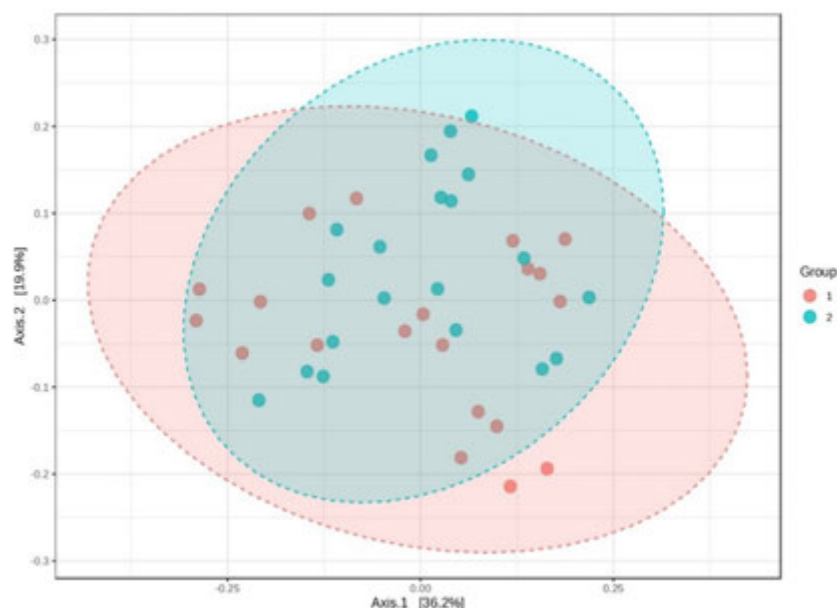
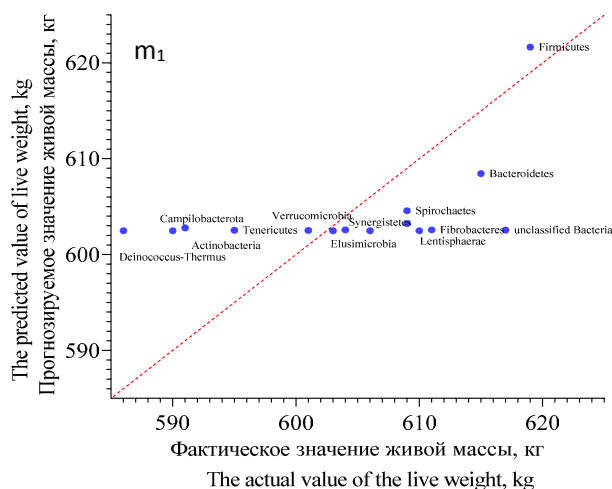


Рисунок 4. Анализ (PCoA) бета-разнообразия бактериального сообщества, содержимого кишечника, в соответствии с индексом Брэя-Кертиса, на уровне филума, на рисунке: 1 – m_1 , 2 – m_2 .

Figure 4. Analysis (PCoA) of the beta diversity of the bacterial community, intestinal contents, in accordance with the Bray-Curtis index, at the phylum level, in figure: 1 – m_1 , 2 – m_2 .

Оценка связи или изменения хозяйственных признаков, живой массы тела исследуемых животных с бактериальным сообществом кишечника имела общий вид уравнения линейной регрессии зависимости живой массы (y) и количества OTUs. В группе m_1 имеет вид $y(m_1)=600,7+0,0022*OTUs$, $R^2=0,98$ отображает точность построения математической модели и силу взаимосвязи между массой животного и значением OTUs, критерий Фишера был равен $F=72,9$ при значении $P=0,091$. В группе живой массы m_2 общий вид уравнения линейной регрессии представлен $y(m_2)=611,3+0,0612*OTUs$, $R^2=0,36$, критерий Фишера – $F=26,5$ при значении $P=9,36E-06$. Данные коэффициенты указывают на положительную корреляционную связь между значением массы животного и генным банком содержимого кишечника (рис. 5).



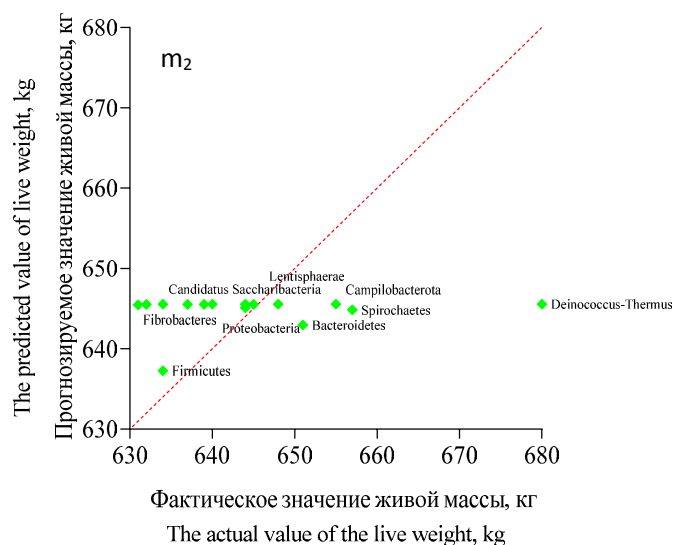


Рисунок 5. Модель, описывающая линейную связь между значениями живой массы животных и кишечным микробиомом на уровне выделенных филумов
 Figure 5. A model describing the linear relationship between the values of animal body weight and the intestinal microbiome at the level of isolated phylum

Оценка различий в метаболических путях у животных с различными фенотипическими проявлениями живой массы и степени мраморности. Учитывая, что группа животных со средней живой массой m_1 включала животных с разной степенью мраморности Top Choice и Choice, а группа m_2 состояла из тёлочек с категориями Prime и Choice, необходимо определить факторы, обуславливающие одинаковый живой вес животных, несмотря на различия в категории мраморности. С этой целью было проведено сравнение метаболических путей KEGG PATHWAY: Metabolic pathways (KEGG ENZYME) у данных животных.

Программа выявила различия в результатах анализа возможных метаболических путей у животных в зависимости от фенотипической характеристики (рис. 6). Так, программа сформировала и объединила в один кластер животных с живой массой m_1 и m_2 категорией Choice, в другой кластер также с массой m_1 и m_2 , но степень мраморности Prime. Top Choice.

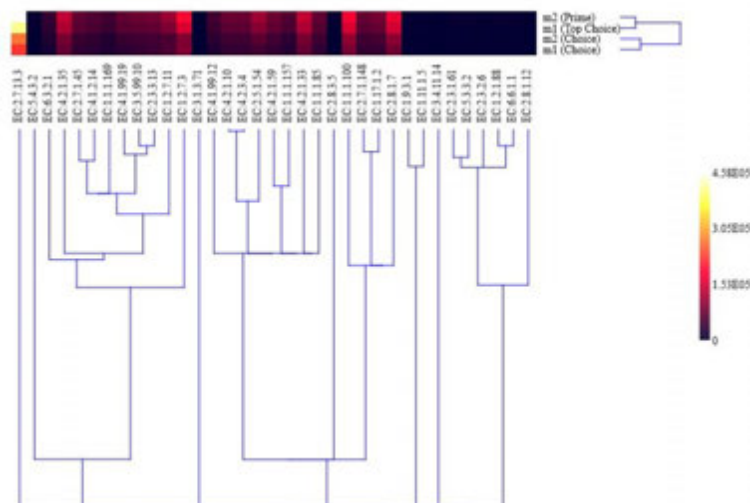


Рисунок 6. Иерархическая кластеризация метаболических путей (белковых ферментов), построенная методом невзвешенных парных групп со средним арифметическим (UPGMA)
 Figure 6. Hierarchical clustering of metabolic pathways (protein enzymes), constructed by the method of unweighted paired groups with arithmetic mean (UPGMA)

Существенное различие между этими кластерами было связано с функциональным назначением ферментов: EC:2.7.13.3 (Histidine kinase), EC:4.2.1.35 ((R)-2-methylmalate dehydratase), EC:1.2.7.3 (2-oxoglutarate synthase), EC:4.2.1.33 (3-isopropylmalate dehydratase), EC:1.1.1.100 (3-oxoacyl-(acyl-carrier-protein)-reductase), EC:2.8.1.7 (Cysteine desulfurase).

Обсуждение полученных результатов.

В результате проведённого анализа установленная таксономическая структура кишечного микробиома всех подопытных животных, разделённых по живой массе, была представлена филумами *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Proteobacteria*, *Spirochaetes*, unclassified *Bacteria*, *Verrucomicrobia*. При проведении метагеномного анализа данные филумы обнаруживаются в образцах содержимого рубца и кишечника крупного рогатого скота в различных исследованиях (Holman DB et al., 2024). Установление дифференциаций в составе бактериального сообщества кишечного содержимого выявило достоверное превышение доли бактерий родов *Clostridium sensu stricto*, *Clostridium* XIVa, *Treponema* в группе животных с низкой живой массой. В ряде работ, посвящённых изучению микробиома жвачных животных, отмечается роль для семейства *Clostridium*. Данные микроорганизмы способны образовывать большое количество аммиака, общего количества летучих жирных кислот, уксусной, пропионовой и масляной кислот, увеличивая среднесуточные привесы и переваримость структурных углеводов (Torres Manno MA et al., 2023; Xue L et al., 2022). В другом исследовании отмечается положительная роль *Clostridium sensu stricto*, связанная с регуляцией и метаболизмом липидного обмена и выработкой короткоцепочечных жирных кислот (Paster BJ et al., 1993).

Используя в исследовании метод поиска различий Linear Discriminant Analysis Effect Size (LEfSe), установлены самые важные различия в микробиоме для группы животных с высокой живой массой для родов *Succinivibrionaceae*, *Ruminococcaceae*, unclassified *Bacteroidales*. По некоторым данным более высокая относительная численность родов представителей *Ruminococcaceae* коррелируется с накоплением жира (Tang S et al., 2021), по другим данным, наличие представителей Клостридиальных у жвачных может коррелировать с накоплением межмышечного жира (Lei L et al., 2021). За пределами рассмотрения возраста, пола и питания микробиом кишечника и генетика животного оказываются двумя значимыми детерминантами в процессе отложения и накопления межмышечного и внутримышечного жира (Zheng Y et al., 2022). При установлении различий в коровом микробиоме животных, разделённых на три группы мраморности, с высокой статистической вероятностью были определены рода *Phocaeicola*, *Agathobacter*, *Prevotella*, *Phascolarctobacterium*, *Acutalibacter*, *Hungatella*, доля в бактериальном сообществе которых различалась в зависимости от мраморности. В группе животных со степенью мраморности Choice в отличие от группы с наивысшей степенью мраморности Prime присутствовали рода *Treponema*, *Streptococcus*, *Megasphaera*, *Alisonella*. Так, присутствие данных бактерий может поспособствовать формированию иммунной системы слизистой оболочки (Furusawa Y et al., 2013), бактерии рода *Agathobacter* считаются полезной микрофлорой (Rosero JA et al., 2016), наиболее значимое отличие данных микроорганизмов друг от друга заключается в способности синтезировать бутират, пропионат, ацетат (Chattopadhyay I et al., 2022), которые вырабатываются кишечной микробиотой и считаются основными в механизме липидного обмена посредством взаимодействия между глюкагоноподобным пептидом-1 (GLP-1) и рецепторами поверхности клеток, связанными с G-белком, такими как рецепторы GPR41 и GPR43 в кишечнике (Samuel BS et al., 2008; Psichas A et al., 2015). Различные виды кишечных бактерий находятся в ассоциативной связи с генами, участвующими в мышечном метаболизме (Li Y et al., 2020).

Ранее сообщалось о способности выживания некоторых микроорганизмов при участии гена гистидинкиназы в качестве регулятора pH в пищеварительной системе (Pflock M et al., 2004). Также известно, что у *Escherichia coli* K-12 MG1655:b3404 в образовании биоплёнки принимает участие гистидинкиназа (Roberts DL et al., 1994). В проведённом нами анализе установлены отличия в функциональном назначении ряда ферментов, участвующих в биосинтезе валина, лейцина и изо-

лейцина ((R)-2-methylmalate dehydratase) и фермента, являющегося частью пути биосинтеза лейцина (3-isopropylmalate dehydratase), как и для фермента (3-охоасил-(acyl-carrier-protein)-reductase), связанного с биосинтезом жирных кислот и метаболизмом биотина (Wang H and Cronan JE, 2004). Характерное различие обнаружено для фермента (Cysteine desulfurase), участвующего в биосинтезе железосернистых кластеров, таким образом у некоторых видов бактерий происходит биологическая фиксация азота (Zheng L et al., 1993).

Заключение.

В ходе нашего исследования была установлена таксономическая структура кишечного микробиома животных с разной живой массой. Выявлено достоверное превышение доли бактерий родов *Clostridium sensu stricto*, *Clostridium* XIVa и *Treponema* у животных с низкой живой массой. Эти микроорганизмы играют важную роль в метаболизме и влияют на мясную продуктивность животных.

С помощью метода LEfSe были обнаружены существенные различия в микробиоме животных с высокой живой массой, связанные с родами *Succinivibrionaceae*, *Ruminococcaceae* и unclassified *Bacteroidales*. Эти количественные различия могут быть связаны с накоплением жира и межмышечного жира у животных.

При разделении животных на три группы мраморности были выявлены различия в составе бактериального сообщества, связанные с родами *Phocaeicola*, *Agathobacter*, *Prevotella*, *Phascolarctobacterium*, *Acutalibacter* и *Hungatella*. Присутствие этих бактерий может способствовать формированию иммунной системы слизистой оболочки и синтезу короткоцепочечных жирных кислот, важных для липидного обмена.

Таким образом, исследование показало, что микробиом кишечника и фенотипические проявления животного находятся во взаимосвязи.

Список источников / References

1. Al-Husseini W, Gondro C, Quinn K, Herd RM, Gibson JP, Chen Y. Expression of candidate genes for residual feed intake in Angus cattle. *Animal Genetics*. 2014;45(1):12-19. doi: 10.1111/age.12092
2. Chattopadhyay I, Gundamaraju R, Jha NK, Gupta PK, Dey A, Mandal CC, Ford BM. Interplay between dysbiosis of gut microbiome, lipid metabolism, and tumorigenesis: can gut dysbiosis stand as a prognostic marker in cancer? *Dis Markers*. 2022;2022(1):2941248. doi: 10.1155/2022/2941248
3. Chen B, Li D, Leng D, Kui H, Bai X and Wang T. Gut microbiota and meat quality. *Front Microbiol*. 2022;13:951726. doi: 10.3389/fmicb.2022.951726
4. Deryabin D, Lazebnik C, Vlasenko L, Karimov I, Kosyan D, Zatevalov A, Duskaev G. Broiler chicken cecal microbiome and poultry farming productivity: a meta-analysis. *Microorganisms*. 2024;12(4):747. doi: 10.3390/microorganisms12040747
5. Furusawa Y, Obata Y, Fukuda S, et al. Commensal microbe-derived butyrate induces the differentiation of colonic regulatory T cells. *Nature*. 2013;504:446-450. doi: 10.1038/nature12721
6. Gerasimov NP, Dzhulamanov KM, Lebedev SV, Kolpakov VI. Effect of IGF-1 C472T, GH C2141G, and GHR T914A polymorphisms on growth performance and feed efficiency in young kazakh white-headed cattle. *Veterinary World*. 2023;16(8):1584-1592. doi: 10.14202/vetworld.2023.1584-1592
7. Gharechahi J, Vahidi MF, Bahram M, Han JL, Ding XZ, Salekdeh GH. Metagenomic analysis reveals a dynamic microbiome with diversified adaptive functions to utilize high lignocellulosic forages in the cattle rumen. *The ISME J*. 2021;15(4):1108-1120. doi: 10.1038/s41396-020-00837-2
8. Hart EH, Creevey CJ, Hitch T, Kingston-Smith AH. Meta-proteomics of rumen microbiota indicates niche compartmentalization and functional dominance in a limited number of metabolic pathways between abundant bacteria. *Sci Rep*. 2018;8:10504. doi: 10.1038/s41598-018-28827-7

9. Holman DB, Gzyl KE, Scott H, Cara Service, Prieto N, López-Campos Ó. Associations between the rumen microbiota and carcass merit and meat quality in beef cattle. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2024;108(1):287. doi: 10.1007/s00253-024-13126-1
10. Jami E, Mizrahi I. Similarity of the ruminal bacteria across individual lactating cows. *Anaerobe*. 2012;18(3):338-343. doi: 10.1016/j.anaerobe.2012.04.003
11. Jang D, Yoon J, Tate M, Lee W, Kwon T, Shin S, et al. Multivariate genome-wide association studies on tenderness of Berkshire and Duroc pig breeds. *Genes Genomics*. 2018;40:701-705. doi: 10.1007/s13258-018-0672-6
12. Jiang H, Fang S, Yang H, Chen C. Identification of the relationship between the gut microbiome and feed efficiency in a commercial pig cohort. *Journal of Animal Science*. 2021;99(3):skab045. doi: 10.1093/jas/skab045
13. Lebeis SL, Paredes SH, Lundberg DS, et al. Salicylic acid modulates colonization of the root microbiome by specific bacterial taxa. *Science*. 2015;349:860-864. doi: 10.1126/science.aaa8764
14. Lei L, Wang Z, Li J, Yang H, Yin Y, Tan B, et al. Comparative microbial profiles of colonic digesta between ningxiang pig and large white pig. *Animals*. 2021;11(7):1862. doi: 10.3390/ani11071862
15. Li Y, Cheng G, Yamada T, Liu J, Zan L, Tong B. Effect of expressions and SNPs of candidate genes on intramuscular fat content in qinchuan cattle. *Animals (Basel)*. 2020;10(8):1370. doi: 10.3390/ani10081370
16. Li Z, Cui R, Wang YB, Luo YB, Xue PX, Tang QG, Fang MY. Specific gastrointestinal microbiota profiles in Chinese Tan sheep are associated with lauric acid content in muscle. *BMC microbiology*. 2023;23(1):331. doi: 10.1186/s12866-023-03079-2
17. Liu Y, Wu H, Chen W, Liu C, Meng Q, Zhou Z. Rumen microbiome and metabolome of high and low residual feed intake angus heifers. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022;9:812861. doi: 10.3389/fvets.2022.812861
18. Liu YX, Qin Y, Chen T, Lu M, Qian X, Guo X, Bai Y. A practical guide to amplicon and metagenomic analysis of microbiome data. *Protein & Cell*. 2021; 12(5):315-330. doi: 10.1007/s13238-020-00724-8
19. Lopes DRG, de Souza Duarte M, La Reau AJ, Chaves IZ, de Oliveira Mendes TA, Detmann E, Bento CBP, Mercadante MEZ, Bonilha SFM, Suen G, Mantovani HC. Assessing the relationship between the rumen microbiota and feed efficiency in Nellore steers. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12(1):79. doi: 10.1186/s40104-021-00599-7
20. Moszak M, Szulińska M, Bogdański P. You are what you eat—the relationship between diet, microbiota, and metabolic disorders—a review. *Nutrients*. 2020;12(4):1096. doi: 10.3390/nu12041096
21. Paster BJ, Russell JB, Yang CM, Chow JM, Woese CR, Tanner R. Phylogeny of the ammonia-producing ruminal bacteria *Peptostreptococcus anaerobius*, *Clostridium sticklandii*, and *Clostridium aminophilum* sp. nov. *Int J Syst Bacteriol*. 1993;43(1):107-10. doi: 10.1099/00207713-43-1-107
22. Pflock M, Dietz P, Schar J, Beier D. Genetic evidence for histidine kinase HP165 being an acid sensor of *Helicobacter pylori*. *FEMS Microbiol Lett*. 2004;234(1):51-61. doi: 10.1016/j.femsle.2004.03.023
23. Psichas A, Sleeth ML, Murphy KG, et al. The short chain fatty acid propionate stimulates GLP-1 and PYY secretion via free fatty acid receptor 2 in rodents. *Int J Obes (Lond)*. 2015;39(3):424-429. doi: 10.1038/ijo.2014.153
24. Roberts DL, Bennett DW, Forst SA. Identification of the site of phosphorylation on the osmosensor, EnvZ, of *Escherichia coli*. *J Biol Chem*. 1994;269(12):8728-33.
25. Rosero JA, Killer J, Sechovcova H, Mrazek J, Benada O, Fliegerova K, Havlik J, Kopečný J. Reclassification of *Eubacterium rectale* (Hauduroy et al. 1937) Pre' vot 1938 in a new genus *Agathobacter* gen. nov. as *Agathobacter rectalis* comb. nov., and description of *Agathobacter ruminis* sp. nov., isolated from the rumen contents of sheep and cows. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2016;66(2):768-773. doi: 10.1099/ijsem.0.000788
26. Ruchay A, Kober V, Dorofeev K, Kolpakov V, Gladkov A, Guo H. Live weight prediction of cattle based on deep regression of RGB-D images. *Agriculture*. 2022;12(11):1794. doi: 10.3390/agriculture12111794

27. Samuel BS, Shaito A, Motoike T, et al. Effects of the gut microbiota on host adiposity are modulated by the short-chain fatty-acid binding G protein-coupled receptor, Gpr41. *PNAS*. 2008;105(43):16767-16772. doi: 10.1073/pnas.0808567105
28. Tabrett A, Horton MW. The influence of host genetics on the microbiome. *F1000Res*. 2020;9(F1000 Faculty Rev):84. doi: 10.12688/f1000research.20835.1
29. Tang S, Zhong R, Yin C, Su D, Xie J, Chen L, Liu L, Zhang H. Exposure to high aerial ammonia causes hindgut dysbiotic microbiota and alterations of microbiota-derived metabolites in growing pigs. *Front Nutr*. 2021;8:689818. doi: 10.3389/fnut.2021.689818
30. Torres Manno MA, Gizzi FO, Martín M, Espariz M, Magni C, Blancato VS. Metagenomic approach to infer rumen microbiome derived traits of cattle. *World J Microbiol Biotechnol*. 2023;39(9):250. doi: 10.1007/s11274-023-03694-1
31. Wallace RJ, Rooke JA, McKain N, Duthie CA, Hyslop JJ, Ross DW, Waterhouse A, Watson M, Roehe R. The rumen microbial metagenome associated with high methane production in cattle. *BMC Genomics*. 2015;23(16):839. doi: 10.1186/s12864-015-2032-0
32. Wang H, Cronan JE. Only one of the two annotated *Lactococcus lactis* fabG genes encodes a functional beta-ketoacyl-acyl carrier protein reductase. *Biochemistry*. 2004;43(37):11782-11789. doi: 10.1021/bi0487600
33. Xu Q, Qiao Q, Gao Y, Hou J, Hu M, Du Y, Zhao K, Li X. Gut microbiota and their role in health and metabolic disease of dairy cow. *Frontiers in Nutrition*. 2021;8:701511. doi: 10.3389/fnut.2021.701511
34. Xue L, Wang D, Zhang F, Cai L. Prophylactic feeding of clostridium butyricum and saccharomyces cerevisiae were advantageous in resisting the adverse effects of heat stress on rumen fermentation and growth performance in goats. *Animals (Basel)*. 2022;12(18):2455. doi: 10.3390/ani12182455
35. Zheng L, White RH, Cash VL, Jack RF, Dean DR. Cysteine desulfurase activity indicates a role for NIFS in metallocluster biosynthesis. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1993;90(7):2754-2758. doi: 10.1073/pnas.90.7.2754
36. Zheng Y, Chen J, Wang X, Han L, Yang Y, Wang Q, et al. Metagenomic and transcriptomic analyses reveal the differences and associations between the gut microbiome and muscular genes in angus and chinese simmental cattle. *Front Microbiol*. 2022;13:815915. doi: 10.3389/fmicb.2022.815915

Информация об авторах:

Виталий Александрович Рязанов, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Лаборатории прецизионных технологий в сельском хозяйстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-922-807-71-00.

Владимир Иванович Колпаков, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий Лабораторией прецизионных технологий в сельском хозяйстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-987-341-77-02.

Екатерина Ивановна Тарасова, младший научный сотрудник Лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-987-896-29-20.

Алексей Николаевич Ручай, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории прецизионных технологий в сельском хозяйстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-908-058-97-04.

Information about the authors:

Vitaly A Ryazanov, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher at the Laboratory of Precision Technologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvary St., Orenburg, 460000, tel.: 8-922-807-71-00.

Vladimir I Kolpakov, Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Precision Technologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvary St., Orenburg, 460000, tel.: 8-987-341-77-02.

Ekaterina I Tarasova, Junior Researcher, Laboratory of Molecular Genetic Research and Metalomics in Animal Husbandry, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvary St., Orenburg, 460000, tel.: 8-987-896-29-20.

Alexey N Ruchai, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher at the Laboratory of Precision Technologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvary St., Orenburg, 460000, tel.: 8-908-058-97-04.

Статья поступила в редакцию 25.09.2024; одобрена после рецензирования 28.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 25.09.2024; approved after reviewing 28.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 255-265.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 255-265.

Научная статья
УДК 636.082:591.463.1
doi:10.33284/2658-3135-107-4-255

Дисперсия хроматина сперматозоидов быков-производителей в зависимости от возраста

**Байлар Садрадиневич Иолчиев¹, Анна Валиевна Шмидт², Ольга Николаевна Луконина³,
Татьяна Анатольевна Мороз⁴, Дмитрий Владимирович Машталер⁵, Нина Анатольевна Комбарова⁶,
Светлана Николаевна Ушакова⁷, Ирина Евгеньевна Приданова⁸**

^{1,3,4,5,7,8}Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела, Московская область, Лесные Поляны, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

⁶Головной центр по воспроизводству сельскохозяйственных животных, пос. Быково, Московская область, Россия

¹baylar1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5386-7263>

²anna74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8108-7149>

³lukoninaon@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5369-6555>

⁴t_moroz_2013@mail.ru

⁵mashtaler-1989@mail.ru

⁶komnina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3861-4465>

⁷ob-vniiplem@yandex.ru

⁸irinapridanova@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования взаимосвязи показателей, характеризующих качество спермы быков-производителей и их возраста. Исследуемая выборка быков-производителей была разделена на три группы. В I группу вошли животные до 24 месяцев, во II – от 24 до 60 месяцев, в III – более 60 месяцев. В I группе средний возраст быков-производителей составил 21,8 месяца, во II – 48,9 месяца, в III – 74 месяца. Результаты многомерного дисперсионного анализа свидетельствуют о статистически значимом влиянии возраста быков-производителей на содержание прогрессивно подвижных сперматозоидов в заморожено-оттаянном семени ($F=4,25$, $P\leq 0,05$). У взрослых быков-производителей $48,3\pm 1,13$ % сперматозоидов имели прямолинейное поступательное движение, что на 12,74 % больше, чем у молодых животных. В жгутиках сперматозоидов, по сравнению с другими сегментами, наиболее часто встречаются патологии. На их долю приходится 56,46 % от общего количества аномальных гамет. У быков I группы частота встречаемости патологий в строении головки составляет 32,18 % от всей патологии, что больше, чем в других возрастных группах. Минимальное значение частоты встречаемости аномальных сперматозоидов установлено в образцах биоматериала II группы. Максимальный уровень фрагментации яДНК был обнаружен у быка-производителя в возрасте 14 месяцев и составил 13,8 %, минимальный – у быка в возрасте 49 месяцев

Ключевые слова: быки-производители, возраст, сперматозоид, морфология сперматозоидов, дисперсия ДНК, фрагментация ДНК, патология, сегменты сперматозоидов

Для цитирования: Дисперсия хроматина сперматозоидов быков-производителей в зависимости от возраста / Б.С. Иолчиев, А.В. Шмидт, О.Н. Луконина, Т.А. Мороз, Д.В. Машталер, Н.А. Комбарова, С.Н. Ушакова, И.Е. Приданова // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 255-265. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-255>

Original article

Chromatin dispersion of spermatozoa of stud bulls depending on age

Baylar S Iolchiev¹, Anna V Schmidt², Olga N Lukonina³, Tatiana A Moroz⁴, Dmitry V Mashtaler⁵, Nina A Kombarova⁶, Svetlana N Ushakova⁷, Irina E Pridanova⁸

^{1,3,4,5,7,8}All-Russian Scientific Research Institute of Breeding, Moscow region, Lesnye Polyany, Russia

²Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

⁶“Head Center for the Reproduction of Farm Animals”, Bykovo settlement, Podolsk city district, Moscow region, Russia

¹baylar1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5386-7263>

²anna74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8108-7149>

³lukoninaon@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5369-6555>

⁴t_moroz_2013@mail.ru

⁵mashtaler-1989@mail.ru

⁶komnina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3861-4465>

⁷ob-vniiple@yandex.ru

⁸irinapridanova@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the relationship between the parameters characterizing the sperm quality of stud bulls and their age. The studied sample of stud bulls was divided into three groups depending on their age. Group I included animals aged up to 24 months, Group II — from 24 to 60 months, and Group III — over 60 months. In the first group, the average age of stud bulls was 21.8 months, in the second — 48.9 months, and in the third — 74 months. The results of multivariate analysis of variance indicate a statistically significant effect of stud bull age on the content of progressively motile spermatozoa in frozen-thawed semen ($F = 4.25$, $P < 0.05$). In adult stud bulls, $48.3 \pm 1.13\%$ of spermatozoa had rectilinear progressive motion, which is 12.74% more than in young animals. Pathologies are most often encountered in sperm flagella compared to other segments. They account for 56.46% of the total number of abnormal gametes. In bulls of the first group, the frequency of occurrence of pathologies in the structure of the head is 32.18% of all pathologies, which is more than in other age groups. The minimum value of the frequency of occurrence of abnormal spermatozoa was found in the samples of biomaterial of the second group. The maximum level of fragmentation of nDNA was found in a bull at the age of 14 months and amounted to 13.8%, the minimum - in a bull at the age of 49 months.

Keywords: stud bulls, age, spermatozoa, spermatozoa morphology, DNA dispersion, DNA fragmentation, pathology, spermatozoa segments

For citation: Iolchiev BS, Schmidt AV, Lukonina ON, Moroz TA, Mashtaler DV, Kombarova NA, Ushakova SN, Pridanova IE. Chromatin dispersion of spermatozoa of stud bulls depending on age. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):255-265. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-255>

Введение.

Уровень воспроизводства стада является одним из основных показателей, отражающих эффективность организационно-экономической деятельности предприятий, занимающихся разведением сельскохозяйственных животных, в частности крупного рогатого скота (Багиров В.А. и др., 2012; Menon A. G. et al., 2011). Важнейшим элементом вспомогательной репродуктивной технологии является искусственное осеменение. Данный метод имеет ряд биологических и экономических преимуществ для животноводства, позволяет рационально использовать генетический материал выдающихся производителей (Абилов А.И. и др., 2014; Некрасов А.А. и др., 2017; Abah KO et al., 2023; Morgan HL et al., 2020). Использование данного метода позволяет осеменить семенем одного производителя несколько тысяч маток. Это привело к значительному росту требований к оценке при отборе племенных быков-производителей. Особое внимание уделяется спермопродукции, получаемой от быков, она должна отвечать действующему ГОСТу (Панина Е.В. и др., 2019; Иолчиев Б.С. и др., 2018; Четвертакова Е.В. и др., 2020). Репродуктивные способности быков-производителей и качество получаемой спермы зависят от комплекса факторов биотического и абиотического харак-

тера (Шмидт А.В. и др., 2024; Henning H et al., 2021). Многочисленные исследования в области репродукции свидетельствуют о влиянии возраста самцов на качественные и количественные показатели спермопродукции (Agus A et al., 2018; Науменкова В.А., 2019). Установлено, что с возрастом уменьшается концентрация сперматозоидов в эякуляте, снижается их подвижность, увеличивается частота встречаемости гамет с патологиями (Kiprege BN et al., 2017). Исследования ряда авторов показывают, что объём эякулята от полового созревания до зрелого возраста увеличивается, это, по мнению исследователей, обусловлено развитием дополнительных половых желез, увеличением семенников и массы тела животного. Положительная динамика данного показателя продолжается до четырёхлетнего возраста, и с семилетнего возраста происходит снижение качественных и количественных показателей семени (Murphy EM et al., 2018; Vince S et al., 2018). Ряд исследований подтверждает, что взрослые быки обладают преимуществом над молодыми по подвижности сперматозоидов (Konenda MTK et al., 2020). Эксперименты с участием быков старше восьми лет показывают снижение подвижности половых клеток от зрелого к пожилому возрасту (Trevizan JT et al., 2018). В последнее время большое внимание уделяется целостности ДНК сперматозоидов. Полученные данные демонстрируют высокую корреляцию между индексом фрагментации ДНК и идиопатическим бесплодием. Изучение взаимосвязи индекса фрагментации с фертильностью проводится как в медицине, так и в животноводстве. Для некоторых видов установлено пороговое значение степени повреждённости ДНК: для людей допустимый уровень составляет 30 % (Evenson DP et al., 2002), у жеребцов — 28 %, а у свиней — 6 % (Kumaresan A et al., 2020). Этиология связи между уровнем фрагментации ДНК и возрастом самцов пока недостаточно изучена. Понимание механизма репродуктивного старения может позволить более эффективно использовать генетический потенциал высокоценных производителей.

Цель исследования.

Изучить степень фрагментации ядерной ДНК в сперматозоидах быков-производителей в зависимости от возраста.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Быки-производители голштинской, симментальской, швицкой, джерсейской пород.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Материалом для исследования были образцы заморожено-оттаянной спермы быков-производителей (n=64). В исследуемой выборке возраст быков-производителей в среднем составил 53,6 месяцев. Минимальный возраст — 14 месяцев, максимальный — 101,3 месяца. Условия содержания и состав рациона для всех животных были идентичными. Уровень кормления зависел от живой массы производителей. Для проверки гипотезы о влиянии возраста быков на степень фрагментации ДНК в хроматине сперматозоидов от каждой партии криоконсервированного семени случайным методом отбирали по три пробы.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы лаборатории биологии воспроизведения сельскохозяйственных животных Всероссийского научно-исследовательского института животноводства. Оценку качества спермы проводили с использованием программного обеспечения Argus-CASA (Argus Soft), состоящего из четырёх модулей: подвижность, морфология, жизнеспособность и фрагментация. Для микроскопического изучения исследуемых образцов использовали микроскоп Zeiss Axiostar plus. С целью исключения субъективизма оценку всех параметров проводили с помощью CASA. Для определения морфологии сперматозоидов проводилась окраска препаратов. Дисперсию ДНК в хроматине половых клеток определяли с помощью SCD-теста (sperm chromatin dispersion test).

Статистическая обработка. Для создания базы данных использовали «Microsoft Excel» («Microsoft», США), для статистического анализа – «SPSS v.23.0. Statistics» («IBM», США). Для проверки гипотезы о влиянии различных факторов на индекс фрагментации ДНК в хроматине сперматозоидов применили общую линейную модель – многомерный анализ. Уровень значимости $P \leq 0,05$.

Результаты исследования.

Быки-производители в зависимости от возраста были распределены на три группы:

- I группа – молодые быки-производители, возраст которых не превышал двух лет;
- II группа – взрослые быки старше двух и моложе пяти лет (возраст составил от двух до пяти лет);
- III группа – быки старше пяти лет.

В I группе средний возраст быков-производителей был 21,8 месяца, во II группе – 48,9 месяца, а в III группе – 74 месяца. Результаты многомерного дисперсионного анализа свидетельствуют о статистически значимом влиянии возраста быков-производителей на содержание прогрессивно подвижных сперматозоидов в заморожено-оттаянном семени ($F=4,25$, $P \leq 0,05$). В заморожено-оттаянном семени взрослых быков-производителей $48,31 \pm 1,13$ % сперматозоидов имели прямолинейное поступательное движение, что на 12,74 % больше, чем у молодых животных, и на 9,12 % – у быков-производителей III группы. Различия между этими группами и между I и III группами не являются статистически значимыми (рис. 1). Достоверная разница между I и III группами установлена по содержанию сперматозоидов с колебательным и маневренным движением. У молодых быков сперматозоидов с таким движением оказалось на 3,95 % больше, чем у быков старше 5 лет. В сравнительном аспекте наибольшее содержание неподвижных сперматозоидов наблюдалось в группе быков-производителей, возраст которых в среднем составил 74 месяца. Содержание неподвижных сперматозоидов в исследуемых образцах данной группы в среднем составило $43,31 \pm 1,72$ %, что на 5,91 абсолютных процента больше, чем у быков-производителей II группы.

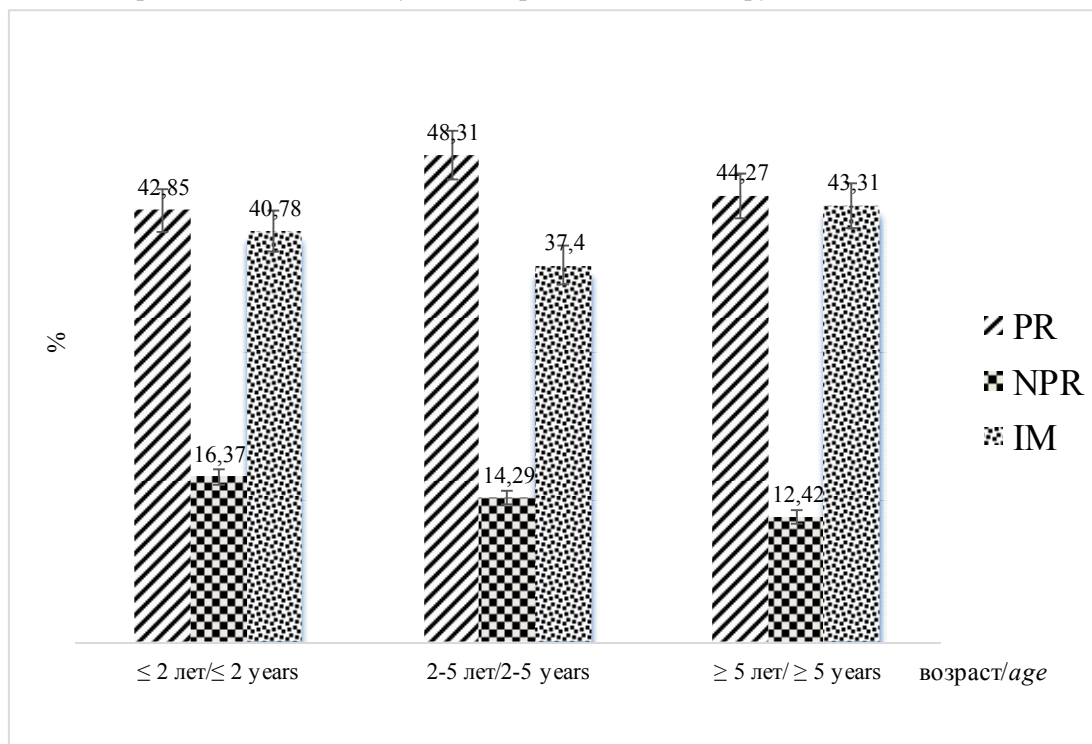


Рисунок 1. Содержание сперматозоидов разной категории в зависимости от возраста быков-производителей

Figure 1. Content of spermatozoa of different categories depending on the age of stud bulls

В исследуемых образцах частота встречаемости сперматозоидов с аномальной морфологией в среднем составила $5,85 \pm 0,4$ %, что в три раза меньше допустимой нормы по ГОСТ 26030-2015.

В сравнительном аспекте наибольшее число сперматозоидов с патологиями отдельных сегментов обнаружено в образцах быков-производителей III группы и составило $7,48 \pm 0,16$ %. Разница между группами по частоте встречаемости патологических сперматозоидов не является статистически значимой.

В исследуемых образцах независимо от возраста в структуре распределения встречаемости патологии в отдельных сегментах достоверная разница в зависимости от возраста между группами не установлена. В среднем, наиболее часто встречается патология в жгутиках половых клеток (табл. 1).

Таблица 1. Распределение патологии в сегментах сперматозоидов быков-производителей

Table 1. Distribution of pathology in sperm segments of stud bulls

Сегмент локализации патологии от общего числа сперматозоидов с патологией / <i>Segment of pathology localization from the total number of spermatozoa with pathology</i>	Группы в зависимости от возраста, лет / <i>Groups depending on age, years</i>		
	≤ 2	2-5	≥ 5
Головка, % / <i>Head, %</i>	$32,18 \pm 3,61$	$30,52 \pm 2,18$	$31,24 \pm 2,96$
Средняя часть, % / <i>Middle part, %</i>	$12,32 \pm 1,82$	$11,57 \pm 1,45$	$11,28 \pm 1,63$
Жгутик, % / <i>Flagellum, %</i>	$54,96 \pm 3,54$	$57,41 \pm 4,61$	$57,01 \pm 3,87$
Полиморфизм тератозооспермия / <i>Polymorphism teratozoospermia</i>			
Головка + средняя часть, % / <i>Head + Middle part, %</i>	$0,14 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,02$
Головка + жгутик, % / <i>Head + Flagellum, %</i>	$0,27 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,01$
Средняя часть + жгутик, % / <i>Middle part + Flagellum, %</i>	$0,11 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,00$
Головка + средняя часть + жгутик, % / <i>Head + Middle part + Flagellum, %</i>	$0,02 \pm 0,00$	-	$0,01 \pm 0,00$

Сегмент, в котором наиболее часто встречались аномалии строения во всех группах – это жгутик. На его долю приходится $56,46$ % от общего количества сперматозоидов с патологиями.

Патология строения головки сперматозоида имеет особое значение, так как наследственный материал сосредоточен именно в этом сегменте. Существует гипотеза, что одной из многочисленных причин фрагментации ядерной ДНК сперматозоида является деформация головки. В популяции аномальных сперматозоидов на долю патологии этого сегмента приходится 31 %. Минимальное значение установлено в образцах II группы, максимальное – в I группе, разница между группами не является достоверной. Сочетание двух и более патологий встречалось крайне редко, во всех группах оно не превышало $0,27$ %.

Методом SCD-теста определяли дисперсию хроматина в сперматозоидах быков-производителей.

В исследуемых выборках уровень фрагментации яДНК в среднем составил $10,44$ % с коэффициентом вариации $58,6$ %. Максимальный уровень фрагментации яДНК ($13,8$ %) был обнаружен у быка-производителя в возрасте 16 месяцев, минимальный ($1,8$ %) – у быка в возрасте 49 месяцев. Результаты дисперсионного анализа опровергают нулевую гипотезу о взаимосвязи между возрастом быков-производителей и степенью фрагментации яДНК.

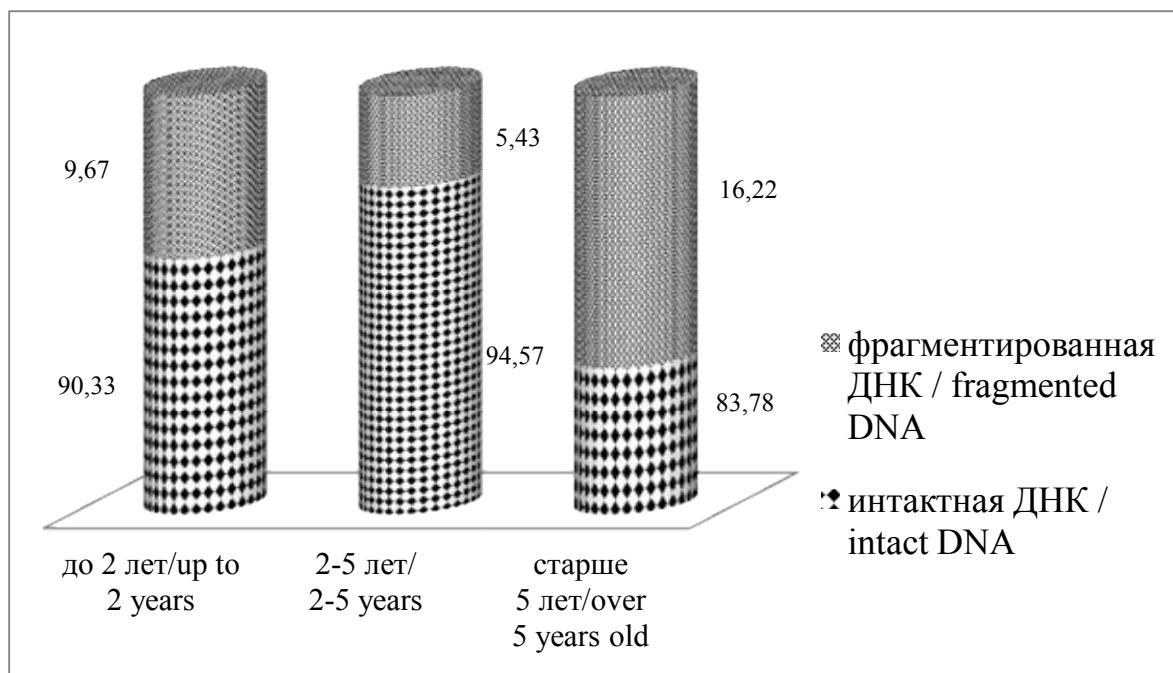


Рисунок 2. Индекс фрагментации яДНК в зависимости от возраста быков-производителей
 Figure 2. DNA fragmentation index depending on the age of stud bulls

Обсуждение полученных результатов.

Изучение взаимосвязи качественных и количественных показателей спермы быков-производителей с их возрастом показало влияние возраста на морфологию половых клеток. Сила влияния возраста быков на частоту встречаемости патологий в строении головок была равна 24 % ($P \leq 0,05$), а жгутика – 37 % ($P \leq 0,01$). На общее количество патологических форм сперматозоидов пришлось 59 % ($P \leq 0,001$) (Бойко Е.В. и др., 2019). Результаты исследования связи структуры хроматина сперматозоидов с возрастом животных показали, что как у молодых, так и у старых быков были более высокие показатели индекса фрагментации по сравнению с быками 2-7 лет. Научные данные о влиянии возраста на индекс фрагментации ДНК хроматина в сперме быков-производителей противоречивы. Одни авторы сообщают о высокой фрагментации ДНК сперматозоидов взрослых быков, другие, напротив, утверждают, что не обнаружили статистически достоверной разницы по индексу фрагментации ДНК в сперматозоидах в зависимости от возраста быков-производителей (Karabinus DS et al., 1990; Fortes MRS et al., 2012; HallapT et al., 2005). Снижение биологической полноценности спермы с возрастом обусловлено рядом факторов, к которым относятся снижение антиоксидантных свойств спермы и гипофункция половых желёз (Carreira JT et al., 2017). Данные о влиянии возраста на качественные и количественные параметры спермы быков-производителей также носят противоречивый характер.

Заключение.

Таким образом, результаты исследований показывают, что возраст быков-производителей оказывает статистически значимое влияние на характер движения и индекс фрагментации ядерной ДНК (яДНК) сперматозоидов.

Список источников

1. Бойко Е.В., Коропец Л.А. Морфологические показатели спермы быков-производителей мясных пород // Современные достижения и проблемы генетики и биотехнологии в животноводстве: материалы междунар. науч. конф. (24 сентября-01 октября, Дубровицы 2019 г.). Дубровицы 2019. С. 26-31. [Boiko EV, Koropets LA. Morphological indicators of sperm of bull-sires of beef breeds (Conference proceedings) Modern achievements and problems of genetics and biotechnology in animal husbandry: Proceedings of the international scientific conference. (September 24-October 1, Dubrovitsy, 2019). Dubrovitsy; 2019:26-31.
2. Митохондриальная дисфункция и активность сперматозоидов быков / Б.С. Иолчиев, С.М. Борунова, О.Э. Бадмаев, Р.Б. Иолчиев, А.В. Таджиева // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 3(161). С. 118-122. [Iolchiev BS, Borunova SM, Badmaev OE, Iolchiyev RB, Tadzhiyeva AV. Mitochondrial dysfunction and sperm activity in bulls. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018;3(161):118-122. (In Russ.)].
3. Науменкова В.А. Качество криоконсервированной спермы жеребцов в зависимости от возраста // Современные достижения и актуальные проблемы в коневодстве: сб. докладов междунар. науч.-практ. конф., (Дивово, 14 июня 2019 г.). Дивово: ВНИИ коневодства, 2019. С. 190-195. [Naumenkova VA. The quality of cryoconserved semen of stallions depending on the age (Conference proceedings) Sovremennye dostizheniya i aktualnie problem v konevodstve: sb. Dokladov mejdunar. nauch.-praktich. konf., (Divovo, 14 iyunya 2019 g.). Divovo: VNII konevodstva; 2019:190-195. (In Russ.)]. doi: 10.25727/HS.2019.1.35388
4. Некрасов А.А., Попов Н.А., Иолчиев Б.С. Влияние биологической полноценности спермы быков-производителей канадской селекции на репродуктивные показатели коров отдельного стада // Аграрная Россия. 2017. № 2. С. 18-21. [Nekrasov AA, Popov NA, Iolchiev BS. Influence of the biological value of sperm of bulls of canadian breeding on the reproductive performance of cows in individual herds. Agrarnaya Rossiya (Agrarian Russia). 2017;2:18-21. (In Russ.)].
5. Панина Е.В., Петров Д.В., Сытник С.Г. Влияние возрастного фактора на качество спермы быков голштинской породы // Доклады ТСХА: сб. статей. М: Изд-во РГАУ-МСХА. 2019. Вып. 291. Ч. V. С. 264-268. [Panina EV, Petrov DV, Sitnik SG. Vliyanie vozzrastnogo faktora na kachestvo spermi bikov golshtinskoi porodi. Doklady TSHA: sb. statej. Moscow: Izdatelstvo RGAU-MSHA. 2019;291(V):264-268. (In Russ.)].
6. Роль репродуктивных биотехнологий в воспроизводстве и сохранении генофонда редких и исчезающих пород крупного рогатого скота / В.Ю. Бабенков, Н.В. Чимидова, А.И. Хаклинов, А.В. Убушиева, В.И. Манжиев // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 1. С. 67-76. [Babenkov VYu, Chimidova NV, Khakhlinov AI, Ubushieva AV, Manjiev VI. The role of reproductive biotechnologies in the reproduction and preservation of the gene pool of rare and endangered breeds of cattle. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(1):67-76. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-67>
7. Спермопродукция у быков-производителей современной селекции при разной обеспеченности макро- и микроэлементами / А.И. Абилов, Г.В. Ескин, Х.А. Амерханов, Н.А. Комбарова, И.С. Турбина, Е.В. Федорова, И.В. Гусев, Н.В. Жаворонкова // Сельскохозяйственная биология. 2014. № 6. С. 96-106. [Abilov AI, Eskin GV, Amerkhanov KhA, Kombarova NA, Turbina IS, Fedorova EV, Gusev IV, Zhavoronkova NV. High sperm production as related to macro- and microelement levels in blood serum in servicing bulls of the modern selection. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2014;6:96-106. (In Russ.)]. doi: 10.15389/agrobiology.2014.6.96rus doi: 10.15389/agrobiology.2014.6.96eng
8. Фертильность сперматозоидов и состояние хроматина: методы контроля (обзор) / В.А. Багиров, В.П. Кононов, Б.А. Иолчиев, П.М. Кленовицкий, Л.К. Эрнст // Сельскохозяйственная биология. 2012. № 2. С. 3-13. [Bagirov VA, Kononov VP, Iolchiev BA, Klenovitskii PM, Ernst LK. Chromatin status as the index of spermatozoa valuable: the tests for estimation. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2012;2:3-13. (In Russ.)].

9. Четвертакова Е.В., Лущенко А.Е. Спермопродукция быков как показатель их адаптационной способности // Вестник КрасГАУ. 2020. № 6(159). С. 144-149. [Chetvertakova EV, Lushchenko AE. Sperm production of bulls as an indicator of their adaptive ability. Bulletin of KSAU. 2020;6(159):144-149. (*In Russ.*)]. doi: 10.36718/1819-4036-2020-6-144-149
10. Шмидт А.В., Иолчиев Б.С., Онкорова Н.Т. Изучение биологической полноценности сперматозоидов в сперме с бактериальной обсемененностью // Вестник КрасГАУ. 2024. № 6(207). С. 101-108. [Shmidt AV, Iolchiev BS, Onkorova NT. Studying the biological completeness of sperm in semen with bacterial contamination. Bulletin of KSAU. 2024;6(207):101-108. (*In Russ.*)]. doi: 10.36718/1819-4036-2024-6-101-108
11. Abah KO et al. Effect of male age on semen quality in domestic animals: potential for advanced functional and translational research? *Veterinary Research Communications*. 2023;47(3):1125-1137. doi: 10.1007/s11259-023-10159-1
12. Agus A, Tri Satya Mastuti Widi. Current situation and future prospects for beef cattle production in Indonesia — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences (AJAS)*. 2018;31(7):976-983. doi: 10.5713/ajas.18.0233
13. Carreira JT et al. Does sperm quality and DNA integrity differ in cryopreserved semen samples from young, adult, and aged Nellore bulls? *Basic and Clinical Andrology*. 2017;27:12. doi: 10.1186/s12610-017-0056-9
14. Evenson DP, Larson KL, Jost LK. Sperm chromatin structure assay: its clinical use for detecting sperm DNA fragmentation in male infertility and comparisons with other techniques. *Journal of Andrology*. 2002;23(1):25-43. doi: 10.1002/j.1939-4640.2002.tb02599.x
15. Fortes MRS et al. The integrity of sperm chromatin in young tropical composite bulls. *Theriogenology*. 2012;78(2):326-33, 333.e1-4. doi: 10.1016/j.theriogenology.2012.02.007
16. Hallap T et al. Sperm chromatin stability in frozen-thawed semen is maintained over age in AI bulls. *Theriogenology*. 2005;63(6):1752-1763. doi: 10.1016/j.theriogenology.2004.08.001
17. Henning H, Luther A-M, Waberski D. A high incidence of sperm with cytoplasmic droplets affects the response to bicarbonate in preserved boar semen. *Animals (Basel)*. 2021;11(9):2570. doi: 10.3390/ani11092570
18. Karabinus DS et al. Comparison of semen quality in young and mature Holstein bulls measured by light microscopy and flow cytometry. *Journal of Dairy Science*. 1990;73(9):2364-2371. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(90)78919-9
19. Kipper BH et al. Sperm morphometry and chromatin condensation in Nelore bulls of different ages and their effects on IVF. *Theriogenology*. 2017;87:154-160. doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.08.017
20. Konenda MTK et al. Seasonal variation and age-related changes in semen quality of Limousin bull in Indonesian artificial insemination center. *Int J Ver Sci*. 2020;9(4):553-557.
21. Kumaresan A et al. Sperm DNA integrity and male fertility in farm animals: a review. *Frontiers in Veterinary Science*. 2020;7:321. doi: 10.3389/fvets.2020.00321
22. Menon AG, Barkema HW, Wilde R, Kastelic JP, Thundathil JC. Associations between sperm abnormalities, breed, age, and scrotal circumference in beef bulls. *Canadian Journal of Veterinary Research*. 2011;75(4):241-247.
23. Morgan HL et al. Defining the male contribution to embryo quality and offspring health in assisted reproduction in farm animals. *Animal Reproduction*. 2020;17(3):e20200018. doi: 10.1590/1984-3143-AR2020-0018
24. Murphy EM et al. Influence of bull age, ejaculate number, and season of collection on semen production and sperm motility parameters in Holstein Friesian bulls in a commercial artificial insemination centre. *Journal of Animal Science*. 2018;96(6):2408-2418. doi: 10.1093/jas/sky130
25. Trevizan JT et al. Does lipid peroxidation and oxidative DNA damage differ in cryopreserved semen samples from young, adult and aged Nellore bulls? *Animal Reproduction Science*. 2018;195:8-15. doi: 10.1016/j.anireprosci.2018.04.071

26. Vince S et al. Age-related differences of semen quality, seminal plasma, and spermatozoa antioxidative and oxidative stress variables in bulls during cold and warm periods of the year. *Animal*. 2018;12(3):559-568. doi: 10.1017/S1751731117001811

References

1. Boiko EV, Koropets LA. Morphological indicators of sperm of bull-sires of beef breeds. Modern achievements and problems of genetics and biotechnology in animal husbandry (Conference proceedings) Proceedings of the international scientific conference. (September 24-October 1, Dubrovitsy, 2019). Dubrovitsy; 2019:26-31.
2. Iolchiyev BS, Borunova SM, Badmayev OE, Iolchiyev RB, Tadzhiyeva AV. Mitochondrial dysfunction and sperm activity in bulls. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2018;3(161):118-122.
3. Naumenkova VA. The quality of cryoconserved semen of stallions depending on the age (Conference proceedings) Modern achievements and actual problems in horse breeding: collection of reports of the international scientific and practical conference. (Divovo, 14 June 2019). Divovo: All-Russian Research Institute of Horse Breeding; 2019:190-195. doi: 10.25727/HS.2019.1.35388
4. Nekrasov AA, Popov NA, Iolchiev BS. Influence of the biological value of sperm of bulls of Canadian breeding on the reproductive performance of cows in individual herds. *Agrarian Russia*. 2017;2:18-21.
5. Panina EV, Petrov DV, Sitnik SG. The effect of age factor on semen quality of Holstein bulls. *Papers of the TAA: collection of articles*. Moscow: Publishing house RSAU-MAA. 2019;291(V):264-268.
6. Abilov AI, Eskin GV, Amerkhanov KhA, Kombarova NA, Turbina IS, Fedorova EV, Gusev IV, Zhavoronkova NV. High sperm production as related to macro- and microelement levels in blood serum in servicing bulls of the modern selection. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2014;6:96-106. doi:10.15389/agrobiology.2014.6.96rus doi:10.15389/agrobiology.2014.6.96eng
7. Babenkov VYu, Chimidova NV, Khakhlinov AI, Ubushieva AV, Manjiev VI. The role of reproductive biotechnologies in the reproduction and preservation of the gene pool of rare and endangered breeds of cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(1):67-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-67>
8. Bagirov VA, Kononov VP, Iolchiev BA, Klenovitskii PM, Ernst LK. Chromatin status as the index of spermatozoa valuable: the tests for estimation. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2012;2:3-13.
9. Chetvertakova EV, Luschenko AE. Sperm production of bulls as an indicator of their adaptive ability. *Bulletin of KSAU*. 2020;6(159):144-149. doi: 10.36718/1819-4036-2020-6-144-149
10. Shmidt AV, Iolchiev BS, Onkorova NT. Studying the biological completeness of sperm in semen with bacterial contamination. *Bulletin of KSAU*. 2024;6(207):101-108. doi: 10.36718/1819-4036-2024-6-101-108
11. Abah KO et al. Effect of male age on semen quality in domestic animals: potential for advanced functional and translational research? *Veterinary Research Communications*. 2023;47(3):1125-1137. doi: 10.1007/s11259-023-10159-1
12. Agus A, Tri Satya Mastuti Widi. Current situation and future prospects for beef cattle production in Indonesia — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences (AJAS)*. 2018;31(7): 976-983. doi: 10.5713/ajas.18.0233
13. Carreira JT et al. Does sperm quality and DNA integrity differ in cryopreserved semen samples from young, adult, and aged Nellore bulls? *Basic and Clinical Andrology*. 2017;27:12. doi: 10.1186/s12610-017-0056-9

14. Evenson DP, Larson KL, Jost LK. Sperm chromatin structure assay: its clinical use for detecting sperm DNA fragmentation in male infertility and comparisons with other techniques. *Journal of Andrology*. 2002;23(1):25-43. doi: 10.1002/j.1939-4640.2002.tb02599.x
15. Fortes MRS et al. The integrity of sperm chromatin in young tropical composite bulls. *Theriogenology*. 2012;78(2):326-33, 333.e1-4. doi: 10.1016/j.theriogenology.2012.02.007
16. Hallap T et al. Sperm chromatin stability in frozen-thawed semen is maintained over age in AI bulls. *Theriogenology*. 2005;63(6):1752-1763. doi: 10.1016/j.theriogenology.2004.08.001
17. Henning H, Luther A-M, Waberski D. A high incidence of sperm with cytoplasmic droplets affects the response to bicarbonate in preserved boar semen. *Animals (Basel)*. 2021;11(9):2570. doi: 10.3390/ani11092570
18. Karabinus DS et al. Comparison of semen quality in young and mature Holstein bulls measured by light microscopy and flow cytometry. *Journal of Dairy Science*. 1990;73(9):2364-2371. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(90)78919-9
19. Kipper BH et al. Sperm morphometry and chromatin condensation in Nelore bulls of different ages and their effects on IVF. *Theriogenology*. 2017;87:154-160. doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.08.017
20. Konenda MTK et al. Seasonal variation and age-related changes in semen quality of Limousin bull in Indonesian artificial insemination center. *Int J Ver Sci*. 2020;9(4):553-557.
21. Kumaresan A et al. Sperm DNA integrity and male fertility in farm animals: a review. *Frontiers in Veterinary Science*. 2020;7:321. doi: 10.3389/fvets.2020.00321
22. Menon AG, Barkema HW, Wilde R, Kastelic JP, Thundathil JC. Associations between sperm abnormalities, breed, age, and scrotal circumference in beef bulls. *Canadian Journal of Veterinary Research*. 2011;75(4):241-247.
23. Morgan HL et al. Defining the male contribution to embryo quality and offspring health in assisted reproduction in farm animals. *Animal Reproduction*. 2020;17(3):e20200018. doi: 10.1590/1984-3143-AR2020-0018
24. Murphy EM et al. Influence of bull age, ejaculate number, and season of collection on semen production and sperm motility parameters in Holstein Friesian bulls in a commercial artificial insemination centre. *Journal of Animal Science*. 2018;96(6):2408-2418. doi: 10.1093/jas/sky130
25. Trevizan JT et al. Does lipid peroxidation and oxidative DNA damage differ in cryo-preserved semen samples from young, adult and aged Nellore bulls? *Animal Reproduction Science*. 2018;195:8-15. doi: 10.1016/j.anireprosci.2018.04.071
26. Vince S et al. Age-related differences of semen quality, seminal plasma, and spermatozoa antioxidative and oxidative stress variables in bulls during cold and warm periods of the year. *Animal*. 2018;12(3):559-568. doi: 10.1017/S1751731117001811

Информация об авторах:

Байлар Садраддинович Иолчиев, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биологии воспроизведения сельскохозяйственных животных, Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела, 141212, Московская область, г. Пушкино, пос. Лесные Поляны, ул. Ленина, д. 13, тел.: +7(495) 515-95-57.

Анна Валиевна Шмидт, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры общественного здоровья, здравоохранения и гигиены, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, тел.: +7(495)434-53-00.

Ольга Николаевна Луконина, кандидат сельскохозяйственных наук, врио директора, Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела, 141212, Московская область, г. Пушкино, пос. Лесные Поляны, ул. Ленина, д. 13, тел.: +7(495) 515-95-57.

Татьяна Анатольевна Мороз, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биологии воспроизведения сельскохозяйственных животных, Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела, 141212, Московская область, г. Пушкино, пос. Лесные Поляны, ул. Ленина, д. 13, тел.: +7(495) 515-95-57.

Дмитрий Владимирович Машталер, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биологии воспроизведения сельскохозяйственных животных, Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела, 141212, Московская область, г. Пушкино, пос. Лесные Поляны, ул. Ленина, д. 13, тел.: +7(495) 515-95-57.

Нина Анатольевна Комбарова, кандидат биологических наук, главный технолог АО «Головной центр по воспроизводству сельскохозяйственных животных», 142143, Московская область, г. Подольск, посёлок Быково, ул. Центральная, д. 3, тел.: +7(495) 109-99-93.

Светлана Николаевна Ушакова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биологии воспроизведения сельскохозяйственных животных, Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела, 141212, Московская область, г. Пушкино, пос. Лесные Поляны, ул. Ленина, д. 13, тел.: +7(495) 515-95-57.

Ирина Евгеньевна Приданова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биологии воспроизведения сельскохозяйственных животных, Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела, 141212, Московская область, г. Пушкино, пос. Лесные Поляны, ул. Ленина, д. 13, тел.: +7(495) 515-95-57.

Information about the authors:

Baylar S Iolchiev, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Reproduction Biology of Farm Animals, All-Russian Research Institute of Breeding, Moscow Region, Pushkino, Lesnye Polyany, Lenin St., 13, 141212, tel.: +7(495) 515-95-57.

Anna V Schmidt, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Public Health, Healthcare and Hygiene, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Miklukho-Maklaya St., 6, 117198, tel.: +7(495) 434-53-00.

Olga N Lukonina, Cand. Sci. (Agriculture), Acting Director, All-Russian Research Institute of Breeding, Moscow Region, Pushkino, Lesnye Polyany, Lenin St., 13, 141212, tel.: +7(495) 515-95-57.

Tatiana A Moroz, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Reproduction Biology of Farm Animals, All-Russian Research Institute of Breeding, Moscow Region, Pushkino, Lesnye Polyany, Lenin St., 13, 141212, tel.: +7(495) 515-95-57.

Dmitry V Mashtaler, Cand. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of Reproduction Biology of Farm Animals, All-Russian Research Institute of Breeding, Moscow Region, Pushkino, Lesnye Polyany, Lenin Street, 13, 141212, tel.: +7(495) 515-95-57.

Nina A Kombarova, Cand. Sci. (Biology), Chief Technologist of SC "Head Center for the Reproduction of Farm Animals", Moscow Region, Podolsk urban district, Bykovo settlement, Centralnaya street, 3, 142143, tel.: +7 (495) 109-99-93.

Svetlana N Ushakova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Reproduction Biology of Farm Animals, All-Russian Research Institute of Breeding, Moscow Region, Pushkino, Lesnye Polyany, Lenin St., 13, 141212, tel.: +7(495) 515-95-57.

Irina E Pridanova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Reproduction Biology of Farm Animals, All-Russian Research Institute of Breeding, Moscow Region, Pushkino, Lesnye Polyany, Lenin St., 13, 141212, tel.: +7(495) 515-95-57.

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена после рецензирования 28.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 07.10.2024; approved after reviewing 28.10.2024; accepted for publication 09.09.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 266-282.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 266-282.

Научная статья
УДК 636.22/.28:577.17:637.11
doi:10.33284/2658-3135-107-4-266

Таксономическое разнообразие микробиоты толстого кишечника коров при различном уровне эссенциальных элементов в организме животных

Елена Владимировна Яушева¹, Елена Анатольевна Сизова²

^{1,2}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹vasilena56@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>

²Sizova.L78@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-5125-5981

Аннотация. Микроэлементы, такие как железо, марганец, медь, кобальт, селен и цинк являются жизненно необходимыми и играют важную роль в росте и формировании продуктивности сельскохозяйственных животных. Избыток или дефицит эссенциальных элементов приводит к отклонениям в развитии животных и общему ухудшению здоровья и метаболических процессов. Микробиом желудочно-кишечного тракта жвачных животных как участник широкого перечня метаболических процессов отзывается своей реорганизацией на изменения в минеральном обмене. Целью работы являлось исследование взаимосвязи между элементным составом волоса, молока и состоянием микробиома толстого кишечника. По элементному составу волоса животные были разделены на 2 группы (n=15): I группа (контроль) – уровень микроэлементов (Cu, Zn, Co, Se, Mn, Fe) в пределах референтных значений, II группа – уровень микроэлементов ниже или находится в пределах нижней границы референтных значений. Уровень Se, Cu, Co, Zn, Fe и Mn был достоверно ($P \leq 0,05$) ниже на 21,4; 20; 30,1; 17,9; 40,3 и 30,2 % у животных II группы относительно I. Также в волосе коров II группы было отмечено более низкое содержание кальция (-7,3 %, $P \leq 0,05$) и хрома (-5,67 %, $P \leq 0,05$) и более высокая концентрация кремния (+36,4 %, $P \leq 0,05$), ртути (+6,73 %, $P \leq 0,05$) и никеля (+11,6 %, $P \leq 0,05$) в сравнении с группой I. Аналогично в молоке от II животных группы содержание меди (-23,3 %, $P \leq 0,05$), кальция (-3,19 %, $P \leq 0,05$) и селена (-7,96 %, $P \leq 0,05$) было ниже чем в I. Микробиом толстого кишечника коров II группы в сравнении с I характеризовался меньшим биоразнообразием. В таксономическом составе микробиоты кишечника коров II группы отмечалась более низкая относительная численность бактерий таксонов *Lachnospiraceae*, *Alistipes*, *Prevotella*, являющихся активными продуцентами короткоцепочечных жирных кислот. Полученные данные показывают важность изучения микробиоты ЖКТ на фоне дисбаланса микроэлементов в организме животных и перспективы управления метаболическими процессами в кишечнике путём коррекции элементозов.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, микробиота, элементный состав молока, микроэлементы, макроэлементы

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2024 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2022-0011).

Для цитирования: Яушева Е.В., Сизова Е.А. Таксономическое разнообразие микробиоты толстого кишечника коров при различном уровне эссенциальных элементов в организме животных // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 266-282. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-266>

Original article

Taxonomic diversity of the large intestine microbiota of cows with different levels of essential elements in the body**Elena V Yausheva¹, Elena A Sizova²**^{1,2}Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia¹vasilena56@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>²Sizova.L78@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-5125-5981

Abstract. Microelements such as iron, manganese, copper, cobalt, selenium and zinc are vital and play an important role in the growth and productivity of farm animals. Excess or deficiency of essential elements leads to deviations in the development of animals and a general deterioration in health and metabolic processes. The microbiome of the gastrointestinal tract of ruminants is a participant in many metabolic processes in the body and will also respond to changes in mineral metabolism. The aim of the work was to study the relationship between the elemental composition of hair, milk and the state of the colon microbiome. According to the elemental composition of hair, the animals were divided into 2 groups (n = 15): Group I (control) - the level of microelements (Cu, Zn, Co, Se, Mn, Fe) within the reference values, Group II - the level of microelements is below or within the lower limit of the reference values. The level of Se, Cu, Co, Zn, Fe and Mn was significantly ($P \leq 0.05$) lower by 21.4; 20; 30.1; 17.9; 40.3 and 30.2% in animals of group II relative to I. Also, in the hair of cows of group II, a lower content of calcium (-7.3%, $P \leq 0.05$) and chromium (-5.67%, $P \leq 0.05$) and a higher concentration of silicon (+36.4%, $P \leq 0.05$), mercury (+6.73%, $P \leq 0.05$) and nickel (+11.6%, $P \leq 0.05$) were noted in comparison with group I. Similarly, in milk from animals of group II, the content of copper (-23.3%, $P \leq 0.05$), calcium (-3.19%, $P \leq 0.05$) and selenium (-7.96%, $P \leq 0.05$) was lower than in I. The microbiome of the large intestine of cows of group II in comparison with I was characterized by lower biodiversity. In the taxonomic composition of the intestinal microbiota of cows of group II, a lower relative abundance of bacteria of the taxa Lachnospiraceae, Alistipes, Prevotella, which are active producers of short-chain fatty acids, was noted. The obtained data show the importance of studying the microbiota of the gastrointestinal tract against the background of an imbalance of trace elements in the animal body and the prospects for managing metabolic processes in the intestine by correcting elementoses.

Keywords: cattle, microbiota, elemental composition of milk, microelements, macroelements

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2022-2024 FSBRI FRC BST RAS (No FNWZ-2022-0011).

For citation: Yausheva EV, Sizova EA. Taxonomic diversity of the large intestine microbiota of cows with different levels of essential elements in the body. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):266-282. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-266>

Введение.

Минеральный обмен в организме крупного рогатого скота оказывает существенное влияние на реализацию генетического потенциала животных и увеличение объёмов производства молочной продукции (Wagner JJ et al., 2023). Обеспеченность микроэлементами – один из лимитирующих факторов, определяющий продуктивность коров (Гойлян Д. и др., 2022; de Sousa Ferreira JM et al., 2023). Эффективность минерального обмена в организме животных оказывает значительное влияние на качество получаемой сельскохозяйственной продукции (Воронина О.А. и др., 2022; van der Reijden et al., 2019).

Микроэлементы в организме животных влияют на работу ферментов, синтез витаминов, обеспечивают правильную работу системы кроветворения, иммунной и эндокринной систем (Lynch RJM and Duckworth RM, 2020; Weiss WP, 2017; Khan MZ, 2022). Нарушения в минеральном

обмене, вызванные избытком или недостатком микроэлементов, в организме коров приводят к отклонениям в работе отдельных систем, развитию патологий и заболеваний у сельскохозяйственных животных (Эленшлегер А.А. и Афанасьев К.А., 2017; Kalaeva E et al., 2020). При составлении рационов для крупного рогатого скота особое внимание уделяют содержанию таких микроэлементов, как железо, медь, цинк, марганец, йод, кобальт и селен (Калашников А.П. и др., 2003; Séboussi R et al., 2016). Данные микроэлементы оказывают значительное влияние на здоровье дойных коров, продуктивность и воспроизводительные функции (Grešáková et al., 2021; Anchordoquy JM et al., 2019).

Поступление необходимых микроэлементов в организм сельскохозяйственных животных обуславливается составом рациона, тогда как их усвоение или выведение из организма связано с работой желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и его здоровьем (Plaizier JC et al., 2018). Одним из ключевых факторов, определяющим эффективность расщепления и усвоения компонентов корма является микробиом ЖКТ.

Микробиом ЖКТ жвачных животных является сложной системой, которая определяет эффективность процесса пищеварения и участвует в поддержании иммунного гомеостаза кишечника. Процессы переваривания питательных веществ в ЖКТ жвачных животных имеют основополагающее значение для продуктивности и здоровья животных (Zhang L et al., 2023).

Наряду с рубцом и тонким кишечником выделяют важную роль пищеварительных процессов, протекающих в толстом отделе кишечника. Микробиом толстого кишечника жвачных животных осуществляет расщепления питательных компонентов корма, не переваренных в рубце, и синтез ферментов, короткоцепочечных жирных кислот, метаболизм аминокислот и вторичных метаболитов (Virgínio Júnior GF and Bittar CMM, 2021). Микробные процессы, протекающие в толстом кишечнике, являются важным источником энергии для всех остальных метаболических процессов и опосредованно влияют на все этапы переваривания и усвоения компонентов корма (Teseo S et al., 2022; Wang L et al., 2023). В ряде исследований описана взаимосвязь между микробиотой кишечника и продуктивностью жвачных животных (Prasetyono BWNE et al., 2022; Liu L et al., 2023). Отмечается взаимосвязь между обилием ряда таксонов в фекальной микробиоте, маркерами воспаления в сыворотке крови и изменениями в продуктивности животных (Loch M et al., 2024). Однако закономерности изменения таксономического состава микробиома ЖКТ на фоне дефицита или избытка микроэлементов в организме животных является не достаточным.

Цель исследования.

Исследование взаимосвязи между элементным составом волоса животных, молока и состоянием микробиома толстого кишечника.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Коровы чёрно-пёстрой породы возрастом 4-5 лет.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Протокол настоящего исследования одобрен комитетом по Биоэтике ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (протокол № 1 от 17.01.2024).

Схема эксперимента. Исследование было выполнено на коровах чёрно-пёстрой породы (ЗАО «Калинина», Ташлинский район). В эксперименте использованы животные (n=60), подобранные методом пар-аналогов по возрасту (4-5 лет), живой массе (600-650 кг), месяцу лактации (50-60 суток после отёла) и находящиеся в одинаковых условиях содержания. Коровы были клинически здоровы и находились на пастбищном содержании. Рацион составлен согласно рекомендациям по кормлению для дойных коров и представлен в таблице 1 (Калашников А.П. и др., 2003). На основании сравнения данных элементного состава волоса коров с физиологическими нормами

животные были разделены на 2 группы (n=15): I группа (контроль) – уровень микроэлементов (Cu, Zn, Co, Se, Mn, Fe) в пределах физиологической нормы, II группа – уровень микроэлементов ниже физиологической нормы или находится в пределах нижней границы. За физиологическую норму были приняты референтные интервалы по содержанию элементов в волосе коров молочной направленности (Мирошников С.А. и др., 2019б). Отбор проб волоса проводился в верхней части холки (0,4 г) (Мирошников С.А. и др., 2019а).

Исследование таксономического состава микробиома у животных I и II групп (n=5) проводилось в толстом кишечнике. Содержимое толстого кишечника отбирали с использованием стерильного инструмента в пробирки с раствором консерванта (DNA/RNA Shield, США), после чего замораживали при температуре -60 °С.

Таблица 1. Состав рациона
Table 1. Composition of the diet

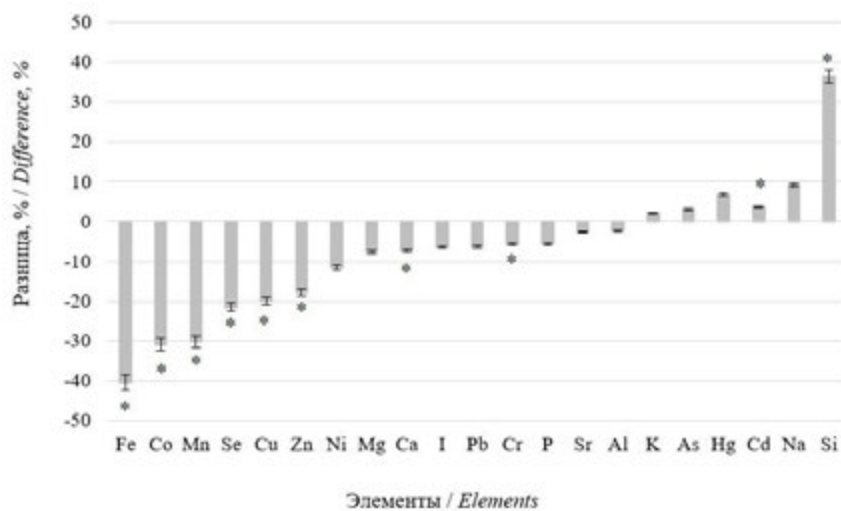
Корма / diets	Количество на голову в сутки / Quantity per head per day
Трава пастбищ, кг / Pasture grass, kg	50,0
Сено, кг/ Hay, kg	1,5
Комбикорм, кг / Compound feed, kg	6,0
Ячмень плющ.,экструд., кг / Barley ivy, extruded, kg	1,0
Патока, кг / Molasses, kg	0,75
Соль поваренная, г / Table salt, g	75,0
Ca, г / Ca, g	52,3
P, г / P, g	30,1
Mg, г / Mg, g	21,6
K, г / K, g	61,2
Co, г / Co, g	4,98
Cu, г / Cu, g	68,4
Fe, г / Fe, g	580,9
I, г / I, g	2,71
Mn, г / Mn, g	429,0
Zn, г / Zn, g	385,6
S, г / S, g	26,2

Оборудование и технические средства. Элементный анализ волоса и молока животных проводился в ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф> на одноквадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7900 ICP-MS (Agilent, США). Исследование микробиома толстого кишечника проводилось с помощью NGS-секвенирования на платформе MiSeq (Illumina, США) в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН (Оренбург, Россия).

Статистический анализ. Статистический анализ проводили с помощью офисного программного комплекса Microsoft Office с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 10.0» («StatSoft Inc.», США). Достоверными считали результаты при $P \leq 0,05$ (U-критерий Манна-Уитни). Анализ бактериальных сообществ микробиома толстого кишечника включал расчёт альфа-разнообразия (индекс Chao1, индекс разнообразия Шенона (Shannon), индекс разнообразия Симпсона (Simpson), статистический метод: Mann-Whitney) и бета-разнообразия (метод ординации: NMDS; дистанционный метод: индекс Брея-Кертиса; статистический метод: PERMANOVA).

Результаты исследований.

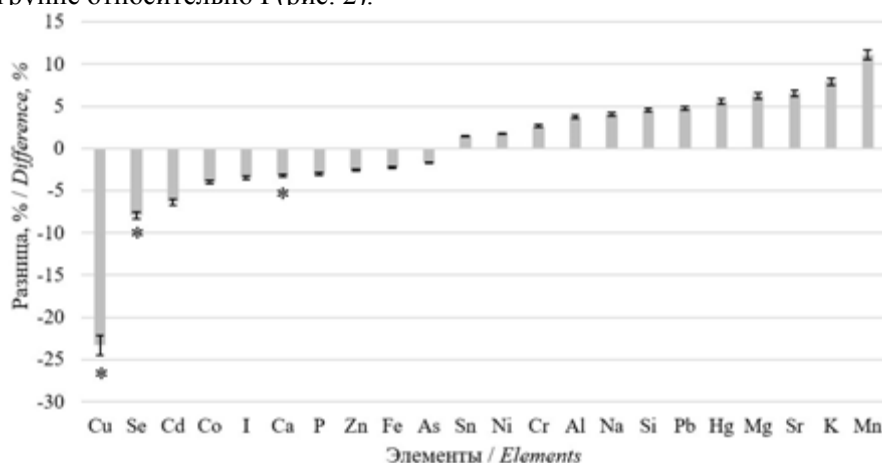
Анализ элементного состава волоса коров позволил выявить группу животных из общей выборки с более низким содержанием селена, меди, кобальта и марганца в сравнении с физиологическими нормами. Во II группе в сравнении с I уровень селене, меди, кобальта цинка, железа и марганца был достоверно ($P \leq 0,05$) ниже на 21,4; 20; 30,1; 17,9; 40,3 и 30,2 % (рис. 1). Также в волосах коров II группы было отмечено более низкое содержание кальция (-7,3 %, $P \leq 0,05$) и хрома (-5,67 %, $P \leq 0,05$) и более высокая концентрация кремния (+36,4 %, $P \leq 0,05$). Оценка содержания токсичных элементов в волосах коров группы II показала более высокие концентрации ртути (+6,73 %, $P \leq 0,05$) в сравнении с группой I.



Примечание: * – $P \leq 0,05$ / Note: * – $P \leq 0.05$

Рисунок 1. Разница по величине концентраций химических элементов в волосе коров II группы в сравнении с I
 Figure 1. Difference in concentrations of chemical elements in the hair of cows of group II in comparison with group I

Сравнение элементного состава молока исследуемых животных показало аналогичные изменения только по содержанию меди (-23,3 %, $p \leq 0,05$), кальция (-3,19 %, $p \leq 0,05$) и селена (-7,96 %, $p \leq 0,05$) во II группе относительно I (рис. 2).



Примечание: * – $P \leq 0,05$ / Note: * – $P \leq 0.05$

Рисунок 2. Разница по величине концентраций химических элементов в молоке коров II группы в сравнении с I
 Figure 2. The difference in the concentration of chemical elements in the milk of cows of group II compared to group I

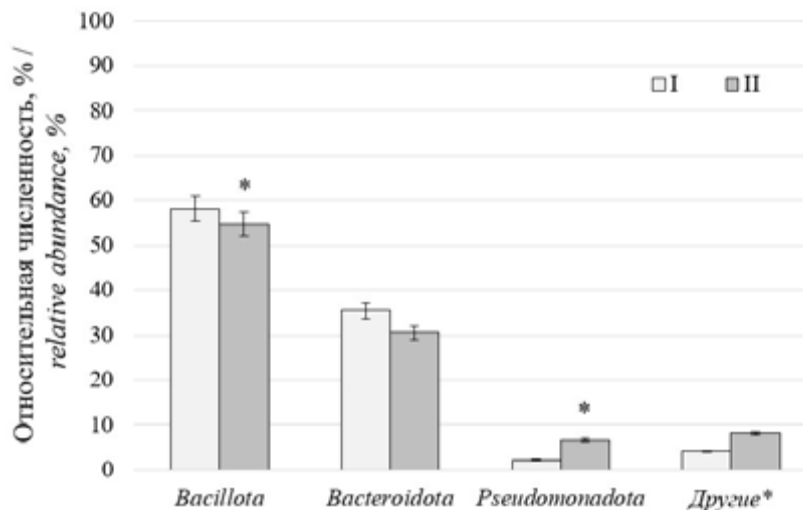
Корреляционный анализ (по Спирмену) по элементному составу молока и волоса животных II группы был проведён для элементов с достоверными различиями между группами (табл. 3). Выявлена сильная положительная корреляционная связь для концентраций селена в волосе и этого же элемента – в молоке. Аналогично сильная положительная корреляция была отмечена для концентраций кальция в молоке и волосе животных.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (по Спирмену) между содержанием химических элементов металлов в волосе и молоке коров II группы
 Table 3. Correlation coefficients (according to Spearman) between the content of chemical elements of metals in hair and milk of cows of group II

Элементы молока / <i>Elements of milk</i>	Элементы волос / <i>Hair Elements</i>								
	Fe	Zn	Mn	Co	Cu	Se	Ca	Cr	Hg
Cu	0,43	0,18	-0,01	0,12	-0,21	-0,15	0,17	0,31	0,58
Se	-0,37	0,14	0,35	0,17	0,38	0,66*	0,52	0,18	-0,44
Ca	0,39	0,24	0,55	0,08	0,05	-0,17	0,76*	0,26	0,33

Примечание: * – значимые корреляции на уровне $P \leq 0,05$
 Note: * – significant correlations at the level of $P \leq 0.05$

Исследование бактериального состава микробиома толстого кишечника коров исследуемых групп показало, что основная доля идентифицированных бактерий относится к филумам *Bacteroidota* (30,6-35,5 %) и *Bacillota* (54,7-58,2 %) (рис. 3). Минорной группой в микробиоме толстого кишечника являлись бактерии таксона *Pseudomonadota* (2,2-6,6 %) в обеих опытных группах.



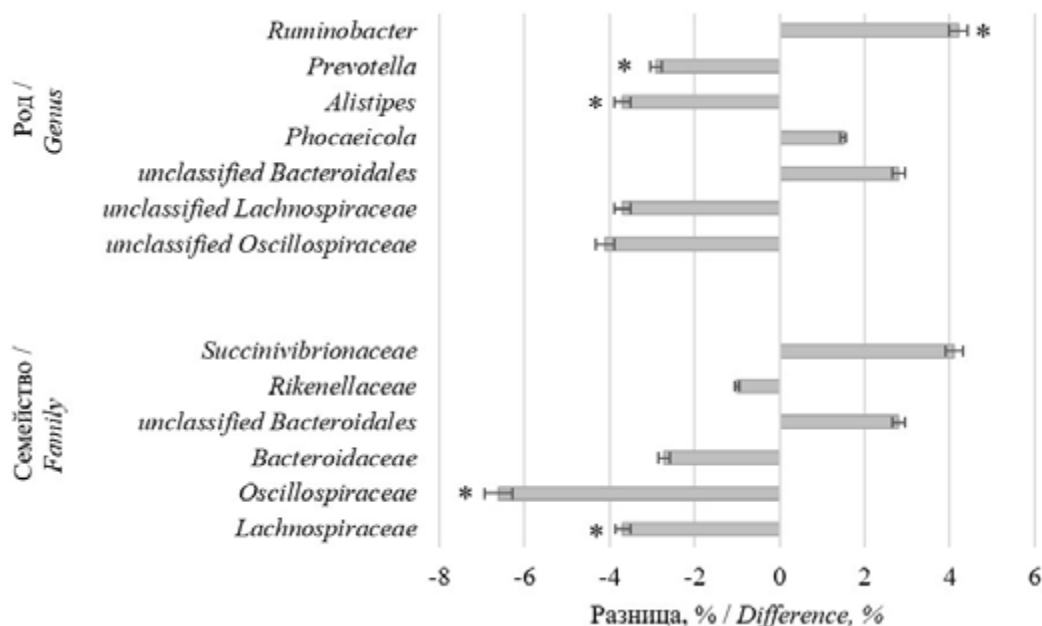
Примечание: * – $P \leq 0,05$ /Note: * – $P \leq 0.05$

Рисунок 3. Обилие таксономических групп (на уровне филума) в микробиоме толстого кишечника коров I и II

Figure 3. Abundance of taxonomic groups (at the phylum level) in the colon microbiome of cows I and II

Значимые различия между таксономическими составами микробиомов толстого кишечника при сравнении II группы с I были отмечены на уровне семейств и родов (рис. 4). Во II группе в сравнении с I была выявлена более низкая доля бактерий семейств *Lachnospiraceae* (-3,68 %,

$P \leq 0,05$) и *Oscillospiraceae* (-6,6 %, $P \leq 0,05$), р. *Alistipes* (-3,51 %, $P \leq 0,05$) и р. *Prevotella* (-2,9 %, $P \leq 0,05$). Также отмечено в микробиоме кишечника II группы, при сравнении с I, более низкая относительная численность *unclassified Oscillospiraceae* (-4,1 %, $P \leq 0,05$) и *unclassified Lachnospiraceae* (-3,69 %, $P \leq 0,05$). Наоборот, доля микроорганизмов *Succinivibrionaceae* (р. *Ruminobacter*) в микробиоме толстого кишечника коров II группы была выше чем в I группе на 4,2 % ($P \leq 0,05$).



Примечание: * – $P \leq 0,05$

Note: * – $P \leq 0,05$

Рисунок 4. Различия в обилии таксономических групп (на уровне семейств и рода) в микробиоме толстого кишечника коров II группы в сравнении с I

Figure 4. Differences in the abundance of taxonomic groups (at the family and genus level) in the large intestine microbiome of cows of group II compared to group I

Расчёт индексов альфа-разнообразия для микробиоты толстого кишечника показал более низкие значения во II группе в сравнении с I, что свидетельствовало о снижении таксономического разнообразия и видового богатства в микробиоме (табл. 4).

Таблица 4. Индексы альфа-разнообразия микробиоты толстого кишечника коров I и II групп
Table 4. Alpha diversity indices of the large intestine microbiota of cows of groups I and II

Группа / Group	Индекс альфа-разнообразия / Alpha diversity index		
	Chao 1	Shannon	Simpson
I	298,4±1,87	2,66±0,03	0,92±0,005
II	273,2±1,55***	2,32±0,04***	0,77±0,008**

Примечание: ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$

Note: ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$

Анализ бета-разнообразия микробиомов исследуемых групп показал отсутствие различий в организации бактериальных сообществ ($p=0,018$) (рис. 5).

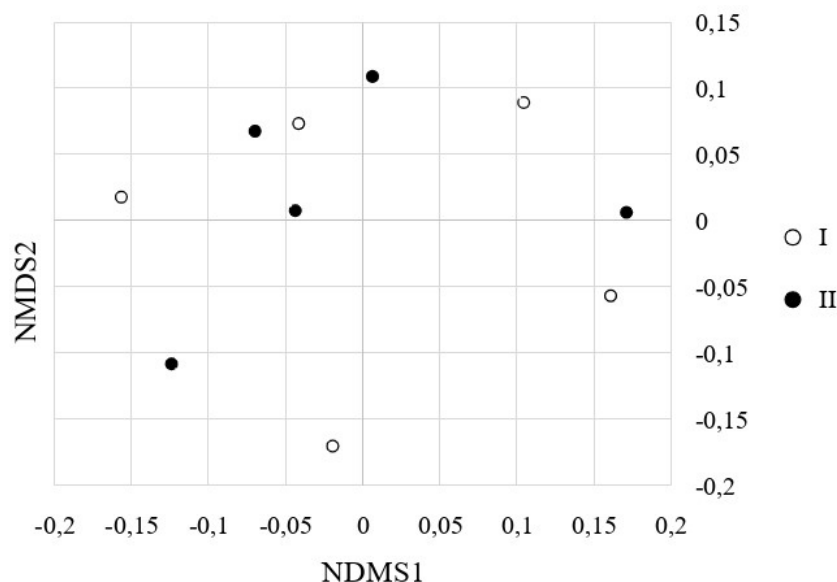


Рисунок 5. Бета-разнообразие микробиоты толстого кишечника коров I и II групп

Figure 5. Beta diversity of the colon microbiota of cows of groups I and II

Обсуждение полученных результатов.

Микроэлементы в кормлении жвачных животных являются важным фактором, определяющим их здоровье и темпы роста (Ramah A et al., 2023). Изменения в минеральном обмене организма животного на фоне дефицита или избытка отдельных микроэлементов оказывают влияние как на здоровье самого животного, в частности на эффективность работы отдельных систем, так и на качество получаемой продукции (Numa Pompilio CG et al., 2021).

В нашем исследовании у животных с более низким содержания кобальта, марганца, цинка, меди, селена и кальция в волосе наблюдалось также более высокое содержание ртути и никеля. Аналогичные взаимосвязи между содержанием эссенциальных и токсичных микроэлементов были описаны при исследовании волоса коров других пород (Miroshnikov S et al., 2021). Предполагаем, что изменение концентрации одного элемента в организме может оказывать косвенное влияние на содержание другого, что могло являться одной из причин более высокого содержания ртути и более низкой концентрации селена у животных во II группе в сравнении с I. Как известно, селен и ртуть – это взаимные антагонисты (Afzal A and Mahreen N, 2024). Также ртуть является мощным блокатором каналов транспорта кальция в клетках крупного рогатого скота, что также могло обуславливать его более низкую концентрацию у животных II группы относительно I (Weinsberg F et al., 1995). Отмечается, что дефицит кальция, цинка, железа, селена, меди, хром и марганец способствует накоплению токсичных металлов в организме (Chowdhury BA and Chandra RK, 1987).

Изменения элементного состава волоса животных согласовывались с изменениями количества некоторых минеральных веществ в молоке. Была выявлена высокая корреляция между содержанием селена и кальция в волосе коров и их концентраций в молоке. Аналогично в работе Mehdi Y и Dufrasne I (2016) отмечается, что изменения в усвоении селена ведут к изменению его концентрации в молоке. Однако увеличения содержания токсичных элементов в молоке, в сравнении с контрольной группой, на фоне их более высокого содержания в организме отмечено не было. Возможно, это обусловлено тем, что скорость накопления токсичных микроэлементов в организме животных и скорость их поступления в молочные продукты различна, так как первично создание избытка элемента в почках и печени (Sharma RP et al., 1982).

Вероятно, причиной накопления или дефицита элемента в организме при содержании животных в одинаковых условиях являлась совокупность таких факторов, как особенности обмена веществ животного, уровень продуктивности и элементный состав пастбищной травы (Nemes LM et al., 2012; Мирошников С.А. и др., 2019б).

На фоне различий в содержании ряда микроэлементов в организме исследуемых животных особый интерес вызывают изменения в микробиоте ЖКТ крупного рогатого скота. Микробиом ЖКТ крупного рогатого скота считают скрытым метаболическим органом, и от эффективности его работы во многом зависит степень расщепления и усвоения питательных веществ и, как следствие, показатели продуктивности животного. Поэтому оценка таксономического состава микробиома ЖКТ жвачных животных на фоне изменений в содержании ряда микроэлементов в организме является важным аспектом в понимании уровня обменных процессов и прогнозирования будущей продуктивности.

Таксономический состав микробиома коров с содержанием эссенциальных микроэлементов ниже физиологической нормы характеризовался более низкими значениями индексов биоразнообразия и меньшей долей бактерий, осуществляющих синтез короткоцепочечных жирных кислот. Выявлено увеличение доли бактерий *Pseudomonadota* и снижение доли микроорганизмов, относящихся к *Bacillota*. В рамках таксона *Bacillota* наблюдалось снижение доли бактерий семейства *Lachnospiraceae*, являющихся активными продуцентами бутирата, микроорганизмов р. *Prevotella* и р. *Alistipes*, которые обеспечивают в кишечнике синтез ацетата, бутирата, пропионата (Li RW et al., 2012; Zhang B et al., 2022). Численность бактерии р. *Alistipes* и р. *Prevotella* в кишечнике в ряде исследований связывают с нормальным функционированием кишечника крупного рогатого скота, так как они являются продуцентами энергетического субстрата для эпителиальных клеток толстого кишечника крупного рогатого скота (Wang Y et al., 2022; Xue MY et al., 2020). Полученные данные согласуются с результатами отдельных работ, проведённых на различных организмах, по влиянию изменений содержания микро- и макроэлементов на кишечную микробиоту. В исследовании на мышцах показано, что дефицит железа приводит к снижению бактерий р. *Prevotella* (Smith AD et al., 2018). Аналогично в исследовании на свиньях показано, что дефицит железа негативно сказывается на доле бактерий семейств *Lachnospiraceae* и *Ruminococcaceae* в микробиоме толстого кишечника. Увеличение концентраций никеля в организме способно приводить к снижению биоразнообразия в микробиоте кишечника мышей и численности бактерий таксона *Lachnospiraceae* (Zhou X et al., 2019).

В результате нами было отмечено снижение доли бактерий, связанных с энергетическими процессами в кишечнике, на фоне недостатка ряда элементов в организме, что может негативно сказаться на работе всей системы пищеварения.

В то же время в рамках таксона *Pseudomonadota* выявлено увеличение доли бактерий р. *Ruminobacter*, которые являются амилалитическими микроорганизмами и метаболизируют углеводы с образованием сукцинат и формиат, что будет приводить к изменениям направленности метаболических процессов в кишечнике, в том числе в энергетическом метаболизме (Stackebrandt E, 2015; Niwiska B, 2012). В исследованиях отмечается отрицательная взаимосвязь между долей бактерий таксона *Pseudomonadota* в кишечнике и уровнем потребления селена (Zhang X et al., 2022).

Изменения бактериального состава микробиома ЖКТ крупного рогатого скота на фоне воздействия различных факторов неизбежно приводят к изменению в работе всей системы пищеварения (Лиходеевский ГА и др., 2024). Снижение содержания пропионата, ацетата и бутирата в ЖКТ может оказывать влияние на метаболизм глюкозы, что приведёт к уменьшению секреции молочного жира и молочного белка (Qin L et al., 2022; Izumi K et al., 2019).

Учитывая двунаправленную взаимосвязь между составом микробиома ЖКТ и содержанием отдельных элементов, изменения, вызванные недостатком микроэлементов, будут влиять на усвоение микроэлементов в кишечнике.

Согласно литературным источникам, микробиота кишечника является барьером для всасывания ряда элементов путём изменения pH или концентрации метаболитов, участвующих в иммунологических реакциях и энергетических процессах (Claus SP et al., 2011). Предполагается, что микробиота ЖКТ может изменять метаболизм токсичных веществ и выводить их из организма (Collins SL and Patterson AD, 2020).

Однако для некоторых кишечных бактерий, оказывающих влияние на здоровье кишечника, описано положительное влияние на усвоение микроэлементов (Collins JF et al., 2018). Отмечается, что короткоцепочечные жирные кислоты (в том числе бутират) микробного происхождения способны улучшать функции эпителиального барьера кишечника, оказывая влияние на всасывание веществ (Zheng L et al., 2017). Некоторые виды микроорганизмов могут повышать биодоступность селена и защищать организм хозяина от токсичности селена (Ferreira RLU et al., 2021).

Снижение доли бактерий таксона *Bacillota* и увеличение относительной численности флоры *Pseudomonadota*, вероятно, будет приводить к недостатку цинка в организме хозяина. Описано конкурентное поглощение цинка бактериями таксона *Pseudomonadota* в кишечнике, что может снижать количество цинка, доступного для макроорганизма (Reed S et al., 2015).

Заключение.

Таким образом, была выявлена взаимосвязь между содержанием микроэлементов в волосе коров, их количеством в молоке и особенностями таксономического состава микробиома толстого кишечника. У животных с содержанием цинка, меди, кобальта, марганца и селена в пределах референтных значений отмечалась высокая доля бактерий в кишечнике, продуцирующих бутират, ацетат и пропионат. Для животных с недостатком эссенциальных микроэлементов, в сравнении с рекомендуемым референтным диапазоном, было характерно увеличение в микробиоме доли бактерий, продуцирующих сукцинат и формиат. В результате отмечалась тенденция к изменению бактериального состава микробиома на фоне снижения содержания ряда элементов в волосе коров, что неизбежно будет приводить к изменениям в метаболических процессах в ЖКТ. Полученные данные показывают важность изучения микробиоты ЖКТ на фоне дисбаланса микроэлементов в организме животных и перспективы управления метаболическими процессами в кишечнике путём коррекции элементозов.

Список источников

1. Влияние добавок Zn, Cu, Mn и Fe, хелатированных глицином, на некоторые параметры молока и уровни микроэлементов в сыворотке молочных коров / Д.В. Гойлян, Р.Т. Кристина, А.О. Дома, Е. Думитреску, Р.Ф. Моружи, Д.М. Деги, С.А. Орасан, Ф. Муселин // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 3. С. 40-46. [Goilean DV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Moruzi RF, Degi DM, Orasan SA, Muselin F. Effects of glycine chelated Zn, Cu, Mn and Fe supplementation on some milk parameters and serum trace elements levels in dairy cows. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(3):40-46. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-40 doi: 10.33284/2658-3135-105-3-34
2. Воронина ОА, Боголюбова НВ, Зайцев СЮ Минеральные элементы в составе молока коров - мини-обзор // Сельскохозяйственная биология. 2022. № 4. С. 681-693. [Voronina OA, Bogolyubova NV, Zaitsev SY Mineral elements in the composition of cow's milk - mini-review. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2022;4:681-693. (In Russ.)]. doi: 10.15389/agrobiology.2022.4.681rus. doi: 10.15389/agrobiology.2022.4.681eng
3. Лиходеевский Г.А., Богатова П.С., Лиходеевская О.Е. Бактериальная микробиота желудочно-кишечного тракта крупного рогатого скота молочного направления: состав, функции, значение (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т25. №2. С. 159–171. [Lihodeevsky GA, Bogatova PS, Lihodeevskaya OE. The bacterial microbiota of the gastrointestinal tract of dairy cattle:

structure, functions, importance (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(2):159–171. (*In Russ.*). doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.159-171

4. Мирошников СА, Завьялов ОА, Фролов АН. Влияние концентрации свинца в шерсти на межэлементное взаимодействие и молочную продуктивность голштинских коров. *Животноводство и кормопроизводство*. 2019а. Т.102. № 1. С. 54-70. [Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN. Effect of lead concentration in hair on elemental interrelation and milk production of the Holstein cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019а;102(1):54-70. (*In Russ.*).] doi: 10.33284/2658-3135-102-1-54

5. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / А.П. Калашников и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 2003. 456 с. [Kalashnikov AP, et al. *Normy i ratsiony kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh: sprav. posobie*. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Agropromizdat; 2003:456 p. (*In Russ.*).].

6. Референтные интервалы концентраций химических элементов в шерсти молочных коров / С.А. Мирошников, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов, М.Я. Курилкина, Е.А. Тяпугин, Х.Х. Тагиров // *Животноводство и кормопроизводство*. 2019б. Т. 102. No 3. С. 33-45. [Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Kurilkina MYa, Tyapugin EA, Tagirov KhKh. Reference ranges of concentrations of chemical elements in the wool of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019b;102(3):33-45. (*In Russ.*).] doi: 10.33284/2658-3135-102-3-33

7. Эленшлегер А.А., Афанасьев К.А. К проблеме нарушения минерального обмена веществ у коров // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2017. № 3(149). С. 143-148. [Elenschleger AA, Afanasyev KA. On the issue of mineral metabolic disorder in cows. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017;3(149):143-148. (*In Russ.*).].

8. Afzal A, Mahreen N. Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. *Front Pharmacol*. 2024;15:1375137. doi: 10.3389/fphar.2024.1375137

9. Anchordoquy JM, Anchordoquy JP, Galarza EM, Farnetano NA, Giuliodori MJ, Nikoloff N, Fazzio LE, Furnus CC. Parenteral zinc supplementation increases pregnancy rates in beef cows. *Biological Trace Element Research*. 2019;192(2):175-182. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-1651-8>

10. Chowdhury BA, Chandra RK. Biological and health implications of toxic heavy metal and essential trace element interactions. *Progress in Food & Nutrition Science*. 1987;11(1):55-113

11. Claus SP, Ellero SL, Berger B, Krause L, Bruttin A, Molina J, et al. Colonization-induced host-gut microbial metabolic interaction. *MBio*. 2011;2(2):e00271–10. doi: 10.1128/mBio.00271-10

12. Collins SL, Patterson AD. The gut microbiome: an orchestrator of xenobiotic metabolism. *Acta Pharm Sin B*. 2020;10(1):19-32. doi: 10.1016/j.apsb.2019.12.001

13. Collins JF, Flores SRL, Wang X, Anderson GJ. Mechanisms and Regulation of Intestinal Iron Transport. *Physiology of the Gastrointestinal Tract (Sixth Edition)*. 2018:1451-1483. doi: 10.1016/b978-0-12-809954-4.00060-8

14. de Sousa Ferreira JM, de Almeida Araújo C, dos Santos Pessoa RM, Costa Gois G, Sena Campos F, Laet Almeida Vicente S, dos Santos Pessoa AM, Correia da Cunha Castro Costa D, da Silva Azevêdo P, y Oliveira Lima D. Vitaminas e minerais na nutrição de bovinos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*. 2023;15(2):e969. doi: 10.24188/recia.v15.n2.2023.969

15. Ferreira RLU, Sena-Evangelista KCM, de Azevedo EP, Pinheiro FI, Cobucci RN, Pedrosa LFC. Selenium in human health and gut microflora: Bioavailability of selenocompounds and relationship with diseases. *Front Nutr*. 2021;8:685317. doi: 10.3389/fnut.2021.685317

16. Grešáková Ľ, Holodová M, Szumacher-Strabel M, et al. Mineral status and enteric methane production in dairy cows during different stages of lactation. *BMC Vet Res*. 2021;17:287. doi: 10.1186/s12917-021-02984-w

17. Izumi K, Fukumori R, Oikawa S, Oba M. Short communication: Effects of butyrate supplementation on the productivity of lactating dairy cows fed diets differing in starch content. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(12):11051-11056. doi: 10.3168/jds.2019-17113

18. Kalaeva E, Kalaev V, Chernitskiy A, Alhamed M, Safonov V. Incidence risk of broncho-pneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis. *Vet World*. 2020;13(5):987-995. doi: 10.14202/vetworld.2020.987-995
19. Khan MZ, Ma Y, Xiao J, Chen T, Ma J, Liu S, Wang Y, Khan A, Alugongo GM, Cao Z. Role of selenium and vitamins E and B9 in the alleviation of bovine mastitis during the periparturient period. *Antioxidants* (Basel, Switzerland). 2022;11(4):657. doi: 10.3390/antiox11040657
20. Lynch RJM and Duckworth RM. Chapter 4: Microelements: Part I: Zn, Sn, Cu, Fe and I. In: Zohoori FV, Duckworth RM, Zohoori V, Duckworth R, editors. *Monographs in oral science*. 2020;28:32-47. doi: 10.1159/000499007
21. Liu L, Wu P, Guo A, Yang Y, Chen F and Zhang Q. Research progress on the regulation of production traits by gastrointestinal microbiota in dairy cows. *Front Vet Sci*. 2023;10:1206346. doi: 10.3389/fvets.2023.1206346
22. Loch M, Dorbek-Sundström E, Husso A, Pessa-Morikawa T, Niine T, Kaart T, Mõtus K, Niku M, Orro T. Associations of neonatal dairy calf faecal microbiota with inflammatory markers and future performance. *Animals*. 2024;14(17):2533. doi: 10.3390/ani14172533
23. Li RW, Wu S, Baldwin RL, Li W and Li C. Perturbation dynamics of the rumen microbiota in response to exogenous butyrate. *PLoS One*. 2012;7(1):e29392. doi: 10.1371/journal.pone.0029392
24. Mehdi Y, Dufrasne I. Selenium in cattle: A review. *Molecules* (Basel, Switzerland). 2016;21(4):545. doi: 10.3390/molecules21040545
25. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
26. Nemec LM, Richards JD, Atwell CA, Diaz DE, Zanton GI, Gressley TF. Immune responses in lactating Holstein cows supplemented with Cu, Mn, and Zn as sulfates or methionine hydroxy analogue chelates. *J Dairy Sci*. 2012;95(8):4568-4577. doi: 10.3168/jds.2012-5404
27. Niwiska B. Digestion in Ruminants. [Internet]. *Carbohydrates - comprehensive studies on glycobiology and glycotecnology*. InTech. 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/51574>
28. Numa Pompilio CG, Francisco CS, Marco Tulio FM, Sergio Samuel SM, Fernanda Eliza GJ. Heavy metals in blood, milk and cow's urine reared in irrigated areas with wastewater. *Heliyon*. 2021;7(4):e06693. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06693
29. Plaizier JC, Danesh Mesgaran M, Derakhshani H, Golder H, Khafipour E, Kleen JL, Lean I, Loor J, Penner G, Zebeli Q. Review: Enhancing gastrointestinal health in dairy cows. *Animal*. 2018;12(s2):s399-s418. doi: 10.1017/S1751731118001921
30. Prasetyono BWHE, Widiyanto W, Pandupuspitasari NS. Retracted: Gut microbiota profiles in dairy cattle from highland and coastal regions using shotgun metagenomic approach. *BioMed Research International*. 2022;2022(1):3659052. doi: 10.1155/2022/3659052
31. Qin L, Yao W, Wang T, Jin T, Guo B, Wen S, Huang F. Targeting gut microbiota-derived butyrate improves hepatic gluconeogenesis through the cAMP-PKA-GCN5 pathway in late pregnant sows. *Food & Function*. 2022;13(8):4360-4374. doi: 10.1039/d2fo00094f
32. Ramah A, Kato T, Shinya U, Baakhtari M, Imatake S, Jadi AR, Yasuda M. Effects of maternal supplementation with organic trace minerals including zinc, manganese, copper, and cobalt during the late and post-partum periods on the health and immune status of japanese black calves. *Animals*. 2023;13(23):3679. doi: 10.3390/ani13233679
33. Reed S, Neuman H, Moscovich S, Glahn RP, Koren O, Tako E. Chronic zinc deficiency alters chick gut microbiota composition and function. *Nutrients*. 2015;7(12):9768-9784. doi: 10.3390/nu7125497
34. Séboussi R, Tremblay GF, Ouellet V, Chouinard PY, Chorfi Y, Bélanger G, Charbonneau É. Selenium-fertilized forage as a way to supplement lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016;99(7):5358-5369. doi: 10.3168/jds.2015-10758

35. Sharma RP, Street JC, Shupe JL, Bourcier DR. Accumulation and depletion of cadmium and lead in tissues and milk of lactating cows fed small amounts of these metals. *J Dairy Sci.* 1982; 65(6):972-979. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(82)82298-4
36. Smith AD, Panickar KS, Urban JF, Dawson HD. Impact of micronutrients on the immune response of animals. *Annual Review of Animal Biosciences.* 2018;6:227-254. doi: 10.1146/annurev-animal-022516-022914
37. Stackebrandt ES. *Ruminobacter.* 2015. doi: 10.1002/9781118960608.gbm01085
38. Teseo S, Otani S, Brinch C. et al. A global phylogenomic and metabolic reconstruction of the large intestine bacterial community of domesticated cattle. *Microbiome.* 2022;10(1):155. doi: 10.1186/s40168-022-01357-1
39. van der Reijden OL, Galetti V, Herter-Aeberli I, Zimmermann MB, Zeder C, Krzystek A, Haldimann M, Barmaz A, Kreuzer M, Berard J, Schlegel P. Effects of feed iodine concentrations and milk processing on iodine concentrations of cows' milk and dairy products, and potential impact on iodine intake in Swiss adults. *British Journal of Nutrition.* 2019;122(2):172-185. doi: 10.1017/S0007114519001041
40. Virgínio Júnior GF, Bittar CMM. Microbial colonization of the gastrointestinal tract of dairy calves - a review of its importance and relationship to health and performance. *Animal Health Research Reviews.* 2021;22(2):97-108. doi: 10.1017/S1466252321000062
41. Wagner JJ, Edwards-Callaway LN, Engle TE. Vitamins and trace minerals in ruminants: confinement feedlot. *Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice.* 2023;39(3):505-516. doi: 10.1016/j.cvfa.2023.06.005
42. Weinsberg F, Bickmeyer U, Wiegand H. Effects of inorganic mercury (Hg²⁺) on calcium channel currents and catecholamine release from bovine chromaffin cells. *Archives of Toxicology.* 1995;69(3):191-196. doi: 10.1007/s002040050157
43. Weiss WP. A 100-Year Review: From ascorbic acid to zinc-Mineral and vitamin nutrition of dairy cows. *Journal of Dairy Science.* 2017;100(12):10045-10060. doi: 10.3168/jds.2017-12935
44. Xue MY, Sun HZ, Wu XH, Liu JX, Guan LL. Multi-omics reveals that the rumen microbiome and its metabolome together with the host metabolome contribute to individualized dairy cow performance. *Microbiome.* 2020;8(1):64. doi: 10.1186/s40168-020-00819-8
45. Wang Y, Zhao Y, Nan X, Wang Y, Cai M, Jiang L, Luo Q, Xiong B. Rumen-protected glucose supplementation alters fecal microbiota and its metabolic profiles in early lactation dairy cows. *Front Microbiol.* 2022;13:1034675. doi: 10.3389/fmicb.2022.1034675
46. Wang L, Wu D, Zhang Y, Li K, Wang M, Ma J. Dynamic distribution of gut microbiota in cattle at different breeds and health states. *Front Microbiol.* 2023;14:1113730. doi: 10.3389/fmicb.2023.1113730
47. Zhang B, Liu N, Hao M, Zhou J, Xie Y, He Z. Plant-derived polysaccharides regulated immune status, gut health and microbiota of broilers: a review. *Front Vet Sci.* 2022;8:791371. doi: 10.3389/fvets.2021.791371
48. Zhang X, Jia L, He H, Yin H, Ming J, Hou T, Xiang J. Modulation of oxidative stress and gut microbiota by selenium-containing peptides from *Cardamine ensiensis* and structural-based characterization. *Food Chem.* 2022;395:133547. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133547
49. Zhang L, Shen H, Zhang J, Mao S. Variety of rumen microbial populations involved in biohydrogenation related to individual milk fat percentage of dairy cows. *Front Vet Sci.* 2023;10:1106834. doi: 10.3389/fvets.2023.1106834
50. Zheng L, Kelly CJ, Battista KD, Schaefer R, Lanis JM, Alexeev EE, Wang RX, Onyiah JC, Kominsky DJ, Colgan SP. Microbial-derived butyrate promotes epithelial barrier function through IL-10 receptor-dependent repression of Claudin-2. *J Immunol.* 2017;199(8):2976-2984. doi: 10.4049/jimmunol.1700105
51. Zhou X, Li J, Sun JL. Oral nickel changes of intestinal microflora in mice. *Curr Microbiol.* 2019;76:590-596. doi: 10.1007/s00284-019-01664-1

References

1. Goilean DV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Moruzi RF, Degi DM, Orasan SA, Muselin F. Effects of glycine chelated Zn, Cu, Mn and Fe supplementation on some milk parameters and serum trace elements levels in dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):34-39. doi:10.33284/2658-3135-105-3-40 doi:10.33284/2658-3135-105-3-34
2. Voronina OA, Bogolyubova NV, Zaitsev SY. Mineral composition of cow's milk – a mini-review. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. 2022;4:681-693. doi: 10.15389/agrobiology.2022.4.681eng
3. Lihodevsky GA, Bogatova PS, Lihodeevskaya OE. The bacterial microbiota of the gastrointestinal tract of dairy cattle: structure, functions, importance (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(2):159–171. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.159-171
4. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN. Effect of lead concentration in hair on elemental interrelation and milk production of the Holstein cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019a; 102(1):54-70. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-54
5. Kalashnikov AP et al. Norms and diets for feeding farm animals: Ref. book. 3rd ed., add. and reworked. Moscow; 2003: 456 p.
6. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Kurilkina MYa, Tyapugin EA, Tagirov KhKh. Reference ranges of concentrations of chemical elements in the wool of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019b; 102(3):33-45. doi: 10.33284/2658-3135-102-3-33
7. Elenschleger AA, Afanasyev KA. On the issue of mineral metabolic disorder in cows. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017;3(149):143-148.
8. Afzal A, Mahreen N. Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. *Front Pharmacol*. 2024;15:1375137. doi: 10.3389/fphar.2024.1375137
9. Anchordoquy JM, Anchordoquy JP, Galarza EM, Farnetano NA, Giuliodori MJ, Nikoloff N, Fazzio LE, Furnus CC. Parenteral zinc supplementation increases pregnancy rates in beef cows. *Biological Trace Element Research*. 2019;192(2):175-182. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-1651-8>
10. Chowdhury BA, Chandra RK. Biological and health implications of toxic heavy metal and essential trace element interactions. *Progress in Food & Nutrition Science*. 1987;11(1):55-113
11. Claus SP, Ellero SL, Berger B, Krause L, Bruttin A, Molina J, et al. Colonization-induced host-gut microbial metabolic interaction. *MBio*. 2011;2(2):e00271–10. doi: 10.1128/mBio.00271-10
12. Collins SL, Patterson AD. The gut microbiome: an orchestrator of xenobiotic metabolism. *Acta Pharm Sin B*. 2020;10(1):19-32. doi: 10.1016/j.apsb.2019.12.001
13. Collins JF, Flores SRL, Wang X, Anderson GJ. Mechanisms and Regulation of Intestinal Iron Transport. *Physiology of the Gastrointestinal Tract (Sixth Edition)*. 2018:1451-1483. doi: 10.1016/b978-0-12-809954-4.00060-8
14. de Sousa Ferreira JM, de Almeida Araújo C, dos Santos Pessoa RM, Costa Gois G, Sena Campos F, Laet Almeida Vicente S, dos Santos Pessoa AM, Correia da Cunha Castro Costa D, da Silva Azevêdo P, y Oliveira Lima D. Vitaminas e minerais na nutrição de bovinos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*. 2023;15(2):e969. doi: 10.24188/recia.v15.n2.2023.969
15. Ferreira RLU, Sena-Evangelista KCM, de Azevedo EP, Pinheiro FI, Cobucci RN, Pedrosa LFC. Selenium in human health and gut microflora: Bioavailability of selenocompounds and relationship with diseases. *Front Nutr*. 2021;8:685317. doi: 10.3389/fnut.2021.685317
16. Grešáková Ľ, Holodová M, Szumacher-Strabel M, et al. Mineral status and enteric methane production in dairy cows during different stages of lactation. *BMC Vet Res*. 2021;17:287. doi: 10.1186/s12917-021-02984-w

17. Izumi K, Fukumori R, Oikawa S, Oba M. Short communication: Effects of butyrate supplementation on the productivity of lactating dairy cows fed diets differing in starch content. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(12):11051-11056. doi: 10.3168/jds.2019-17113
18. Kalaeva E, Kalaev V, Chernitskiy A, Alhamed M, Safonov V. Incidence risk of bronchopneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis. *Vet World*. 2020;13(5):987-995. doi: 10.14202/vetworld.2020.987-995
19. Khan MZ, Ma Y, Xiao J, Chen T, Ma J, Liu S, Wang Y, Khan A, Alugongo GM, Cao Z. Role of selenium and vitamins E and B9 in the alleviation of bovine mastitis during the periparturient period. *Antioxidants* (Basel, Switzerland). 2022;11(4):657. doi: 10.3390/antiox11040657
20. Lynch RJM and Duckworth RM. Chapter 4: Microelements: Part I: Zn, Sn, Cu, Fe and I. In: Zohoori FV, Duckworth RM, Zohoori V, Duckworth R, editors. *Monographs in oral science*. 2020;28:32-47. doi: 10.1159/000499007
21. Liu L, Wu P, Guo A, Yang Y, Chen F and Zhang Q. Research progress on the regulation of production traits by gastrointestinal microbiota in dairy cows. *Front Vet Sci*. 2023;10:1206346. doi: 10.3389/fvets.2023.1206346
22. Loch M, Dorbek-Sundström E, Husso A, Pessa-Morikawa T, Niine T, Kaart T, Mõtus K, Niku M, Orro T. Associations of neonatal dairy calf faecal microbiota with inflammatory markers and future performance. *Animals*. 2024;14(17):2533. doi: 10.3390/ani14172533
23. Li RW, Wu S, Baldwin RL, Li W and Li C. Perturbation dynamics of the rumen microbiota in response to exogenous butyrate. *PLoS One*. 2012;7(1):e29392. doi: 10.1371/journal.pone.0029392
24. Mehdi Y, Dufrasne I. Selenium in cattle: A review. *Molecules* (Basel, Switzerland). 2016;21(4):545. doi: 10.3390/molecules21040545
25. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
26. Nemec LM, Richards JD, Atwell CA, Diaz DE, Zanton GI, Gressley TF. Immune responses in lactating Holstein cows supplemented with Cu, Mn, and Zn as sulfates or methionine hydroxy analogue chelates. *J Dairy Sci*. 2012;95(8):4568-4577. doi: 10.3168/jds.2012-5404
27. Niwiska B. Digestion in Ruminants. [Internet]. *Carbohydrates - comprehensive studies on glycobiology and glycotecnology*. InTech. 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/51574>
28. Numa Pompilio CG, Francisco CS, Marco Tulio FM, Sergio Samuel SM, Fernanda Eliza GJ. Heavy metals in blood, milk and cow's urine reared in irrigated areas with wastewater. *Heliyon*. 2021;7(4):e06693. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06693
29. Plaizier JC, Danesh Mesgaran M, Derakhshani H, Golder H, Khafipour E, Kleen JL, Lean I, Looor J, Penner G, Zebeli Q. Review: Enhancing gastrointestinal health in dairy cows. *Animal*. 2018;12(s2):s399-s418. doi: 10.1017/S1751731118001921
30. Prasetyono BWHE, Widiyanto W, Pandupuspitasari NS. Retracted: Gut microbiota profiles in dairy cattle from highland and coastal regions using shotgun metagenomic approach. *BioMed Research International*. 2022;2022(1):3659052. doi: 10.1155/2022/3659052
31. Qin L, Yao W, Wang T, Jin T, Guo B, Wen S, Huang F. Targeting gut microbiota-derived butyrate improves hepatic gluconeogenesis through the cAMP-PKA-GCN5 pathway in late pregnant sows. *Food & Function*. 2022;13(8):4360-4374. doi: 10.1039/d2fo00094f
32. Ramah A, Kato T, Shinya U, Baakhtari M, Imatake S, Jadi AR, Yasuda M. Effects of maternal supplementation with organic trace minerals including zinc, manganese, copper, and cobalt during the late and post-partum periods on the health and immune status of japanese black calves. *Animals*. 2023;13(23):3679. doi: 10.3390/ani13233679
33. Reed S, Neuman H, Moscovich S, Glahn RP, Koren O, Tako E. Chronic zinc deficiency alters chick gut microbiota composition and function. *Nutrients*. 2015;7(12):9768-9784. doi: 10.3390/nu7125497

34. Séboussi R, Tremblay GF, Ouellet V, Chouinard PY, Chorfi Y, Bélanger G, Charbonneau É. Selenium-fertilized forage as a way to supplement lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016;99(7):5358-5369. doi: 10.3168/jds.2015-10758
35. Sharma RP, Street JC, Shupe JL, Bourcier DR. Accumulation and depletion of cadmium and lead in tissues and milk of lactating cows fed small amounts of these metals. *J Dairy Sci*. 1982; 65(6):972-979. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(82)82298-4
36. Smith AD, Panickar KS, Urban JF, Dawson HD. Impact of micronutrients on the immune response of animals. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2018;6:227-254. doi: 10.1146/annurev-animal-022516-022914
37. Stackebrandt ES. *Ruminobacter*. 2015. doi: 10.1002/9781118960608.gbm01085
38. Teseo S, Otani S, Brinch C. et al. A global phylogenomic and metabolic reconstruction of the large intestine bacterial community of domesticated cattle. *Microbiome*. 2022;10(1):155. doi: 10.1186/s40168-022-01357-1
39. van der Reijden OL, Galetti V, Herter-Aeberli I, Zimmermann MB, Zeder C, Krzystek A, Haldimann M, Barmaz A, Kreuzer M, Berard J, Schlegel P. Effects of feed iodine concentrations and milk processing on iodine concentrations of cows' milk and dairy products, and potential impact on iodine intake in Swiss adults. *British Journal of Nutrition*. 2019;122(2):172-185. doi: 10.1017/S0007114519001041
40. Virgínio Júnior GF, Bittar CMM. Microbial colonization of the gastrointestinal tract of dairy calves - a review of its importance and relationship to health and performance. *Animal Health Research Reviews*. 2021;22(2):97-108. doi: 10.1017/S1466252321000062
41. Wagner JJ, Edwards-Callaway LN, Engle TE. Vitamins and trace minerals in ruminants: confinement feedlot. *Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*. 2023;39(3):505-516. doi: 10.1016/j.cvfa.2023.06.005
42. Weinsberg F, Bickmeyer U, Wiegand H. Effects of inorganic mercury (Hg²⁺) on calcium channel currents and catecholamine release from bovine chromaffin cells. *Archives of Toxicology*. 1995;69(3):191-196. doi: 10.1007/s002040050157
43. Weiss WP. A 100-Year Review: From ascorbic acid to zinc-Mineral and vitamin nutrition of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(12):10045-10060. doi: 10.3168/jds.2017-12935
44. Xue MY, Sun HZ, Wu XH, Liu JX, Guan LL. Multi-omics reveals that the rumen microbiome and its metabolome together with the host metabolome contribute to individualized dairy cow performance. *Microbiome*. 2020;8(1):64. doi: 10.1186/s40168-020-00819-8
45. Wang Y, Zhao Y, Nan X, Wang Y, Cai M, Jiang L, Luo Q, Xiong B. Rumen-protected glucose supplementation alters fecal microbiota and its metabolic profiles in early lactation dairy cows. *Front Microbiol*. 2022;13:1034675. doi: 10.3389/fmicb.2022.1034675
46. Wang L, Wu D, Zhang Y, Li K, Wang M, Ma J. Dynamic distribution of gut microbiota in cattle at different breeds and health states. *Front Microbiol*. 2023;14:1113730. doi: 10.3389/fmicb.2023.1113730
47. Zhang B, Liu N, Hao M, Zhou J, Xie Y, He Z. Plant-derived polysaccharides regulated immune status, gut health and microbiota of broilers: a review. *Front Vet Sci*. 2022;8:791371. doi: 10.3389/fvets.2021.791371
48. Zhang X, Jia L, He H, Yin H, Ming J, Hou T, Xiang J. Modulation of oxidative stress and gut microbiota by selenium-containing peptides from *Cardamine ensiensis* and structural-based characterization. *Food Chem*. 2022;395:133547. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133547
49. Zhang L, Shen H, Zhang J, Mao S. Variety of rumen microbial populations involved in biohydrogenation related to individual milk fat percentage of dairy cows. *Front Vet Sci*. 2023;10:1106834. doi: 10.3389/fvets.2023.1106834
50. Zheng L, Kelly CJ, Battista KD, Schaefer R, Lanis JM, Alexeev EE, Wang RX, Onyiah JC, Kominsky DJ, Colgan SP. Microbial-derived butyrate promotes epithelial barrier function through IL-10 receptor-dependent repression of Claudin-2. *J Immunol*. 2017;199(8):2976-2984. doi: 10.4049/jimmunol.1700105

51. Zhou X, Li J, Sun JL. Oral nickel changes of intestinal microflora in mice. *Curr Microbiol.* 2019;76:590-596. doi: 10.1007/s00284-019-01664-1

Информация об авторах:

Елена Владимировна Яушева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29.

Елена Анатольевна Сизова, доктор биологических наук, руководитель центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29.

Information about the authors:

Elena V Yausheva, Cand. Sci. (Biology), senior researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Livestock, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

Elena A Sizova, Dr. Sci. (Biology), Head of the Centre for Nanotechnologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 23.10.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 283-294.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 283-294.

Научная статья
УДК 591.391.1:591.158.1
doi:10.33284/2658-3135-107-4-283

**Результаты выделения ооцитов и получения IVP эмбрионов у тёлочек истобенской породы
в зависимости от режима проведения ОПУ**

**Галина Николаевна Сингина¹, Роман Юрьевич Чинаров², Екатерина Николаевна Шедова³,
Виктория Александровна Луканина⁴, Анастасия Сергеевна Жукова⁵**

^{1,2,3,4,5}Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика
Л.К. Эрнста, Московская область, п. Дубровицы, Россия

¹g_singina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0198-9757>

²roman_chinarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6511-5341>

³shedvek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9642-2384>

⁴kristybatle@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4744-7873>

⁵anastasia.s.belyaeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1155-014X>

Аннотация. Получение эмбрионов *in vitro* (*in vitro embryo production, IVP*) с использованием ооцитов, выделенных посредством трансвагинальной пункции фолликулов (*ovum pick up, OPU*) является эффективным методом разведения и сохранения пород крупного рогатого скота (КРС). Цель исследования заключалась в оценке влияния индивидуального фактора донора на показатели результативности ОПУ/IVP-технологии у истобенской породы КРС и зависимости такого влияния от режима проведения ОПУ. Процедуру выполняли на половозрелых тёлках (n=7) в режиме 2 (2W) и 1 (1W) раз в неделю. Всего для каждого донора в рамках сравниваемых режимов было проведено 8-9 последовательных сеансов ОПУ. Индивидуальный фактор донора влиял на количество аспирированных фолликулов и выделенных ооцитов на одну сессию ОПУ (которые варьировали от 4,8 до 13 фолликулов и от 1,7 до 8,4 ооцита соответственно), а также на способность полученных половых клеток к эмбриональному развитию в условиях *in vitro*. Максимальное значение доли развития бластоцист составило 32 %, минимальное – 5,3 %. Количество бластоцист на одну сессию ОПУ находилось в диапазоне от 0,1 до 1,9 эмбриона. Влияние режима ОПУ в рамках отдельных доноров наблюдалось на количество аспирированных фолликулов (у двух тёлочек) в пользу 2W и на качество выделенных ооцитов (у одной тёлочки) в пользу 1W. Существенных различий между режимами по количеству выделенных ооцитов, а также по их способности развиваться после экстракорпорального оплодотворения до стадии бластоцисты выявлено не было.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, истобенская порода, *ovum pick up*, ооциты, получение эмбрионов *in vitro*

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста (№ FGGN-2023-0004).

Для цитирования: Результаты выделения ооцитов и получения IVP эмбрионов у тёлочек истобенской породы в зависимости от режима проведения ОПУ / Г.Н. Сингина, Р.Ю. Чинаров, Е.Н. Шедова, В.А. Луканина, А.С. Жукова // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 283-294. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-283>

Original article

Results of oocyte isolation and obtaining IVP embryos from heifers of Istoben breed depending on OPU regimen

**Galina N Singina¹, Roman Yu Chinarov², Ekaterina N Shedova³, Victoria A Lukanina⁴,
Anastasia S Zhukova⁵**

^{1,2,3,4,5} Federal Research Center for Animal Husbandry – VIJ named after Academy Member L.K. Ernst, Moscow region, Dubrovitsy, Russia

¹g_singina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0198-9757>

²roman_chinarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6511-5341>

³shedvek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9642-2384>

⁴kristybatle@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4744-7873>

⁵anastasia.s.belyaeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1155-014X>

Abstract. In vitro embryo production (IVP) using oocytes obtained through transvaginal follicular aspiration (ovum pick up, OPU) is a widely recognized tool for breeding and preserving cattle breeds. The aim of this study was to assess the influence of individual donor factors on the efficiency of the OPU/IVP technique in the Istoben breed of cattle and the dependency of this influence on the OPU frequency. The procedure was performed on mature heifers (n=7) in the regimen of 2 (2W) and 1 (1W) times per week. Each donor underwent 8-9 consecutive OPU sessions for each compared frequency. The individual donor factor influenced the number of aspirated follicles and retrieved oocytes per OPU session (ranging from 4.8 to 13 follicles and 1.7 to 8.4 oocytes, respectively), as well as the ability of the retrieved germ cells to embryonic development in vitro. The maximum value of the blastocyst development share was 32%; the minimum was 5.3%. The number of blastocysts per OPU session ranged from 0.1 to 1.9 embryos. The effect of the OPU regimen within individual donors was observed on the number of aspirated follicles (in two heifers) in favor of 2W and on the quality of retrieved oocytes (in one heifer) in favor of 1W. No significant differences between the regimens were found in the number of retrieved oocytes or their ability to develop after in vitro fertilization to the blastocyst stage.

Keywords: cattle, Istoben breed, ovum pick up, oocytes, obtaining embryos in vitro

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works of the FGBNU FRC VIZh named after academician L.K. Ernst (No FGGN-2023-0004).

For citation: Singina GN, Chinarov RYu, Shedova EN, Lukanina VA, Zhukova AS. Results of oocyte isolation and obtaining IVP embryos from heifers of Istoben breed depending on OPU regimen. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):283-294. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-283>

Введение.

Репродуктивная биотехнология, направленная на получение эмбрионов *in vitro* (*in vitro embryo production, IVP*), как и метод *in vivo* (Бабенков В.Ю. и др., 2023) является эффективным способом разведения и сохранения генетических ресурсов у крупного рогатого скота (КРС), так как позволяет получать большее количество потомства от ценных и уникальных матерей. Данная технология подразумевает извлечение половых клеток (ооцитов) из фолликулов яичников самок, их созревание и оплодотворение *in vitro*, а также последующее культивирование зигот до стадии, пригодной для трансплантации или заморозки (Ferré LB et al., 2020) При этом основным способом выделения ооцитов является трансвагинальная аспирация фолликулов (*ovum pick up, OPU*). В силу ряда особенностей, к которым можно отнести отсутствие необходимости в гормональной стимуляции яичников, возможность получать половые клетки от доноров с нарушенным половым циклом и животных, имеющих патологии яйцевода, а также тех, кто не реагирует на гормональную стимуляцию (Чинаров Р.Ю., 2024), использование OPU особенно актуально при работе по получению эмбрионов у пород, имеющих ограниченное число чистопородных доноров.

В настоящее время наблюдается критическое сокращение популяции истобенской породы – чёрно-пёстрого скота молочного типа, которая характеризуется неприхотливостью к условиям содержания, устойчивостью к инфекциям и долгим сроком жизни (Мокурова Е.В., 2024). Численность популяции, по данным на 2022 год, составляла около 800 голов (Abdelmanova AS et al., 2022), что указывает на возможность утери её ценных биологических и хозяйственных признаков, а также необходимость в разработке мероприятий по сохранению данной популяции, в том числе с использованием OPU/IVP технологии.

Известно, что эффективность OPU/IVP-технологии зависит от ряда технологических и биотехнологических факторов (Baruselli PS et al., 2022), которые зачастую опосредованы индивидуальными особенностями доноров (Monteiro FM et al., 2017; Watanabe YF et al., 2017) и их породной принадлежностью (Pontes JHF et al., 2010). То есть применение OPU/IVP-технологии в программах сохранения отдельных пород, особенно таких, как истобенская, для которых мероприятия по получению *in vitro* эмбрионов ранее не проводились, требует предварительных исследований, направленных на оптимизацию её отдельных этапов и выявлению факторов, влияющих на эффективность данной репродуктивной биотехнологии.

Цель исследования.

Изучить влияние индивидуальных особенностей животных-доноров на эффективность OPU/IVP-технологии у истобенской породы крупного рогатого скота и зависимость такого влияния от режима проведения трансвагинальной аспирации фолликулов (один или два раза в неделю). Оценить действие тестируемых факторов как на количество и качество, выделенных ооцитов, так и на их компетенцию к созреванию и последующему эмбриональному развитию в условиях *in vitro*.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Половозрелые тёлки-доноры истобенской породы КРС (*Bos taurus taurus*), полученные от доноров методом OPU ооциты, а также развившиеся из них IVP эмбрионы.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Исследования по OPU, получению ооцитов и IVP -эмбрионов проводили в ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (<https://www.vij.ru/>) в ноябре-декабре 2023 года и феврале-марте 2024 года. В ноябре-декабре OPU выполняли два раза в неделю (в понедельник и четверг, 2W) с интервалом в 3 или 4 дня. В феврале-марте – один раз в неделю по понедельникам (1W). Всего в эксперименте участвовало 7 тёлочек-доноров, на которых в рамках каждого режима было проведено по 8-9 последовательных сеансов OPU. Рационы животных были сбалансированы по энергии, питательным и биологически активным веществам в соответствии с нормами потребностей.

Процедуру OPU проводили в соответствии с разработанным протоколом, используя систему для OPU у крупного рогатого скота (Чинаров Р.Ю. и др., 2023). В рамках одной сессии OPU аспирировали все видимые фолликулы. В качестве аспирационного раствора использовали фосфатно-солевой буфер (ФСБ), с добавлением фетальной бычьей сыворотки (ФБС), гепарина и антибиотика (Сингина Г.Н. и др., 2023). Аспираты от каждого донора (1 сессия OPU) пропускали индивидуально через фильтр, промывали с использованием ФСБ, дополненного 1 % ФБС, после чего осуществляли поиск и морфологическую оценку качества ооцитов как описано ранее (Сингина Г.Н. и др., 2023). Для дальнейшей работы отбирали ооциты с гомогенной или умеренно гетерогенной цитоплазмой, окруженные одним и более слоев кумулюсных клеток (КК) или частично окруженные КК. Ооциты, имеющие неоднородную цитоплазму с признаками грануляции или лизиса, голые клетки, а также созревшие считались непригодными для получения IVP эмбрионов и

выбраковывались. Результативность каждой сессии OPU оценивали по количеству аспирированных фолликулов и выделенных ооцитов на одну сессию OPU, доле извлечения ооцитов, а также количеству и проценту ооцитов категорий качества пригодных для культивирования.

Отобранные ооциты культивировали (от каждого донора индивидуально) с целью их созревания *in vitro* (*in vitro maturation, IVM*) в среде TC-199 с добавлением фетальной бычьей сыворотки (10 %), пирувата натрия (0,5 мМ), фолликулостимулирующего и лютеинизирующего гормонов (по 10 мкг/мл), эпидермального фактора роста (20 нг/мл) и гентамицина (50 мкг/мл). Затем созревшие ооциты подвергали процедуре экстракорпорального оплодотворения (*in vitro fertilization, IVF*) (Сингина Г.Н. и др., 2023).

Для IVF использовали размороженную сперму 2 быков истобенской породы, которую предварительно подвергали процедуре *swim up*, как описано ранее (Сингина Г.Н. и др., 2016). Сперматозоиды вносили в среду оплодотворения BO-IVF от фирмы «IVF Bioscience», с предварительно перенесенными туда ОКК до конечной концентрации $1,5 \times 10^6$ сперматозоидов на 1 мл.

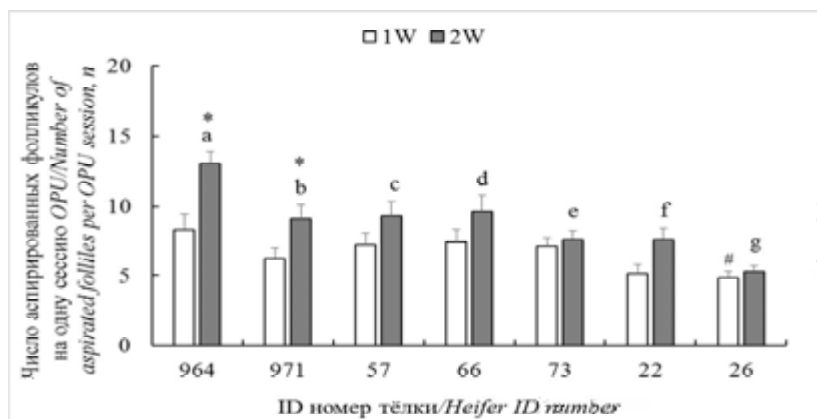
Половые клетки совместно культивировали в течение 10-11 ч, затем ооциты освобождали от клеток кумулюса и налипших сперматозоидов и проводили морфологическую оценку изолированных ооцитов, оценивая количество яйцеклеток с направленными тельцами и, определяя процент созревания. Предполагаемые зиготы переносили в среду эмбрионального развития. Через 3-е суток после оплодотворения ооцитов проводили смену среды и морфологическую оценку раздробившихся зигот, на 7-е сутки культивирования оценивали число эмбрионов, развившихся до стадии бластоцисты.

Оборудование и технические средства. В комплект системы OPU входил ультразвуковой сканер Versana 1104 Active с конвекциональным широкополосным зондом (частота 5 МГц) и держателем зонда («GE HealthCare», США), а также вакуумный насос («Minitube», Германия). Культивирование ооцитов с целью их созревания и оплодотворения осуществлялось в инкубаторе MCO-18AIC (Sanyo, Япония), поддерживающем 5 % CO₂ в воздухе, культивирование зигот до стадии бластоцисты в инкубаторе MCO-50M-PE (Sanyo, Япония) в присутствии 5 % CO₂, 5 % O₂ и 90 % N₂ в атмосфере. Манипуляции с ооцитами и эмбрионами вне инкубаторов проводили под стереомикроскопом (Nikon, Япония), оснащённого нагревательным столиком.

Статистическая обработка. Статистическая обработка данных производилась с использованием программы «SPSS Statistic Version 21» (IBM Corporation, США). Анализ показателей при сравнении режимов OPU (1W/2W) для каждого донора осуществлялся с применением t-критерия Стьюдента для зависимых выборок. Выявление индивидуальных особенностей доноров рассчитывалось с применением однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с последующими парными сравнениями с применением критерия Тьюки. Статистически значимыми считали различия при уровне $P \leq 0,05$.

Результаты исследования.

Результаты трансвагинальной аспирации фолликулов у отдельных доноров представлены на рисунке 1. Выявлена зависимость количества аспирированных фолликулов как от индивидуальных особенностей опытных животных, так и от временных параметров проведения OPU. В случае выполнения этой процедуры в режиме 2 раза в неделю (2W) у тёлки с идентификационным номером 964 среднее количество аспирированных фолликулов на 1 сессию OPU имело наибольшее значение ($13,0 \pm 0,9$ фолликулов) и было выше (от $P \leq 0,05$ до $P \leq 0,001$), чем у других 7 доноров. Минимальное количество фолликулов ($5,3 \pm 0,4$) пунктировано у тёлки № 26, которое было ниже не только по сравнению с тёлкой № 964 ($P \leq 0,001$), но и в сравнении с некоторыми другими донорами ($P \leq 0,05$). Когда OPU проводилось раз в неделю (1W) по данному показателю различия между отдельными животными были менее выражены, его максимальное ($8,3 \pm 1,2$ фолликула) и минимальное ($4,8 \pm 0,5$ фолликула) значение сохранялось за теми же телками (№ 964 и 26 соответственно) что и при 2W, и только между ними установлены достоверные отличия ($P \leq 0,05$). У двух (№ 964 и 971) из 7 доноров при режиме 2W показатель количества аспирированных фолликулов на одну сессию OPU был существенно выше, чем при режиме 1W ($P \leq 0,05$).



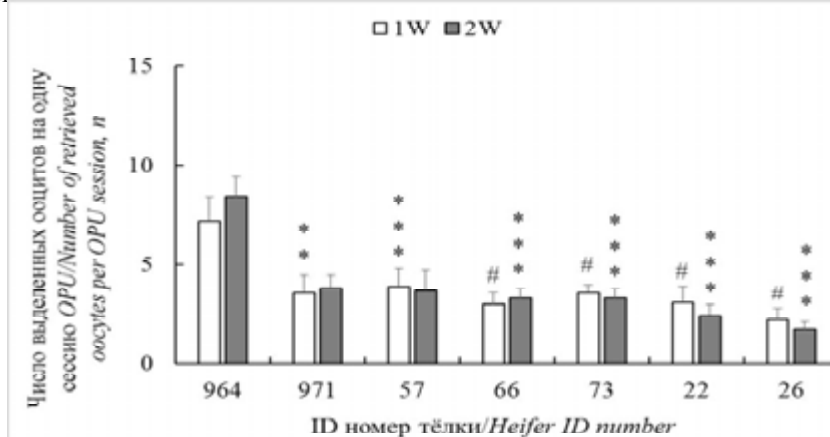
Примечания: – достоверные различия между донорами для 2W: a-f,g – $P \leq 0.001$; a-b,c,d,e – $P \leq 0.05$; g-b,c,d – $P \leq 0.05$; – достоверные различия между донорами для 1W: # – $P \leq 0.05$; – достоверные различия для индивидуальных доноров при сравнении с режимом проведения OPU 1 раз в неделю (1W): * – $P \leq 0.05$

Note: – significant differences between donors for 2W: a-f,g – $P \leq 0.001$; a-b,c,d,e – $P \leq 0.05$; g-b,c,d – $P \leq 0.05$; – significant differences for individual donors when compared with the OPU procedure conducted once a week (1W): * – $P \leq 0.05$

Рисунок 1. Результаты аспирации фолликулов у тёлок истобенской породы при проведении OPU в режиме 1 (1W) и 2 раза в неделю (2W)

Figure 1. The results of follicle aspiration in Istoben heifers during OPU procedures conducted once (1W) and twice a week (2W)

Результаты выделения ооцитов из фолликулов яичников представлены на рисунке 2. Количество полученных ооцитов на 1 сессию OPU не зависело от режима её проведения (1 раз в неделю или 2 раза в неделю). В то же время между отдельными донорами имелись существенные различия. В случае проведения трансвагинальной аспирации фолликулов 2 раза в неделю наименьшее значение данного показателя наблюдалось у тёлки № 26 ($2,2 \pm 0,6$ ооцита), наибольшее – у тёлки № 964 ($7,2 \pm 1,2$ ооцита), которое в свою очередь было существенно выше чем у всех других доноров (в сравнении с № 971 $P \leq 0,01$, со всеми остальными $P \leq 0,001$). При режиме 1W наименьшее количество выделенных ооцитов на 1 сессию OPU было у того же животного ($1,7 \pm 0,4$ ооцита), равно как и наибольшее ($8,4 \pm 1,0$ ооцита), но в отличие от 2W его максимальное значение было выше только по сравнению с 4 донорами – такими как № 66 73 22 и 26 ($P \leq 0.05$)



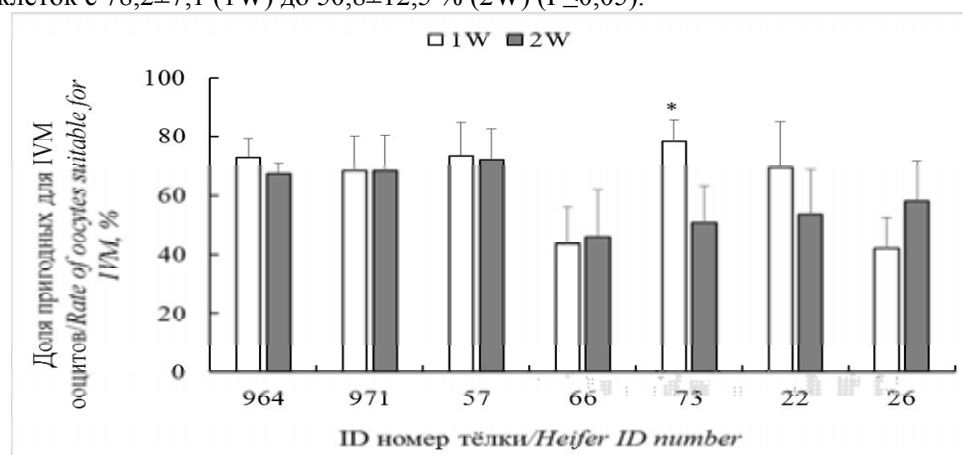
Примечания: – достоверные различия при сравнении с донором № 964 для режима 2W: *** – $P \leq 0.001$; ** – $P \leq 0.01$; – достоверные различия в сравнении с донором № 964 при режиме 1W: # – $P \leq 0.05$

Note: – significant differences compared to donor No. 964 for the 2W regimen: *** – $P \leq 0.001$; ** – $P \leq 0.01$; – significant differences compared to donor No. 964 under the 1W regimen: # – $P \leq 0.05$

Рисунок 2. Результаты выделения ооцитов у тёлок-доноров истобенской породы при проведении OPU в режиме 1 (1W) и 2 раза в неделю (2W)

Figure 2. Results of oocyte isolation from donor heifers of the Istoben breed with OPU conducted once a week (1W) and twice a week (2W)

Оценка качества выделенных ооцитов представлена на рисунке 3. Когда интервал между сеансами OPU составлял 7 дней, доля отобранных для IVM ооцитов от общего числа выделенных клеток на 1 сессию OPU, достоверно не различалась между отдельными донорами: более низкие значения данного показателя были у тёлочек № 66 и 26 ($43,5 \pm 12,6$ и $41,9 \pm 10,7$ % соответственно), у остальных животных исследуемая доля варьировала от $69,3 \pm 15,6$ (тёлочка № 22) до $78,2 \pm 7,1$ % (тёлочка № 73). С изменением режима на 2W отсутствие значимых различий между опытными животными по данному показателю сохранялось. Кроме того, его значения у 6 из 7 доноров не отличались от таковых при 1W. Влияние режима OPU наблюдалось только у донора № 73, в его случае при более частых сессиях происходило ухудшение качества выделенных ооцитов: снижение доли пригодных для IVM клеток с $78,2 \pm 7,1$ (1W) до $50,8 \pm 12,5$ % (2W) ($P \leq 0,05$).



Примечание: * – $P < 0,05$ при сравнении с режимом 2W

Note: * – $P < 0.05$ compared to the 2W regimen

Рисунок 3. Оценка качества выделенных ооцитов у тёлочек истобенской породы при проведении OPU в режиме 1 (1W) и 2 раза в неделю (2W)

Figure 3. Assessment of obtained oocyte quality in Istoben heifers under 1W (once a week) and 2W (twice a week) OPU regimens

В дальнейшем пригодные для культивирования ооциты были использованы для получения IVP эмбрионов. Компетенцию ооцитов к развитию оценивали по уровню созревания и дробления, а также выходу эмбрионов на стадии бластоцисты (табл. 1).

Таблица 1. Созревание и эмбриональное развитие в условиях *in vitro* ооцитов, полученных от тёлочек истобенской породы КРС при различных режимах проведения OPU

Table 1. In vitro maturation and embryonic development of oocytes obtained from heifers of Istoben breed under different OPU frequency regimes

ID тёлки/ Heifer ID number	Число ооцитов/ Number of oocytes, n	*Доля созревших ооцитов, %/*Maturation rate, %	*Доля раздробив- шихся ооцитов, %/ *Cleavage rate, %	*Доля ооцитов раз- вившихся до стадии бластоцисты, %/ *Blastocyst rate, %
1	2	3	4	5
Интервал между сессиями OPU в 7 дней (1 раз в неделю) / The interval between OPU sessions is 7 days (1 time per week)				
964	65	$89,3 \pm 4,07$	$75,9 \pm 7,91$	$28,2 \pm 8,56$
73	32	$94,1 \pm 4,07$	$84,4 \pm 6,19^a$	$30,4 \pm 11,4$

Продолжение таблицы 1				
1	2	3	4	5
22	25	93,3±6,70	69,2±15,2	30,8±15,2
26	20	100±0,00	78,6±14,9	14,3±14,3
971	32	80,8±22,6	68,6±7,90	11,9±6,50
57	35	84,4±12,4	57,1±13,1	26,7±8,90
66	27	73,8±14,5	45,2±17,3 ^b	28,6±18,4
Интервал между сессиями OPU в 3-4 дня (2 раза в неделю) / The interval between OPU sessions is 3-4 days (2 times a week) /				
964	76	85,3±4,20	65,6±5,70	29,3±5,90 ^a
73	26	87,5±8,5	70,8±16,4	29,2±13,6 ^a
22	22	92,5±4,8	72,5±16,0	24,2±15,8 ^{ab}
26	15	85,7±14,3	71,4±18,4	33,3±17,8 ^a
971	34	88,8±7,4	61,3±12,7	5,6±3,70 ^b
57	33	91,3±6,4	62,2±12,7	6,3±6,30 ^b
66	28	76,7±14,5	76,7±14,5	32,0±13,3 ^a

Примечания: * – рассчитывалась, исходя из процентов в одной сессии OPU; – значения в столбце с разными индексами достоверно различаются при $P \leq 0.05$

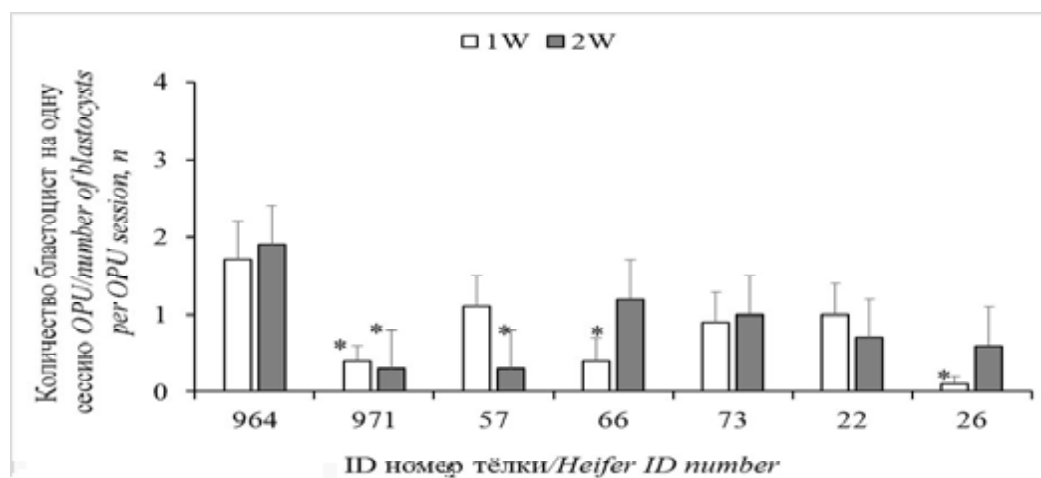
Note: * – calculated based on average OPU per session; – values in a column with different indexes are significantly different at $P \leq 0.05$

Созревание ооцитов *in vitro* не зависело от индивидуальных особенностей животных. Доля созревших ооцитов, а именно отношение ооцитов с полярными тельцами к исходному количеству отобранных для IVM клеток была высокой и в случае использования режима 1w варьировала от 73 (тёлка № 66) до 100 % (тёлка № 26). Не изменялся данный показатель у отдельных животных и в случае перехода с режима OPU 2 раз в неделю на 1 раз в неделю.

Отсутствие достоверных различий между донорами также наблюдалось и по уровню дробления созревших ооцитов после их экстракорпорального оплодотворения (табл. 1), когда OPU проводилось 2 раза в неделю: минимальное значение данного показателя было у тёлки № 971 (61 %), максимальное – у тёлки № 66 (76 %). При более редком режиме наибольшая доля дробления была на уровне 84 % (тёлка № 73), наименьшая составила 45 % (тёлка № 66), и они значимо отличались друг от друга ($P \leq 0.05$).

Полученные от отдельных доноров ооциты, в основном обладали сходной компетентностью к развитию до стадии бластоцисты: стадии, на которой эмбрионы могут быть пересажены животным-реципиентам или заморожены (табл. 1). Тем не менее, в случае проведения OPU 2 раза в неделю у животных с номерами 971 и 57 доля развития бластоцист была ниже ($P \leq 0.05$), чем у доноров с номерами 964, 73, 26 и 66 ($P \leq 0.05$). Кроме того, у тёлки № 57 данный показатель был меньше, чем при режиме 1W ($P \leq 0.05$).

Итоговую эффективность OPU/IVP технологии оценивали по количеству бластоцист на одну сессию OPU. Результаты представлены на рисунке 4. Наибольшее количество (1,9) бластоцист было получено у тёлки № 964 при режиме 2W, которое было сходно с таковым при 1W (1,7 бластоцисты). Существенно более низкие значения данного показателя по сравнению с этой тёлкой в рамках 2-кратного режима наблюдались у доноров с номерами 971 и 57 ($P \leq 0.05$), в случае однократного – у животных с номерами 971, 57, 66 и 26 ($P \leq 0.05$). Между другими донорами различий выявлено не было, равно как и зависимости для каждого животного эффективности OPU/IVP технологии от режима проведения трансвагинальной аспирации фолликулов.



Примечание: – достоверные различия в сравнении с донором № 964 в рамках режимов 1W и 2W: * – $P \leq 0,05$

Note: – significant differences compared to donor No. 964 within the 1W and 2W regime: * – $P \leq 0.05$.

Рисунок 4. Результативность OPU/IVP технологии у телок истобенской породы при проведении OPU в режиме 1 (1W) и 2 раза в неделю (2W)

Figure 4. The efficiency of OPU/IVP technology in Istoben heifers with OPU conducted once per week (1W) and twice per week (2W)

Обсуждение полученных результатов.

Получение эмбрионов *in vitro* с использованием OPU ооцитов является в настоящее время лидирующей технологией производства эмбрионов у крупного рогатого скота (Viana JHM, 2022). В тоже время её эффективность сильно варьирует между породами, а также опосредована физиологическими и биотехнологическими факторами, включая индивидуальные особенности доноров и условия проведения OPU (Sartori R et al., 2016; Ferré LB et al., 2020; Baruselli PS et al., 2022).

Согласно данным литературы, между отдельными донорами наблюдаются существенные различия в паттерне фолликулярного развития, количестве получаемых ооцитов, а также их компетенции к эмбриональному развитию в системе *in vitro*, что обуславливает различия в числе получаемых IVP-эмбрионов (Monteiro FM et al., 2017; Watanabe YF et al., 2017; Baruselli PS et al., 2022). Истобенская порода в этом контексте не стала исключением. По нашим результатам из 7 тёлко-доноров выделяется одно животное (№ 964) с высоким показателем результативности OPU/IVP технологии и одно (№ 971) – с очень низким.

Популярным графиком OPU у КРС считается сбор ооцитов 2 раза в неделю, который по результатам ряда работ (Baruselli PS et al., 2016) даёт большее количество жизнеспособных ооцитов и развившихся из них *in vitro* эмбрионов, чем другой распространённый режим – один раз в неделю. Тем не менее, по некоторым данным, часто повторяющиеся пункции, могут приводить к снижению эффективности OPU/IVP-технологии (Choi BH et al., 2018), в том числе с точки зрения соотношения эмбрионы/ооциты (Presicce GA et al., 2020). В данной работе OPU проводили 1 или 2 раза в неделю. Отличие между вариантами наблюдалось в паттерне фолликулярного развития, оценённого по количеству аспирированных фолликулов на одну сессию OPU в пользу 2-кратного режима (тёлки с номерами 964 и 971) и качеству выделенных ооцитов – в пользу режима меньшей интенсивности (тёлка № 73). Существенных различий между сравниваемыми режимами как в рамках отдельных доноров по количеству выделенных ооцитов, так и по их способности развиваться после экстракорпорального оплодотворения до стадии бластоцисты, выявлено не было. Возможно, что обнаруженное в нашем исследовании увеличение УЗИ-видимых фолликулов связано с стимулированием более частым OPU фолликулярного роста, а снижение доли пригодных для IVM ооци-

тов, с тем, что при этом в некоторых случаях может снижаться качество ооцитов (Baruselli PS et al., 2016; Oliveira CS et al., 2023).

Заключение.

У тёлочек истобенской породы КРС индивидуальный фактор донора может серьёзно повлиять на результаты выделения OPU-ооцитов и их компетенцию к эмбриональному развитию в условиях *in vitro*. Кроме того, от выбора режима проведения процедуры OPU (1 или 2 раза в неделю) в отдельных случаях зависит паттерн фолликулярного развития, а также количество и качество выделенных ооцитов.

Список источников

1. Мокерова Е.В. Породы мира Истобенская // Молочное и мясное скотоводство. 2024. № 2. С. 21. [Mokerova EV. Breeds of the world Istobenskaya. Dairy and Beef Cattle Farming. 2024;2:21. (*In Russ.*)].
2. Получение эмбрионов *in vitro* методом межвидового оплодотворения яйцеклеток коров (*Bos taurus*) семенем зубра (*Bison bonasus*) / Г.Н. Сингина, В.А. Багиров, С.С. Данч, Т.Е. Тарадайник, А.В. Доцев, Н.А. Зиновьева // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 6. С. 824-829. [Singina GN, Bagirov VA, Danch SS, Taradainik TE, Dotsev AV, Zinovieva NA. In vitro production of interspecies hybrid embryos of cattle (*Bos taurus*) and wisent (*Bison bonasus*). Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2016;51(6):824-829. (*In Russ.*)]. doi: 10.15389/agrobiology.2016.6.824rus doi: 10.15389/agrobiology.2016.6.824eng
3. Роль репродуктивных биотехнологий в воспроизводстве и сохранении генофонда редких и исчезающих пород крупного рогатого скота / В.Ю. Бабенков, Н.В. Чимидова, А.И. Хахлинов, А.В. Убушиева, В.И. Манжиев // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 1. С. 67-76. [Babenkov VYu, Chimidova NV, Khakhlinov AI, Ubushieva AV, Manjiev VI. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(1):67-76. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-67
4. Сингина Г.Н., Чинаров Р.Ю., Шедова Е.Н. Влияние количества повторяющихся процедур OPU на эффективность получения *in vitro* эмбрионов у ярославской породы крупного рогатого скота // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. №. 11. Р. 59-64. [Singina GN, Chinarov RY, Shedova EN. Effect of the number of repeated OPU procedures on the efficiency of in vitro embryo production in Yaroslavl breed of cattle. Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex. 2023;37(11):59-64. (*In Russ.*)]. doi: 10.53859/02352451_2023_37_11_59
5. Чинаров Р.Ю. Развитие технологии прижизненного получения ооцитов у коров: современное состояние и направления исследований (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59, № 2. С. 194-220. [Chinarov RYu. Developing the Ovum Pick-Up technology in cattle: state-of-the-art and research directions (review). Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2024;59(2):194-220. (*In Russ.*)]. doi: 10.15389/agrobiology.2024.2.194rus doi: 10.15389/agrobiology.2024.2.194eng
6. Чинаров Р.Ю., Луканина В.А., Сингина Г.Н. Влияние различной интенсивности сессий трансвагинальной пункции фолликулов яичников на прижизненное получение ооцитов у коров // Молочное и мясное скотоводство. 2023. №. 3. С. 33-37. [Chinarov RYu, Lukanina VA, Singina GN. The effect of different intensity of sessions on the oocytes retrieval from lived cows. Dairy and Beef Cattle Farming. 2023;3:33-37. (*In Russ.*)]. doi: 10.33943/MMS.2023.15.29.006
7. Abdelmanova AS, Sermyagin AA, Dotsev AV, Rodionov AN, Stolpovsky YuA, Zinovieva NA. Whole-genomic studies of the population structure of russian local black-pied breeds. Russ J Genet. 2022;58:804-813. doi: 10.1134/S102279542207002X
8. Baruselli PS, Batista EOS, Vieira LM, Ferreira RM, Guerreiro BG, Bayeux BM, Sales JNS, Souza AH, Gimenes LU. Factors that interfere with oocyte quality for in vitro production of

cattle embryos: effects of different developmental & reproductive stages. *Anim Reprod.* 2016;13(3):264-272. doi: 10.21451/1984-3143-AR861

9. Baruselli PS, Rodrigues CA, Ferreira RM, Sales JNS, Elliff FM, Silva LG, Viziack MP., Factor L, D'Occhio MJ. Impact of oocyte donor age and breed on in vitro embryo production in cattle, and relationship of dairy and beef embryo recipients on pregnancy and the subsequent performance of offspring: A review. *Reproduction Fertility and Development.* 2022;34(2):36-51. doi: 10.1071/RD21285

10. Choi BH, Song SH, Park BY, Kong R, Son SH, Park CS, Shin NH, Cheon HY, Lee SH, Jin JI, Lee JG, Kong IK. Effect of OPU session periods on the efficiency of in vitro embryo production in elite Korean native cow. *Journal of Embryo Transfer.* 2018;33(4):265-270. doi: 10.12750/JET.2018.33.4.265

11. Ferré LB, Kjelland ME, Strøbech LB, Hyttel P, Mermillod P, Ross PJ. Review: Recent advances in bovine in vitro embryo production: reproductive biotechnology history and methods. *Animal.* 2020;14(5):991-1004. doi: 10.1017/S1751731119002775

12. Monteiro FM, Batista EOS, Vieira LM, Bayeux BM, Accorsi M, Campanholi SP, Dias EAR, Souza AH, Baruselli PS. Beef donor cows with high number of retrieved COC produce more in vitro embryos compared with cows with low number of COC after repeated ovum pick-up sessions. *Theriogenology.* 2017;90:54-58. doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.11.002

13. Oliveira CS, Rosa PMDS, Camargo AJDR, Feres LF, Saraiva NZ, Oliveira LZ, Camargo LSA. Outstanding gir oocyte donors: How does individual factor affect in vitro embryo production efficiency? *Anim Sci J.* 2023;94(1):e13862. doi: 10.1111/asj.13862

14. Pontes JH, Silva KC, Basso AC, Rigo AG, Ferreira CR, Santos GM, Sanches BV, Porcionato JP, Vieira PH, Faifer FS, Sterza FA, Schenk JL, Seneda MM. Large-scale in vitro embryo production and pregnancy rates from *Bos taurus*, *Bos indicus*, and *indicus-taurus* dairy cows using sexed sperm. *Theriogenology.* 2010;74(8):1349-1355. doi: 10.1016/j.theriogenology.2010.06.004

15. Presicce GA, Neglia G, Salzano A, Padalino B, Longobardi V, Vecchio D, De Carlo E, Gasparrini B. Efficacy of repeated ovum pick-up in Podolic cattle for preservation strategies: a pilot study. *Italian Journal of Animal Science.* 2020;19(1):31-40. doi: 10.1080/1828051X.2019.1684213

16. Sartori R, Gimenes LU, Monteiro PL Jr, Melo LF, Baruselli PS, Bastos MR. Metabolic and endocrine differences between *Bos taurus* and *Bos indicus* females that impact the interaction of nutrition with reproduction. *Theriogenology.* 2016;86(1):32-40. doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.04.016

17. Viana JHM. A new milestone has been reached: transfers of IVP embryos were over one million worldwide. *Embryo Technology Newsletter.* 2022;40(4):22-40.

18. Watanabe YF, de Souza AH, Mingoti RD, Ferreira RM, Batista EOS, Dayan A, Watanabe O, Meirelles FV, Nogueira MFG, Ferraz JBS. Number of oocytes retrieved per donor during OPU and its relationship with in vitro embryo production and field fertility following embryo transfer. *Anim Reprod. (AR).* 2017;14(3):635-644. doi: 10.21451/1984-3143-AR1008

References

1. Mokerova EV. Breeds of the world Istobenskaya. *Dairy and Beef Cattle Farming.* 2024;2:21.

2. Singina GN, Bagirov VA, Danch SS, Taradainik TE, Dotsev AV, Zinovieva NA. In vitro production of interspecies hybrid embryos of cattle (*Bos taurus*) and wisent (*Bison bonasus*). *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology].* 2016;51(6):824-829. doi: 10.15389/agrobiologiya.2016.6.824eng

3. Babenkov VYu, Chimidova NV, Khakhlinov AI, Ubushieva AV, Manjiev VI. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2023;106(1):67-76. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-67

4. Singina GN, Chinarov RY, Shedova EN. Effect of the number of repeated OPU procedures on the efficiency of in vitro embryo production in Yaroslavl breed of cattle. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex.* 2023;37(11):59-64. doi: 10.53859/02352451_2023_37_11_59

5. Chinarov RYu. Developing the Ovum Pick-Up technology in cattle: state-of-the-art and research directions (review). *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2024;59(2):194-220. doi: 10.15389/agrobiology.2024.2.194eng
6. Chinarov RYu, Lukanina VA, Singina GN. The effect of different intensity of sessions on the oocytes retrieval from lived cows. *Dairy and Beef Cattle Farming*. 2023;3:33-37. doi: 10.33943/MMS.2023.15.29.006
7. Abdelmanova AS, Sermyagin AA, Dotsev AV, Rodionov AN, Stolpovsky YuA, Zinovieva NA. Whole-genomic studies of the population structure of russian local black-pied breeds. *Russ J Genet*. 2022;58:804-813. doi: 10.1134/S102279542207002X
8. Baruselli PS, Batista EOS, Vieira LM, Ferreira RM, Guerreiro BG, Bayeux BM, Sales JNS, Souza AH, Gimenes LU. Factors that interfere with oocyte quality for in vitro production of cattle embryos: effects of different developmental & reproductive stages. *Anim Reprod*. 2016;13(3):264-272. doi: 10.21451/1984-3143-AR861
9. Baruselli PS, Rodrigues CA, Ferreira RM, Sales JNS, Elliff FM, Silva LG, Viziack MP., Factor L, D'Occhio MJ. Impact of oocyte donor age and breed on in vitro embryo production in cattle, and relationship of dairy and beef embryo recipients on pregnancy and the subsequent performance of offspring: A review. *Reproduction Fertility and Development*. 2022;34(2):36-51. doi: 10.1071/RD21285
10. Choi BH, Song SH, Park BY, Kong R, Son SH, Park CS, Shin NH, Cheon HY, Lee SH, Jin JI, Lee JG, Kong IK. Effect of OPU session periods on the efficiency of in vitro embryo production in elite Korean native cow. *Journal of Embryo Transfer*. 2018;33(4):265-270. doi: 10.12750/JET.2018.33.4.265
11. Ferré LB, Kjelland ME, Strøbech LB, Hyttel P, Mermillod P, Ross PJ. Review: Recent advances in bovine in vitro embryo production: reproductive biotechnology history and methods. *Animal*. 2020;14(5):991-1004. doi: 10.1017/S1751731119002775
12. Monteiro FM, Batista EOS, Vieira LM, Bayeux BM, Accorsi M, Campanholi SP, Dias EAR, Souza AH, Baruselli PS. Beef donor cows with high number of retrieved COC produce more in vitro embryos compared with cows with low number of COC after repeated ovum pick-up sessions. *Theriogenology*. 2017;90:54-58. doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.11.002
13. Oliveira CS, Rosa PMDS, Camargo AJDR, Feres LF, Saraiva NZ, Oliveira LZ, Camargo LSA. Outstanding gir oocyte donors: How does individual factor affect in vitro embryo production efficiency? *Anim Sci J*. 2023;94(1):e13862. doi: 10.1111/asj.13862
14. Pontes JH, Silva KC, Basso AC, Rigo AG, Ferreira CR, Santos GM, Sanches BV, Porcionato JP, Vieira PH, Faifer FS, Sterza FA, Schenk JL, Seneda MM. Large-scale in vitro embryo production and pregnancy rates from *Bos taurus*, *Bos indicus*, and *indicus-taurus* dairy cows using sexed sperm. *Theriogenology*. 2010;74(8):1349-1355. doi: 10.1016/j.theriogenology.2010.06.004
15. Presicce GA, Neglia G, Salzano A, Padalino B, Longobardi V, Vecchio D, De Carlo E, Gasparrini B. Efficacy of repeated ovum pick-up in Podolic cattle for preservation strategies: a pilot study. *Italian Journal of Animal Science*. 2020;19(1):31-40. doi: 10.1080/1828051X.2019.1684213
16. Sartori R, Gimenes LU, Monteiro PL Jr, Melo LF, Baruselli PS, Bastos MR. Metabolic and endocrine differences between *Bos taurus* and *Bos indicus* females that impact the interaction of nutrition with reproduction. *Theriogenology*. 2016;86(1):32-40. doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.04.016
17. Viana JHM. A new milestone has been reached: transfers of IVP embryos were over one million worldwide. *Embryo Technology Newsletter*. 2022;40(4):22-40.
18. Watanabe YF, de Souza AH, Mingoti RD, Ferreira RM, Batista EOS, Dayan A, Watanabe O, Meirelles FV, Nogueira MFG, Ferraz JBS. Number of oocytes retrieved per donor during OPU and its relationship with in vitro embryo production and field fertility following embryo transfer. *Anim Reprod. (AR)*. 2017;14(3):635-644. doi: 10.21451/1984-3143-AR1008

Информация об авторах:

Галина Николаевна Сингина, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией экспериментальной эмбриологии, Федеральный научный центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы 60, сот: 8-9851434552.

Роман Юрьевич Чинаров, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной эмбриологии, Федеральный научный центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы 60, сот: 8-9153899065.

Екатерина Николаевна Шедова, научный сотрудник, лаборатории экспериментальной эмбриологии, Федеральный научный центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы 60, сот: 8-9167117673.

Виктория Александровна Луканина, младший научный сотрудник, лаборатории экспериментальной эмбриологии, Федеральный научный центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы 60, сот: 8-9165954695.

Анастасия Сергеевна Жукова, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экспериментальной эмбриологии, Федеральный научный центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы 60, сот: 8-9165740148.

Information about the authors:

Galina N Singina, Cand. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of Experimental Embryology, Federal Research Center for Animal Husbandry — All-Russian Research Institute of Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy settlement, Moscow Region, Podolsk, 142132, mobile: 8-9851434552.

Roman Yu Chinarov, Cand. Sci. (Veterinary), Senior Researcher, Laboratory of Experimental Embryology, Federal Research Center for Animal Husbandry — All-Russian Research Institute of Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy settlement, Moscow Region, Podolsk, 142132, mobile: 8-9153899065.

Ekaterina N Shedova, Researcher, Laboratory of Experimental Embryology, Federal Research Center for Animal Husbandry — All-Russian Research Institute of Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy settlement, Moscow Region, Podolsk, 142132, mobile: 8-9167117673.

Victoria A Lukanina, Junior Researcher, Laboratory of Experimental Embryology, Federal Research Center for Animal Husbandry — All-Russian Research Institute of Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy settlement, Moscow Region, Podolsk, 142132, mobile: 8-9165954695.

Anastasia S Zhukova, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory of Experimental Embryology, Federal Research Center for Animal Husbandry — All-Russian Research Institute of Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy settlement, Moscow Region, Podolsk, 142132, mobile: 8-9165740148.

Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена после рецензирования 05.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 05.12.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 295-308.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 295-308.

КОРМОПРОИЗВОДСТВО И КОРМА

Научная статья
УДК 633.31:631.559(470.22)
doi:10.33284/2658-3135-107-4-295

Продуктивность люцерны изменчивой в зависимости от инокуляции *Sinorhizobium meliloti* в условиях Республики Карелия

Александра Игоревна Камова¹, Татьяна Валерьевна Степанова², Анна Георгиевна Орлова³

¹Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

^{2,3}Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. Пушкин, Россия

¹avelesikkamova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9113-1031>

²zimtv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9520-9549>

³yanevich-2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6580-8890>

Аннотация. В последние годы за счёт продвижения в северные районы перспективной кормовой культуры люцерны изменчивой (*Medicago varia* Mart.) расширяется ареал её распространения. Для повышения эффективности возделывания которой необходимо внедрять сорта нового поколения, обладающие устойчивостью к абиотическим факторам среды и способные произрастать в условиях длинного светового дня, ограниченных ресурсов тепла, повышенной кислотности почв. Учитывая, что ранее в условиях Карелии люцерна не произрастала, и в почве нет аборигенных штаммов клубеньковых бактерий, способных вступать в продуктивные взаимоотношения с данной бобовой культурой, необходимо обязательно проводить инокуляцию семян *Sinorhizobium meliloti*, при этом подобрать наиболее адаптивные к условиям региона сорто-микробные системы. В связи с этим проведены трёхлетние исследования по экологическому сортоиспытанию люцерны изменчивой сортов Таисия, Агния ВИК, Пастбищная 88 и сортообразцов СГП-387 и 506 (Люся) при инокуляции штаммами клубеньковых бактерий *Sinorhizobium meliloti* (СХМ-1-105, 415, А-1, А-5 и вариант без применения). Выявили, что среди изучаемых сорто-микробных систем наиболее адаптивными к условиям Северо-Западного региона являются сортообразец 506 (сорт Люся), инокулированный штаммом СХМ-1-105, способный в среднем за два года пользования обеспечить урожайность до 7,45 т/га сухой массы, а также Агния ВИК в сочетании с этим же штаммом (7,25 т/га), штаммы А-1 и А-5 также обеспечивали прибавку урожая к контролю в 1,8-2,2 раза. По отношению к сортам данные штаммы можно характеризовать как универсальные.

Ключевые слова: люцерна изменчивая, сорт, сорто-микробные системы, клубеньковые бактерии, штаммы, урожайность

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2026 гг. ФГБНУ КарНЦ (№ 122031000202-1).

Для цитирования: Камова А.И., Степанова Т.В., Орлова А.Г. Продуктивность люцерны изменчивой в зависимости от инокуляции *Sinorhizobium meliloti* в условиях Республики Карелия // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 295-308. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-295>

FODDER PRODUCTION AND FODDERS

Original article

Productivity of alfalfa depending on inoculation of *Sinorhizobium meliloti* in conditions of the Republic of Karelia

Alexandra I Kamova¹, Tatyana V Stepanova², Anna G Orlova³

¹Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Karelia, Russia

^{2,3}St. Petersburg State Agrarian University. St. Petersburg. Russian Federation

¹avelesikkamova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9113-1031>

²zimtv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9520-9549>

³yanevich-2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6580-8890>

Abstract. In recent years in connection with the extension of Alfalfa (*Medicago*) spreading area and promotion to the northern regions. It is necessary to introduce new generation varieties that are re-

sistant to abiotic environmental factors and capable of growing in conditions of long daylight hours, limited heat resources, and increased soil acidity to increase the efficiency of its cultivation. Considering that previously alfalfa did not grow in the conditions of Karelia, there are no native strains of nodule bacteria in the soil that can enter into productive relationships with this legume crop, it is necessary to inoculate seeds with *Sinorhizobium meliloti* and at the same time select the most adaptive variety-microbial systems to the conditions of the region. In this regard, three-year studies were carried out on the ecological variety testing of variable alfalfa varieties Taisiya, Agniya VIK, Pastbischaya 88 and variety samples SGP-387 and 506 (Lyusya variety), and when inoculated with strains of nodule bacteria *Sinorhizobium meliloti* (SKhM-1-105, 415, A-1, A-5, and variant without application). It was found that among the studied varietal-microbial systems the most adapted to the conditions of the North-West region are variety 506 (Lyusya variety) inoculated with strain SKhM-1-105, capable of providing yield on average for two years of use up to 7.45 tonnes/ha dry weight, as well as Agniya VIK in combination with the same strain (7.25 tonnes/ha), strains A-1 and A-5 also provided yield increase over the control in 1.8-2.2 times. In terms of varieties, these strains can be characterised as universal.

Keywords: alfalfa, variety, varietal-microbial systems, nodule bacteria, strains, yields

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2022-2026 of KarRC RAS (No. 122031000202-1).

For citation: Kamova AI, Stepanova TV, Orlova AG. Productivity of alfalfa depending on inoculation of *Sinorhizobium meliloti* in conditions of the Republic of Karelia. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):295-308. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-295>

Введение.

В Карелии в течение многих лет основой для сенокосного использования являлся клевер луговой (*Trifolium pratense* L.). Но возделывание его ограничено малым долголетием: уже к третьему году он сильно изреживается и выпадает из травостоев, что приводит к снижению урожайности и влияет на качество получаемых кормов, обеспечивая экономические потери (Евсеева Г.В. и Смирнов С.Н., 2016; Лазарев Н.Н. и др., 2017).

Избежать дополнительных материальных затрат можно путём внедрения перспективной для республики культуры, люцерны изменчивой (Гончаров П.Л. и Лубенец П.А., 1985), на урожайность которой влияет формирование растительно-микробных симбиотических систем с клубеньковыми бактериями (ризобиями) (Румянцева М.Л. и др., 2019; Козырева М.Ю. и Басиева Л.Ж., 2020; Алферов А.А., 2020).

Сорта нового поколения данной культуры способны формировать продуктивные травостои в условиях длинного светового дня и ограниченных ресурсов тепла при повышенной кислотности почв (Донских Н.А. и Владимирова В.В., 2018; Степанова Г.В. и др., 2023). Она отличается долголетием и многоукосностью, обеспечивая хорошее качество получаемых кормов и снижение себестоимости сельскохозяйственной продукции (Донских Н.А. и Ашим Д., 2011). Также Румянцева М.Л. с соавторами (2019) в своей работе отмечает, что полученные на основе новых сортов сорто-микробные системы обладают повышенной адаптивностью, что в условиях Севера является актуальным преимуществом.

В последние годы создаются сорта нового поколения, адаптированные к местным почвенно-климатическим условиям, способные произрастать в условиях Республики Карелия (Краснова Л.И., 2007; Агротехника возделывания..., 2008; Сорта кормовых культур..., 2019; Gao R et al., 2021; Мордвинцев М.П. и Байсиитова М.С., 2022).

Наряду с подбором сортов, рекомендованных для региона, немаловажна инокуляция семян, она способствует увеличению диазотрофии, повышению адаптивных свойств, а следовательно, и увеличению урожайности зелёной массы (Баринов В.Н. и Новиков М.Н., 2021). Инокуляция семян рассматривается как один из факторов повышения продуктивности люцерны в сравнении с вариантом без инокуляции, подробно этим вопросом занимаются учёные во ВНИИСХМ (Румянцева М.Л. и др., 2019). Фиксация молекулярного азота клубеньковыми бактериями – важный процесс, обеспечивающий питание растений связанным азотом и накоплением его в почве (Атласова Л.Г., 2015).

Включение люцерны изменчивой в конвейер в полной мере отвечает принципам биологизации и технологиям ресурсосбережения (Гребенников В.Г. и др., 2019; Косолапов В.М. и др., 2022). Использование биологического азота – это единственный экологически безопасный путь снабжения растений связанным азотом, при котором исключается загрязнение нитратами почвы, водоёмов, продукции (Новиков М.Н., 2020). Кроме того, микробная азотфиксация осуществляется, главным образом, за счёт энергии солнца и позволяет избежать больших затрат энергетического сырья (Тихонович И.А. и др., 2011).

На урожайность бобовых культур, в том числе и люцерны, влияет формирование растительно-микробной симбиотической системы с клубеньковыми бактериями. Эффективность любого микробно-растительного симбиоза зависит от обоих партнёров (Тихонович И.А. и Проворов Н.А., 2009).

Исследования микробно-растительных систем с люцерной изменчивой в сложных условиях Республики Карелия ранее не проводились, изучение влияния микробных препаратов на основе клубеньковых бактерий на развитие симбиотического аппарата люцерны в задачи наших исследований не входило.

Цель исследования.

Изучение сорто-микробных систем и подбор наиболее адаптивных партнёров, учитывая особенности роста и развития люцерны в условиях северного земледелия.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. 3 сорта люцерны изменчивой (Пастбищная 88, Агния ВИК, Таисия) и 2 сортообразца СГП-387 и 506 (сейчас он упоминается как сорт Люся).

Характеристика территорий, природно-климатические условия. На участке, расположенном на базе опытных полей КарНЦ РАН в Пряжинском районе Республики Карелия, почва хорошо окультуренная, по гранулометрическому составу – среднесуглинистая, по типу – дерново-подзолистая, реакция почвенного раствора – слабокислая ($\text{pH}_{\text{сол}}=5,8$). Содержание P_2O_5 очень высокое (859 мг/кг) и K_2O – высокое (412 мг/кг). Почва участка по параметрам подходит для выращивания многолетних кормовых культур.

Полевые сезоны 2021-2023 гг. различались по тепло- и влагообеспеченности. Вегетационный период 2021 г. отмечен резким дефицитом влаги в июне и июле (на 12 и 55 мм меньше среднемноголетней), на фоне температуры, превышающей среднемноголетние на 7,2 и 4 °С соответственно, характеризуя месяцы как очень засушливые, что оказало влияние на всходы и формирование урожая в первый год жизни травостоя. 17 августа проведено подкашивание сорной растительности. Укос проведён 23 сентября на его формирование потребовалось 79 дней, к этому времени была накоплена сумма активных температур выше 10 °С – 1035 °С. ГТК укоса составил 1,86.

Весной 2022 г. отрастание трав началось 4 мая, при переходе среднесуточных температур через +5 °С. Для формирования первого укоса потребовалось 59 дней и 602 °С сумма активных температур выше 10 °С, ГТК укоса – 1,55. В целом 2022 г. характеризовался как теплообеспеченный и избыточно увлажнённый. Второй укос сформировался через 79 дней (19.09.2022) при высоте растений 27,2-84,1 см и наступлении фазы повторной бутонизации, для формирования второго укоса потребовалось 1159,43 °С сумма активных температур выше 10 °С. ГТК укоса, как и в 2021 году, составил 1,86.

2023 г. отмечен неравномерным распределением осадков по месяцам, с колебанием температур на фоне недостатка осадков, что характеризовало год как засушливый на начальном этапе развития растений. Отрастание началось 21 апреля, полноценный укос сформировался через 66 дней (26.06.2023) и сумме активных температур 580°С, ГТК – 0,49, второй укос – через 58 дней (24.08.2023) и сумме активных температур 976°С, ГТК – 2,3 (рис. 1).

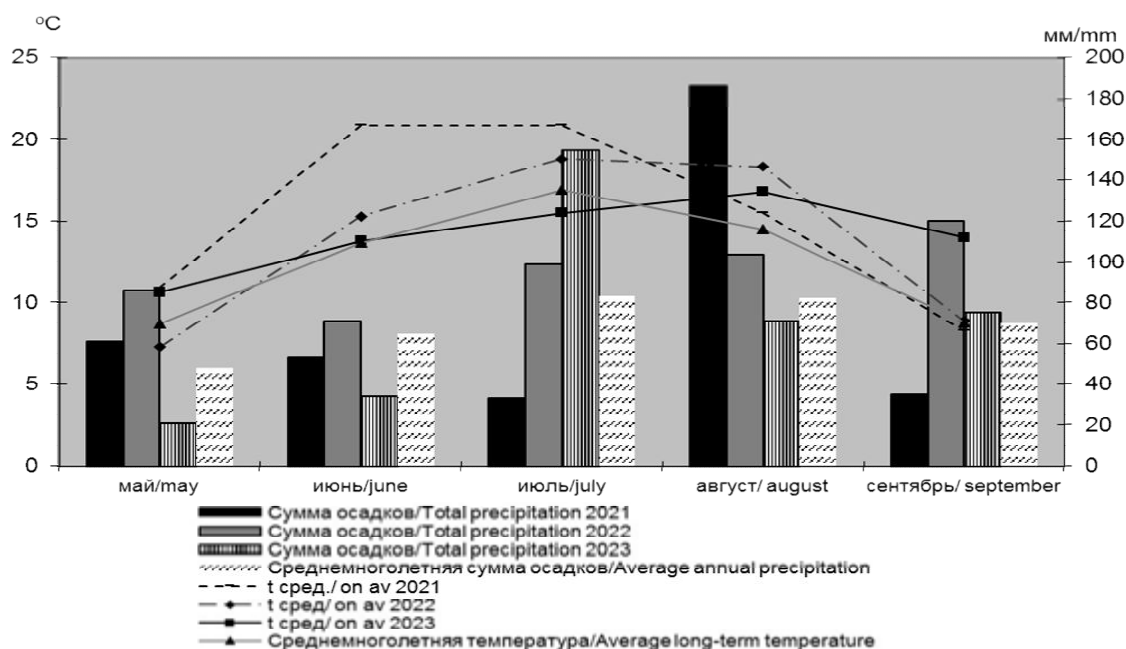


Рисунок 1. Метеорологические условия в годы исследований 2021-2023 гг.

Figure 1. Meteorological conditions during the 2021-2023 research years

Схема опыта. В Республике Карелия на базе лаборатории агротехнологий «Вилга» ФГБНУ Карельского научного центра РАН 26 июня 2021 года заложен двухфакторный полевой опыт по изучению продуктивности сортов и сортообразцов люцерны изменчивой при инокуляции семян штаммами *Sinorhizobium meliloti* для выявления лучших растительно-микробных систем (Методика государственного сортоиспытания..., 1989). Исследования проводились по методике проведения исследований с многолетними травами (Методика опытов на сенокосах и пастбищах, 1971), разработанной во ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса.

Семена люцерны предоставлены ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса». В качестве контроля выбран сорт Таисия из-за его адаптивной способности к абиотическим стрессовым факторам: высокая холодостойкость, засухоустойчивость, устойчивость к переувлажнению почвы в весенний период (Степанова Г.В. и др., 2023).

Фактор В – инокуляция штаммами *Sinorhizobium meliloti*: А-1, А-5, 415, СХМ-1-105, предоставленными ФГБНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии. Семена контрольных вариантов (без инокуляции) обрабатывали водой.

Площадь учётной делянки – 10 кв. м, повторность – 4-кратная, размещение вариантов – систематическое. Норма высева 2,6 млн всхожих семян на гектар, способ посева – рядовой с шириной междурядий 0,3 м. Норма расхода инокулянта – 250 мл жидкого препарата для обработки 1 гектарной нормы семян. Учёт урожайности проводили в фазу начала бутонизации со всей делянки сплошным способом. Режим использования травостоя – двухкосный, в первый год жизни проведён один укос.

Оборудование и технические средства. Исследования проведены с использованием сельскохозяйственной техники и приборной базы лаборатории агротехнологий «Вилга» и на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ КарНЦ РАН. Потенциометр «Анион 4100» (Россия), спектрофотометр «СФ-2000» (Россия), атомно-абсорбционный спектрофотометр «АА-7000» (Shimadzu, Япония).

Статистическая обработка. Обработка полученных экспериментальных данных проведена методом дисперсионного анализа (Доспехов Б.А., 1985) и с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США).

Результаты исследования.

Побегообразовательная способность напрямую влияет на урожайность и продуктивность травостоев и находится в прямой зависимости от климатических, почвенных условий выращивания сорта люцерны изменчивой, а также от инокуляции (рис. 2). В течение трёх лет исследований наблюдали увеличение побегообразовательной способности люцерны изменчивой от первого года к третьему.

Недостаток влаги в июне и июле 2021 г. оказал влияние на всхожесть и образование побегов. В первый год жизни количество побегов варьировало от 120 шт./м² сорт Агния ВИК в сочетании с производственным штаммом 415 до 336 шт./м² сортообразец 506 (сорт Люся), обработанный штаммом А-1. Практически со всеми штаммами (кроме А-5), включая контрольный вариант, сорт Агния ВИК формировал минимальное количество побегов в 2021 году, от 120 до 184 шт./м².

В 2022 году, на второй год жизни растений, плотность травостоев варьировала от 106 шт./м² (Агния ВИК+415 штамм) и до 247 шт./м² (сортообразец 506 (сорт Люся)+штамм А-5). Плотность травостоев сортообразца 506 (сорт Люся) при обработке штаммом А-1 была на 12 % меньше, чем при обработке штаммом А-5.

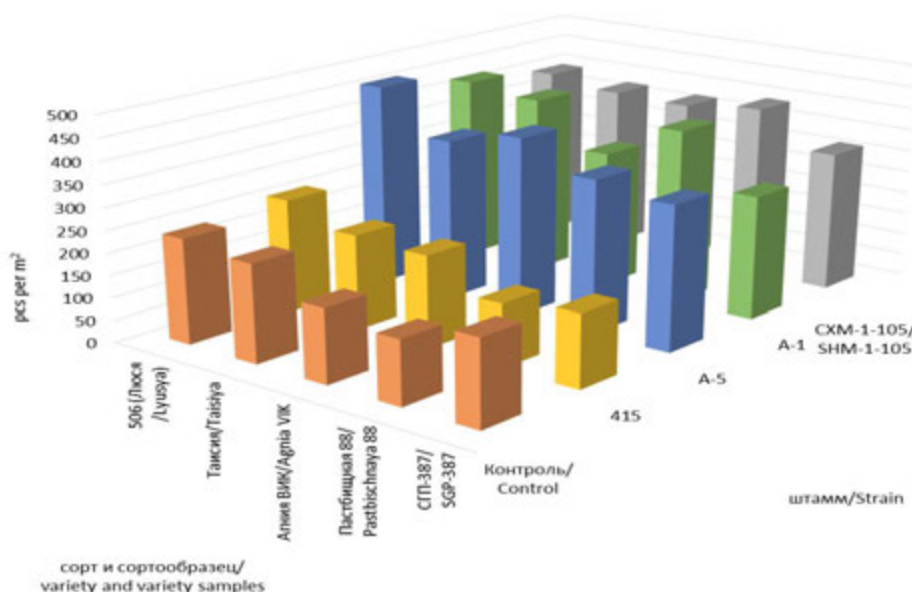


Рисунок 2. Плотность травостоев люцерны изменчивой (в среднем за 2022-2023), шт./м²
Figure 2. Density of alfalfa grass stands (average for 2022-2023), pcs. per m²

Поздняя уборка трав в 2022 году повлияла на отрастание и дальнейшее развитие травостоев третьего года жизни растений в 2023 году. Вариация количества побегов составила от 348 шт./м² (сорто-микробная система сорт Пастбищная 88+производственный штамм 415) до 1352 шт./м² (сортообразец 506 (сорт Люся)+штамм А-5). Как и в 2022 г. побегообразовательная способность сортообразца 506 (сорт Люся) при обработке штаммом А-1 отставал по количеству побегов по сравнению с вариантом при обработке штаммом А-5.

Таким образом, стоит отметить, что за три года жизни люцерны наиболее высокие показатели плотности травостоев отмечали у сорто-микробных систем сортообразца 506 (сорт Люся) со штаммами А-1 и А-5.

Скорость роста растений отражает конкурентоспособность трав в агроценозе (рис. 3). В 2021 году, в год посева трав, высота травостоев варьировала от 12,5 см (сорт Пастбищная 88+штамм 415) до 40,4 см (сортообразец 506 (сорт Люся)+штамм А-1). Инокуляция семян штаммом А-1 оказала положительное влияние на скорость роста растений в первый год жизни на всех изучаемых сортах люцерны и сортообразцах (кроме сорта Агния ВИК) – высота растений варьировала от 24,8 до 40,4 см.

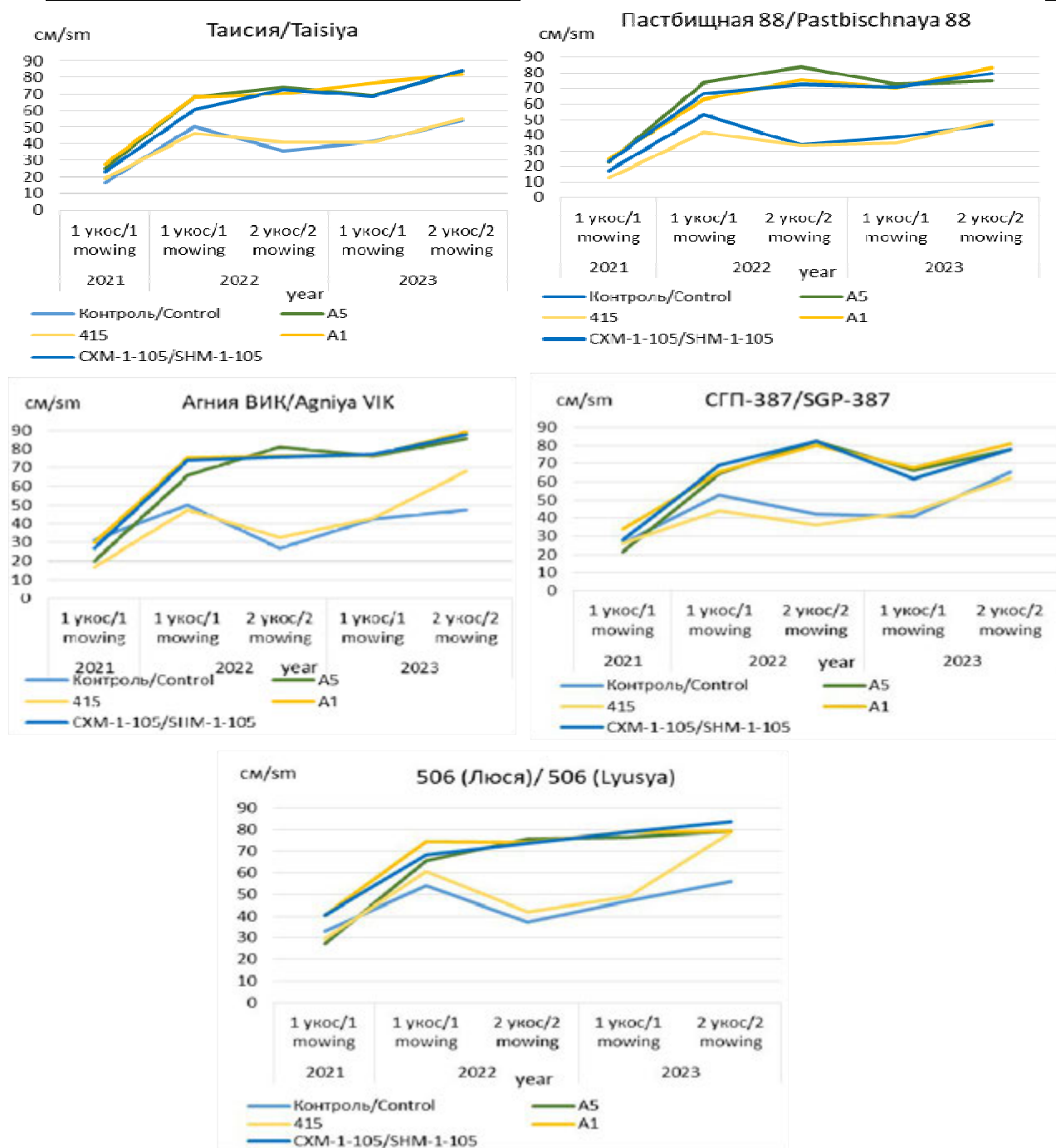


Рисунок 3. Высота растений люцерны изменчивой различных сортов и сортообразцов в 2021-2023 гг.

Figure 3. The height of alfalfa plants of various varieties and varieties in 2021-2023

В 2022 году максимальные ростовые показатели отмечены при инокуляции штаммами А-5 и А-1, минимальные – штаммом 415 и в контроле. Подобная тенденция сохранилась на протяжении следующего года. При этом растения люцерны в вариантах инокуляции семян штаммом СХМ-1-105 догнали растения в вариантах со штаммами А-1 и А-5 на третий год жизни по высоте травостоя.

Как и максимальные значения плотности, так и максимальные значения высоты травостоев в течение всего периода исследований обеспечила инокуляция семян штаммами А-1 и А-5.

В процессе исследований оценивали влияние инокуляции клубеньковыми бактериями на способность растений люцерны противостоять заселению агрофитоценоза сорной растительностью. Анализ видового состава травостоев показывает адаптированность и устойчивость изучаемых видов к данным экологическим условиям (рис. 4).

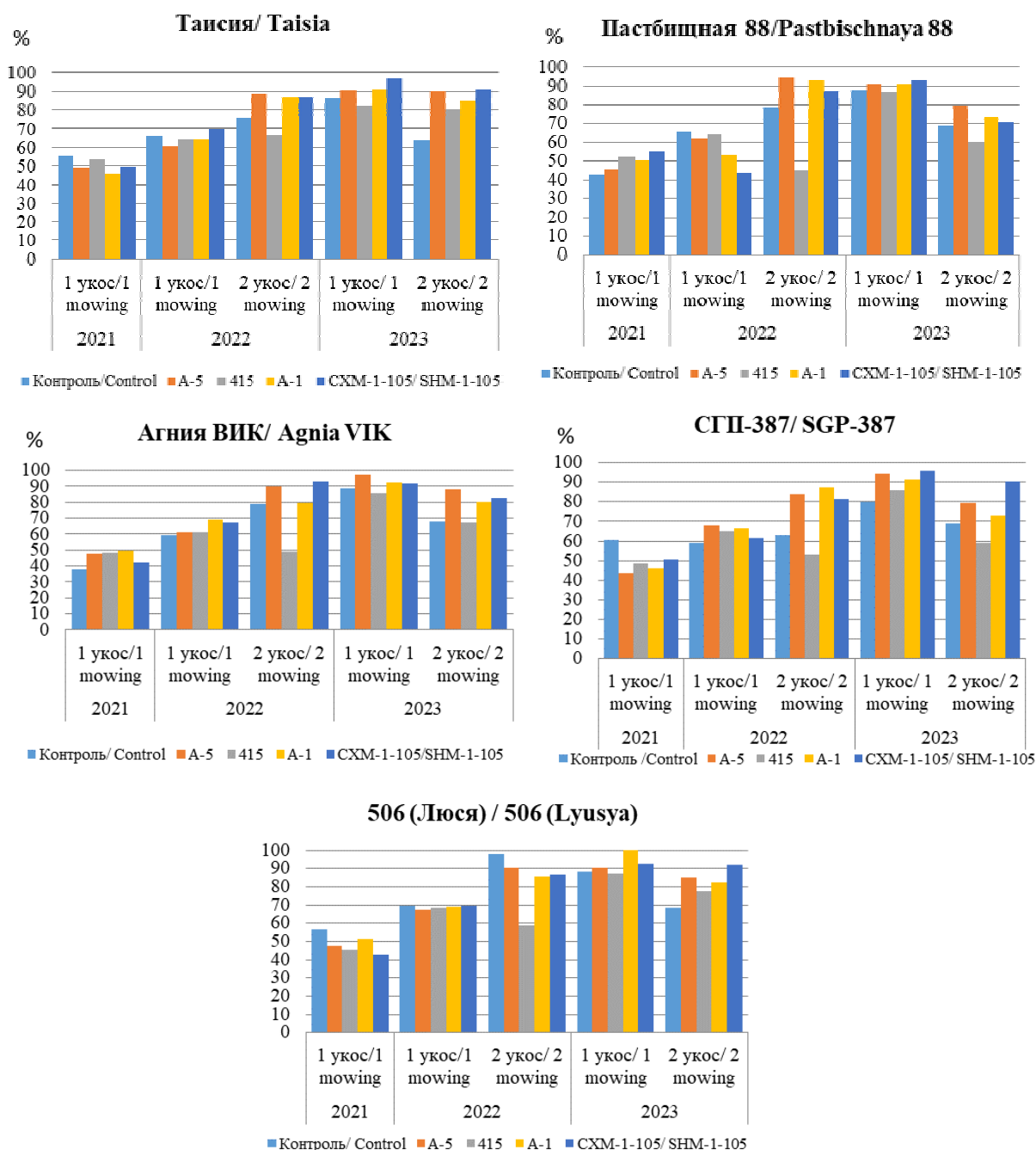


Рисунок 4. Долевое содержание люцерны изменчивой различных сортов и сортообразцов в урожае в 2021-2023 гг.

Figure 4. The proportion of alfalfa of variable varieties and varietal types in the harvest in 2021-2023

Долевое участие люцерны изменчивой варьировало по годам. В первый год жизни люцерны развивается довольно слабо и медленно, поэтому наибольшее количество несеемых трав отмечено в 2021 году. На второй год жизни процентное содержание люцерны в урожае увеличивалось от первого укоса ко второму – до 97,8 % (506 (Люся)). На третий год долевое участие люцерны изменчивой в травостое практически не изменилось в первом укосе, но в связи с метеорологическими условиями в большинстве травостоев отмечено снижение данного показателя во втором укосе.

Процентное содержание люцерны в травостоях также зависело от конкурентоспособности и адаптивности сорта. Наименьшее долевое участие в среднем по годам отмечено у сорта Пастбищная 88 (67,47 %). Максимальный процент в среднем обеспечивал сортообразец 506 (Люся) – 74,84 %.

Инокуляция штаммами А-1, А-5 и СХМ-1-105 способствовала увеличению конкурентоспособности, начиная со второго года жизни. Максимальный эффект отмечали в третий год жизни травостоев – увеличение содержания бобового вида на 6,7-17,8 % от контроля. Производственный штамм 415 показал прибавку лишь на первый год жизни, однако уже на следующий год участие люцерны в травостое снижалось.

Интересными являются результаты сравнительного анализа сорто-микробных систем. Наиболее конкурентоспособными оказались сочетания: сорт Пастбищная 88 и сорт Агния ВИК со штаммом А-5, сорт Таисия и сортообразцы СГП-387 и 506 (сорт Люся) со штаммом СХМ-1-105.

Таким образом, по массовой доле люцерны в травостоях выделился сортообразец 506 (сорт Люся), а среди штаммов наиболее универсальными признаками обладали А-1, А-5 и СХМ-1-105.

Формирование продуктивных травостоев невозможно без учёта урожайности (табл. 1). Планируемое использование фитоценозов – двуукосное, однако первый год жизни – не показательный, и травостой сформировал лишь один укос. В дальнейшем (2022-2023 гг.) наибольшую урожайность сухой массы обеспечили следующие сорто-микробные системы: сортообразец 506 (сорт Люся) и сорт Агния ВИК со штаммом СХМ-1-105 (7,45 и 7,25 т/га сухой массы соответственно), и эти же сорта при инокуляции семян штаммом А-1 – 7,17 и 7,23 т/га соответственно. Сорт Пастбищная 88, инокулированный штаммом А-5, также отличился высоким сбором сухой массы (7,22 т/га). Производственный штамм 415 не обеспечил существенных прибавок урожайности, которая варьировала в диапазоне 3,00-4,44 т/га, практически на уровне контрольных, не инокулированных вариантов (3,03-3,49 т/га).

Table 1. Yield of dry mass of alfalfa grass stand, t/ha

Table 1. Yield of dry mass of alfalfa grass stand, t/ha

[illegible]

Продолжение таблицы 1									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А-5	Таисия / <i>Taisiya</i>	1,2	1,5	3,2	4,8	3,1	6,4	9,5	7,1
	Агния ВИК / <i>Agniya VIK</i>	1,2	1,6	3,0	4,6	2,7	6,0	8,7	6,7
	Пастбищная 88 / <i>Pastbischnaya 88</i>	1,1	2,4	2,2	4,6	3,0	6,9	9,9	7,2
	СГП-387 / <i>SGP-387</i>	1,0	1,4	2,9	4,2	2,5	6,6	9,1	6,7
	506 (Люся) / <i>506 (Lusya)</i>	1,0	1,7	3,0	4,7	2,8	6,0	8,7	6,7
415	Таисия / <i>Taisiya</i>	1,3	1,0	0,9	1,9	1,3	3,0	4,3	3,1
	Агния ВИК / <i>Agniya VIK</i>	0,9	0,9	0,9	1,8	1,7	2,5	4,2	3,0
	Пастбищная 88 / <i>Pastbischnaya 88</i>	1,2	0,9	1,3	2,2	1,8	3,0	4,8	3,5
	СГП-387 / <i>SGP-387</i>	1,2	1,7	1,1	2,8	1,3	3,5	4,7	3,8
	506 (Люся) / <i>506 (Lusya)</i>	1,2	0,8	1,3	2,2	2,0	4,8	6,7	4,4
А-1	Таисия / <i>Taisiya</i>	1,0	1,1	2,2	3,3	3,2	6,6	9,8	6,6
	Агния ВИК / <i>Agniya VIK</i>	1,1	1,6	1,8	3,4	2,8	5,3	8,1	5,7
	Пастбищная 88 / <i>Pastbischnaya 88</i>	1,1	2,0	3,2	5,3	3,7	5,5	9,2	7,2
	СГП-387 / <i>SGP-387</i>	1,1	1,9	2,0	3,9	2,5	5,1	7,6	5,8
	506 (Люся) / <i>506 (Lusya)</i>	1,4	2,3	2,8	5,2	3,8	5,4	9,2	7,2
СХМ-1-105 / SHM-1-105	Таисия / <i>Taisiya</i>	1,0	1,2	2,3	3,6	3,0	6,0	9,0	6,3
	Агния ВИК / <i>Agniya VIK</i>	0,9	1,6	1,6	3,3	2,6	6,0	8,6	5,9
	Пастбищная 88 / <i>Pastbischnaya 88</i>	1,1	2,3	2,4	4,6	4,0	5,9	9,9	7,3
	СГП-387 / <i>SGP-387</i>	0,9	1,8	1,9	3,8	2,1	5,0	7,1	5,4
	506 (Люся) / <i>506 (Lusya)</i>	1,2	1,8	2,9	4,6	3,8	6,4	10,3	7,5
	НСР ₀₅	0,4	1,0	0,9	1,5	1,1	1,8	2,3	0,8
	НСР _{А и АВ}	0,2	0,5	0,4	0,7	0,5	0,8	1,0	0,4

Обсуждение полученных результатов.

Проведённые исследования показали, что среди испытываемых сортов и сортообразцов наиболее продуктивным себя показал сортообразец 506 (Люся), что подтверждает данные о потенциале сорта (Степанова Г.В. и др., 2023).

Различия в увеличении урожайности при инокуляции семян разными штаммами клубеньковых бактерий доказывают избирательность сортов люцерны изменчивой и их положительную реакцию на инокуляцию по ряду хозяйственно полезных признаков (Тихонович И.А. и Проворов Н.А., 2009; (Румянцева М.Л. и др., 2019). Однако, 415 производственный штамм в исследованиях не обеспечил прибавок, подобная тенденция отмечена и в работе Рапиной О.Г. (2019). Что объясняется снижением эффективности и генетической стабильности штамма с годами (Проворов и др., 2002; Arrighi JF et al., 2006; Тихонович И.А. и Проворов Н.А., 2008).

Заключение.

В южных районах Республики Карелия люцерна изменчивая может успешно произрастать и формировать продуктивные фитоценозы, обеспечивающие урожайность в среднем за два года до 7,45 т/га сухой массы. По итогам трёхгодичных исследований было выявлено, что наиболее продуктивными в условиях Республики Карелия являются растительно-микробные системы: сортообразец 506 (сорт Люся) и сорт Агния ВИК при инокуляции семян штаммом СХМ-1-105, (7,5 и 7,3 т/га соответственно). Штаммы клубеньковых бактерий А-1 и А-5 являются универсальными, так как инокуляция семян изучаемых сортов и сортообразцов привела к увеличению урожайности сухой массы более чем в 1,8-2,2 раза по сравнению с контрольным вариантом.

Список источников

1. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия / В.М. Косолапов, А.С. Цыгуткин, Н.В. Алдошин, Н.А. Лылин // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 41-47. [Kosolapov VM, Tsygutkin AS, Aldoshin NV, Lylin NA. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022;3:41-47. (*In Russ.*)]. doi: 10.25685/krm.2022.3.2022.007
2. Агротехника возделывания сортов люцерны селекции ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса на семенные и кормовые цели. (Рекомендации). М.: ФГУ РЦСК, 2008. 39 с. [Agrotehnika vozdelevaniya sortov ljucerny selekcii VNII kormov im. V.R. Vil'jamsa na semennye i kormovye celi. (Rekomendacii). Moscow: FGU RCSK; 2008:39 p. (*In Russ.*)].
3. Алферов А.А. Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы. М.: РАН, 2020. 184 с. [Alferov AA. Associativnyj azot, urozhaj i ustojchivost' agrojekosistemy. Moscow: RAN; 2020:184 p. (*In Russ.*)]. doi: 10.25680/VNIIA.2019.21.92.152
4. Атласова Л.Г. Симбиотическая деятельность клубеньковых бактерий *Medicago falcata* L. в условиях Центральной Якутии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5. С. 77-80. [Atlasova LG. Symbiotic activity of *Medicago falcata* L. root nodule in the conditions of Central Yakutia. *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;17(5):77-80. (*In Russ.*)].
5. Баринов В.Н., Новиков М.Н. Биологические приемы оптимизации минерального питания и развития козлятника восточного на легких почвах нечерноземной зоны // Агрохимия. 2021. № 9. С. 45-49. [Barinov VN, Novikov MN. Biological methods of optimization of mineral nutrition and development of eastern goat on light soils of the non-chernozem zone. *Agrohimia*. 2021;9:45-49. (*In Russ.*)]. doi: 10.31857/S0002188121090040
6. Высокоэффективные штаммы клубеньковых бактерий люцерны (*Medicago varia* L.): молекулярно-генетическая характеристика и использование в сопряженной селекции / М.Л. Румянцева, М.Е. Владимирова, В.С. Мунтян, Г.В. Степанова, А.С. Саксаганская, А.П. Кожемяков, А.Г. Орлова, А. Becker, Б.В. Симаров // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. № 6. С. 1306-1323. [Roumiantseva ML, Vladimirova ME, Muntyan VS, Stepanova GV, Saksaganskaya AS, Kozhemyakov AP, Orlova AG, Becker A, Simarov BV. Highly effective root nodule inoculants of alfalfa (*Medicago varia* L.): molecular-genetic analysis and practical usage in cultivar creation. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2019;54(6):1306-1323. (*In Russ.*)]. doi: 10.15389/Agrobiology.2019.6.1306rus doi: 10.15389/agrobiology.2019.6.1306eng

7. Гончаров П.Л., Лубенец П.А. Биологические аспекты возделывания люцерны. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1985. 255 с. [Goncharov PL, Lubenets PA. Biologicheskie aspekty vozdel'nyvanija ljucerny. Novosibirsk: Nauka: Sib. otd-nie; 1985:255 p. (*In Russ.*)].
8. Гребенников В.Г., Шипилов И.А., Хонина О.В. Энергосберегающая технология выращивания многолетних трав на деградированных каштановых почвах сухостепной зоны // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 2. С. 163-173. [Grebennikov VG, Shipilov IA, Honina OV. Energy-saving technology of growing perennial herbs on degraded chestnut soils of dry steppe zone. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(2):163-173. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-163
9. Донских Н.А., Ашим Д. Кормовая ценность бобовых видов при посеве их в чистом виде и в смеси со злаками // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2011. № 24. С. 14-16. [Donskikh NA, Ashim D. Kormovaja cennost' bobovyh vidov pri poseve ih v chistom vide i v smesi so zlakami. Izvestiya Sankt Petersburg State Agrarian University. 2011;24:14-16. (*In Russ.*)].
10. Донских Н.А., Владимирова В.В. Устойчивость разных сортов люцерны изменчивой в условиях Ленинградской области // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сб. науч. тр. СПб.: СПбГАУ, 2018. Ч. I. С. 11-15. [Donskikh NA, Vladimirova VV. Ustojchivost' raznyh sortov ljucerny izmenchivoj v uslovijah Leningradskoj oblasti. Nauchnoe obespechenie razvitiya APK v uslovijah importozameshhenija: sb. nauch. tr. Sankt- Petersburg: SPbGAU. 2018;1:11-15. (*In Russ.*)].
11. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с. [Dospikhov BA. Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij). 5-e izd., dop. i pererab. Moscow: Agropromizdat; 1985:351 p. (*In Russ.*)].
12. Евсеева Г.В., Смирнов С.Н. Многолетние травы - основа кормопроизводства Карелии. Петрозаводск: Карельская гос. с.-х. опытная станция, 2016. 77 с. [Evseeva GV, Smirnov SN. Mnogoletnie travy - osnova kormoproizvodstva Karelii. Petrozavodsk: Karel'skaja gos. s.-h. opytная stancija; 2016:77 p. (*In Russ.*)].
13. Использование биопрепаратов – дополнительный источник элементов питания растений / И.А. Тихонович, А.А. Завалин, Г.Г. Благовещенская, А.П. Кожемяков // Плодородие. 2011. № 3(60). С. 9-13. [Tikhonovich IA, Zavalin AA, Blagoveshchenskaya GG, Kozhemyakov AP. The use of biopreparation - an additional source of power plants. Plodorodie. 2011;3(60):9-13. (*In Russ.*)].
14. Козырева М.Ю., Басиева Л.Ж. Формирование симбиотического аппарата люцерны в зависимости от типа азотного питания // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15, № 1. С. 10-16. [Kozyreva MYu, Basieva LZh. Formation of a symbiotic apparatus of alfalfa depending on the nitrogen nutrition type. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2020;15(1):10-16. (*In Russ.*)]. doi: 10.12737/2073-0462-2020-10-16
15. Краснова Л.И. Частная селекция и первичное семеноводство полевых культур в условиях степного и лесостепного Приуралья: учеб. пособие. Оренбург: Изд. Центр ОГАУ, 2007. 219 с. [Krasnova LI. Chastnaja selekcija i pervichnoe semenovodstvo polevyh kul'tur v uslovijah stepnogo i lesostepnogo Priural'ja: ucheb. posobie. Orenburg: Izd. Centr OGAU; 2007:219 p. (*In Russ.*)].
16. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2: Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры / подгот. М.А. Федин и др. М., 1989. 194 с. [Fedin MA, et al. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skhozajstvennyh kul'tur. Vyp. 2: Zernovye, krupjanye, zernobobovye, kukuruza i kormovye kul'tury. Moscow; 1989:194 p. (*In Russ.*)].
17. Методика опытов на сенокосах и пастбищах / подгот. В.Г. Игловиков и др. М., 1971. Ч. 1. 232 с. [Iglovikov VG, et al. Metodika opytov na senokosah i pastbishhah. Moscow. 1971;1:232 p. (*In Russ.*)].
18. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа: монография / В.М. Косолапов, В.А. Чуйков, Х.К. Худякова, В.Г. Косолапова. М.: ООО «Угрешская типография», 2019. 272 с. [Kosolapov VM, Chuikov VA, Khudyakova HK, Kosolapova VG. Mineral'nye jelementy v kormah

i metody ih analiza: monografija. Moscow: ООО «Ugreshskaja tipografija»; 2019:272 p. (*In Russ.*)]. doi: 10.33814/monography_1654

19. Многолетние бобовые травы в Нечерноземье: монография / Н.Н. Лазарев, А.Д. Прудников, Е.М. Куренкова, А.М. Стародубцева. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2017. 263 с. [Lazarev NN, Prudnikov AD, Kurenkova EM, Starodubceva AM. Mnogoletnie bobovye travy v Nechernozem'e: monografija. Irkutsk: ООО «Мегапринт»; 2017:263 p. (*In Russ.*)].

20. Мордвинцев М.П., Байсиитова М.С. Сортовой состав и сортовые качества семян яровых зерновых культур в растениеводстве Адамовского района Оренбургской области и их динамика // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105, № 4. С. 232-245. [Mordvintsev MP, Baysiitova MS. Varietal composition and varietal qualities of spring cereal seeds and their dynamics in crop production of Adamovsky district, Orenburg region. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(4):232-245. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-4-232

21. Новиков М.Н. Биологические приемы эффективного использования азота почвы, удобрений, симбиотической азотфиксации в полевых агроценозах // Агрохимия. 2020. № 8. С. 60-69. [Novikov MN. Biological methods of effective use of nitrogen of soil, fertilizers, symbiotic fixation in field agrocenoses. Agrohimiya. 2020;8:60-69. (*In Russ.*)]. doi: 10.31857/S0002188120080086

22. Проворов Н.А., Борисов А.Ю., Тихонович И.А., Сравнительная генетика и эволюционная морфология симбиозов растений с микробами-азот-фиксаторами и эндомикоризными грибами // Журнал общей биологии. 2002. Т. 63. № 6. С. 451-472. [Provorov NA, Borisov AIu, Tikhonovich IA. Comparative genetics and evolutionary morphology of symbiosis formed by plants with nitrogen-fixing microbes and endomycorrhizal fungi. Journal of General Biology. 2002;63(6):451-472. (*In Russ.*)].

23. Рапина О.Г. Влияние инокуляции семян перспективными штаммами клубеньковых бактерий (*Sinorhizobium meliloti*) на продуктивность люцерны изменчивой в условиях Ленинградской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Санкт-Петербург, Пушкин, 2019. 20 с. [Rapina OG. Vlijanie inokuljacii semjan perspektivnymi shtammami kluben'kovyh bakterij (*Sinorhizobium meliloti*) na produktivnost' ljucerny izmenchivoj v uslovijah Leningradskoj oblasti: avtoref. dis. ... kand. s.-h. nauk. Sankt-Peterburg, Pushkin, 2019:20 p. (*In Russ.*)].

24. Сорта кормовых культур селекции ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса»: монография / ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса». М.: ООО «Угрешская Типография», 2019. 92 с. [FNC «VIK im. V. R. Vil'jamsa». Sorta kormovyh kul'tur selekcii FGBNU «Federal'nyj nauchnyj centr kormoproizvodstva i agrojekologii imeni V.R. Vil'jamsa»: monografija. Moscow: ООО «Ugreshskaja Tipografija»; 2019:92 p. (*In Russ.*)].

25. Сорта люцерны для северных регионов возделывания / Г.В. Степанова, А.А. Ионов, Н.М. Барсуков, А.В. Пьянков // Кормопроизводство. 2023. № 11. С. 32-36. [Stepanova GV, Ionov AA, Barsukov NM, Pyankov AV. Cultivating alfalfa varieties in northern regions. Kormoproizvodstvo. 2023;11:32-36. (*In Russ.*)].

26. Тихонович И.А., Проворов Н.А. Симбиозы растений и микроорганизмов: молекулярная генетика агросистем будущего. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. 209 с. [Tikhonovich IA, Provorov NA. Simbiozy rastenij i mikroorganizmov: molekuljarnaja genetika agrosistem budushhego. Sankt-Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterb. un-ta; 2009:209 p. (*In Russ.*)].

27. Arrighi JF, Barre A, Ben Amor B, et al. The Medicago truncatula lysin motif-receptor-like kinase gene family includes NFP and new nodule-expressed genes. Plant Physiol. 2006;142(1): 265-279. doi: 10.1104/pp.106.084657

28. Gao R, Wang B, Jia T, Luo Y, Yu Z. Effects of different carbohydrates our ceson alfalfa silage quality at differenten siling days. Agriculture. 2021;11(1):58. doi: 10.3390/agriculture11010058

References

1. Kosolapov VM, Tsygutkin AS, Aldoshin NV, Lylin NA. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. Fodder Production. 2022;3:41-47. doi: 10.25685/krm.2022.3.2022.007

2. Agrotechnics of alfalfa cultivation of alfalfa varieties selected by All-Russian Research Institute of Forages named after P. Williams for seed and fodder purposes. (Recommendations). Moscow: FGU RCHK; 2008:39 p.
3. Alferov AA. Associative nitrogen, yield and agroecosystem resistance. Moscow: RAS; 2020:184 p. doi: 10.25680/VNIIA.2019.21.92.152
4. Atlasova LG. Symbiotic activity of *Medicago falcata* L. root nodule in the conditions of Central Yakutia. Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015;17(5):77-80.
5. Barinov VN, Novikov MN. Biological methods of optimization of mineral nutrition and development of eastern goat on light soils of the non-black-soil zone. Agrochemistry. 2021;9:45-49. doi: 10.31857/S0002188121090040
6. Roumiantseva ML, Vladimirova ME, Muntyan VS, Stepanova GV, Saksaganskaya AS, Kozhemyakov AP, Orlova AG, Becker A, Simarov BV. Highly effective root nodule inoculants of alfalfa (*Medicago varia* L.): molecular-genetic analysis and practical usage in cultivar creation. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2019;54(6):1306-1323. doi: 10.15389/Agrobiology.2019.6.1306rus doi: 10.15389/agrobiology.2019.6.1306eng
7. Goncharov PL, Lubenets PA. Biological aspects of alfalfa cultivation. Novosibirsk: Nauka: Sib. department; 1985:255 p.
8. Grebennikov VG, Shipilov IA, Honina OV. Energy-saving technology of growing perennial herbs on degraded chestnut soils of dry steppe zone. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(2):163-173. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-163
9. Donskikh NA, Ashim D. Fodder value of legume species when sown pure and mixed with cereals. Izvestiya Sankt Petersburg State Agrarian University. 2011;24:14-16.
10. Donskikh NA, Vladimirova VV. Stability of different varieties of alfalfa in the conditions of the Leningrad region. Scientific support of agroindustrial complex development in the conditions of import substitution: collection of scientific articles SPb. St-Petersburg: SPbSAU. 2018;1:11-15.
11. Dospekhov BA. Methodology of field experiment: (with the basics of statistical processing of research results). 5th edition, supplement and revision. Moscow: Agropromizdat; 1985:351 p.
12. Evseeva GV, Smirnov SN. Perennial grasses - the basis of fodder production in Karelia. Petrozavodsk: Karelian State Agricultural Experimental Station; 2016: 77 p.
13. Tikhonovich IA, Zavalin AA, Blagoveshchenskaya GG, Kozhemyakov AP. The use of biopreparation - an additional source of power plants. Fertility. 2011;3(60):9-13.
14. Kozyreva MYu, Basieva LZ. Formation of a symbiotic apparatus of alfalfa depending on the nitrogen nutrition type. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2020;15(1):10-16. doi: 10.12737/2073-0462-2020-10-16
15. Krasnova LI. Private selection and primary seed production of field crops in conditions of steppe and forest-steppe Urals: textbook. Orenburg: Publishing Centre OSAU; 2007:219 p.
16. Fedin MA, et al. Methodology of state varietal testing of agricultural crops. Issue. 2: Cereals, legumes, maize and forage crops. Moscow; 1989:194 p.
17. Iglovikov VG, et al. Methods of experiments on hayfields and pastures. Moscow. 1971;1:232 p.
18. Kosolapov VM, Chuikov VA, Khudyakova HK, Kosolapova VG. Mineral elements in forages and methods of their analysis: monograph. Moscow: «Ugreshskaja tipografija» Ltd.; 2019:272 p. doi: 10.33814/monography_1654
19. Lazarev NN, Prudnikov AD, Kurenkova EM, Starodubceva AM. Perennial leguminous grasses in the Non-Black-Soil Region: a monograph. Irkutsk: OOO «Megaprint»; 2017:263 p.
20. Mordvintsev MP, Baysiitova MS. Varietal composition and varietal qualities of spring cereal seeds and their dynamics in crop production of Adamovsky district, Orenburg region. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(4):232-245. doi: 10.33284/2658-3135-105-4-232

21. Novikov MN. Biological methods of effective use of nitrogen of soil, fertilizers, symbiotic fixation in field agrocenoses. *Agrochemistry*. 2020;8:60-69. doi: 10.31857/S0002188120080086
22. Provorov NA, Borisov Alu, Tikhonovich IA. Comparative genetics and evolutionary morphology of symbiosis formed by plants with nitrogen-fixing microbes and endomycorrhizal fungi. *Journal of General Biology*. 2002;63(6):451-472.
23. Rapina OG. Effect of seed inoculation with promising strains of nodule bacteria (*Sinorhizobium meliloti*) on the productivity of alfalfa variegated in the conditions of the Leningrad region: diss. abstract ... Candidate of Agricultural Sciences. Sankt-Peterburg, Pushkin, 2019:20 p.
24. Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology. Varieties of forage crops selected by Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology: a monograph. Moscow: «Ugreshskaja Tipografija» Ltd.; 2019:92 p.
25. Stepanova GV, Ionov AA, Barsukov NM, Pyankov AV. Cultivating alfalfa varieties in northern regions. *Fodder Production*. 2023;11:32-36.
26. Tikhonovich IA, Provorov NA. Plant-microorganism symbioses: molecular genetics of agro-systems of the future. St.-Petersburg: Publishing House of St.-Peterb. University; 2009:209 p.
27. Arrighi JF, Barre A, Ben Amor B, et al. The *Medicago truncatula* lysin motif-receptor-like kinase gene family includes NFP and new nodule-expressed genes. *Plant Physiol*. 2006;142(1): 265-279. doi: 10.1104/pp.106.084657
28. Gao R, Wang B, Jia T, Luo Y, Yu Z. Effects of different carbohydrates our ceson alfalfa silage quality at differenten siling days. *Agriculture*. 2021;11(1):58. doi: 10.3390/agriculture11010058

Информация об авторах:

Александра Игоревна Камова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (КарНЦ РАН), Лаборатория агротехнологий "Вилга", 185011, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11, тел.: +79602165106.

Татьяна Валерьевна Степанова кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (СПбГАУ), 196601, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, 2А, тел.: +79213460961.

Анна Георгиевна Орлова кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (СПбГАУ), 196601, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, 2А, тел.: +7911825493.

Information about the authors:

Alexandra I Kamova, Junior Researcher, Federal State Budgetary Institution Karelian Research Center Laboratory of Agricultural Technologies "Vilga" Russia, Republic of Karelia, Petrozavodsk, 11 Pushkinska Street, 185011, tel.: +79602165106.

Tatyana V Stepanova, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg State Agrarian University, Russia, St. Petersburg, Pushkin, Peterburgskoe Ave., 2A, 196601, tel.: +79213460961.

Anna G Orlova, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg State Agrarian University, Russia, St. Petersburg, Pushkin, Peterburgskoe Ave., 2A, 196601, tel.: +7911825493

Статья поступила в редакцию 11.10.2024; одобрена после рецензирования 06.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 11.10.2024; approved after reviewing 06.12.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 309-323.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 309-323.

Обзорная статья
УДК 636.087.7
doi:10.33284/2658-3135-107-4-309

Гидролизированные белки: доступность, биоактивность, безопасность, применение при производстве кормов

Майсун Шаабан¹

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
¹maisoon.a.shaaban@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5000-741X>

Аннотация. В последние годы наблюдается растущий интерес к роли пептидов в кормлении животных. Обычно пептиды образуются из потреблённых белков в желудочно-кишечном тракте, но типы полученных пептидов могут значительно различаться в зависимости от физиологического состояния животных и состава рациона. Чтобы решить эту проблему производители кормов добавляют в качестве кормовых добавок белковые гидролизаты, полученные путём ферментативного или бактериального гидролиза белкового сырья растительного или животного происхождения для получения коротких цепочек аминокислот, направленных на повышение доступности легкоусвояемого белка или белковых фрагментов со специфической биологической активностью (антиоксидантной или антимикробной). Переработка сельскохозяйственных культур, животных, птиц и рыбы в пищевой промышленности приводит к образованию большого количества вторичных отходов в твёрдом или жидком виде. Переработанные отходы пищевой промышленности являются хорошим источником дешёвых белков, при использовании которых в качестве сырья в процессе гидролиза бесполезные растительные и пищевые отходы промышленности превращаются в ценные. Ферментативный гидролиз белков приводит к образованию пептидов и свободных аминокислот, которые усваиваются значительно быстрее, чем происходит всасывание исходного белка в связи с наличием специализированных транспортных систем пептидов с участием молекул-переносчиков в слизистой оболочке кишечника. Также в зависимости от типа ферментов, используемых при гидролизе, образуются пептиды, оказывающие благотворное биологическое воздействие на здоровье животных. В этой статье обсуждаются наиболее важные гидролизаты, используемые в кормах для животных, способ их доступности для усвоения, а также биологическая активность и безопасность активных фрагментов белков для здоровья животных.

Ключевые слова: кормление животных, кормовая добавка, биоактивные пептиды, гидролиз, технология защиты пептидов, кишечное всасывание

Для цитирования: Шаабан М. Гидролизированные белки: доступность, биоактивность, безопасность, применение при производстве кормов (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 309-323. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-309>

Review article

Hydrolyzed proteins: availability, bioactivity, safety, applications in feed production

Maisoon Shaaban¹

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
¹maisoon.a.shaaban@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5000-741X>

Abstract. Recent years have witnessed a growing interest in the role of peptides in animal nutrition. These peptides are typically formed from ingested proteins in the gastrointestinal tract, but the types of resultant peptides can vary greatly with the physiological conditions of the animals and the

composition of the diets. Therefore, feed manufacturers add hydrolysates obtained by enzymatic or bacterial hydrolysis of proteins from an animal or plant source to obtain peptides aimed at increasing the availability of easily digestible protein or peptides with specific biological activity, such as antioxidant or antimicrobial agents. The processing of agricultural crops, animals, poultry and fish in the food industry results in the formation of large amounts of secondary waste in solid or liquid form. These wastes are a good source of cheap proteins, which when used as raw materials in the hydrolysis process, are converted from useless waste into valuable ones. Enzymatic hydrolysis of proteins produces peptides and free amino acids, which are absorbed much faster than the original protein, due to the presence of specialized transporters in the intestinal mucosa. Also, depending on the type of protease, the peptides formed as a result of hydrolysis have beneficial biological effects on animal health. This article discusses the most important hydrolysates used in feed animal and their availability for absorption, as well as the bioactivity and safety of bioactive peptides for animal health.

Keywords: animal feeding, feed additive, bioactive peptides, hydrolysis, peptide protection technology, intestinal absorption

For citation: Shaaban M. Hydrolyzed proteins: availability, bioactivity, safety, applications in feed production (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):309-323. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-309>

Введение.

Биоактивные пептиды представляют собой специфические фрагменты белков, которые неактивны в исходном белке и становятся биологически активными при высвобождении из белка в результате гидролиза *in vitro*, кишечного пищеварения *in vivo* или микробной ферментации (Jakubczyk A et al., 2020). Они представляют собой последовательности от 2 до 20 аминокислот, которые после высвобождения улучшают свойства корма и приносят пользу здоровью животных (Karami Z and Akbari-Adergani B, 2019).

Биоактивные пептиды, используемые в качестве антимикробных пептидов и антиоксидантов для консервации кормов, могут ингибировать окисление липидов, удаляя свободные радикалы, взаимодействуя с ионами металлов (Durand E et al., 2021), существенно подавлять рост и размножение микроорганизмов, разрушая их клеточные мембраны или воздействуя на внутриклеточные компоненты (Chelliah R et al., 2021). Кроме того, антимикробные пептиды можно классифицировать на основе биологической активности, например, антибактериальные, противовирусные, противогрибковые, противопротозойные, противопаразитарные (Kamal I et al., 2023).

Гидролизат сои широко используется в современном кормлении животных в качестве альтернативы рыбной муке благодаря богатству незаменимыми аминокислотами и эффективности гидролиза соевого белка. Было доказано, что он содержит до 60 % свободных аминокислот (от массы гидролизующейся белковой смеси) и короткие пептиды с массой не более 3 кДа, что делает гидролизат сои богатым источником легкоусвояемого белка (Муранова Т.А. и др., 2019). Кроме того, было обнаружено, что использование гидролизата белка в кормлении животных и птицы способствует повышению показателей белкового обмена, а также максимальному проявлению их генетического потенциала продуктивности (Курбанова М.Г. и Генералова Н.А., 2011).

Цель исследования.

Анализ существующих на сегодняшний день литературных данных о концепции использования гидролизированных белков в качестве потенциальной кормовой добавки в рационах сельскохозяйственных животных.

Материалы и методы исследования.

Поиск и анализ литературы проводился с использованием интернет-ресурсов: РИНЦ – <https://www.elibrary.ru>, ScienceDirect – <https://www.sciencedirect.com>, PubMed – <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>, Google Scholar (Google Академия) – <https://scholar.google.ru/> за период 2000-2024 гг.

Результаты исследования и их обсуждение.

Биодоступность биоактивных пептидов или протеингидролаз. Процесс гидролиза белка требует использования протеолитических ферментов для гидролизации, а затем очистки пептидов и определения их аминокислотной последовательности, что является дорогостоящим процессом, поэтому нелогично осуществлять его, не гарантируя, что эти пептиды попадут в кровоток полностью и в неискаженном виде. То есть необходимо обеспечить условия, при которых активные пептиды абсорбируются без потери свойств в определённых участках тонкого кишечника, при этом успешно преодолевая воздействие пищеварительного тракта животного, его пищеварительных ферментов, кислую среду желудка и щелочную среду в других частях пищеварительного тракта, что важно для обеспечения желаемого биологического эффекта пептидов в организме животного. Поэтому во многих исследованиях изучался термин «биодоступность активных пептидов», под которым следует понимать процент пептидов, потребляемых животными, которые попадают в кровоток через желудочно-кишечный тракт (Udenigwe CC et al., 2021).

Имеются исследования, подтверждающие пероральный перенос пептидов, потребляемых с пищей, в кровоток, когда абсорбция пептидов происходит через слизистую оболочку полости рта путём пассивной диффузии, например, пероральное всасывание инсулина, который представляет собой пептидный гормон (Drucker DJ, 2020). Однако механизм переноса до сих пор не обнаружен (Verma S et al., 2021). С другой стороны, большая часть пептидов всасывается в тощей кишке, как и остальные питательные вещества (в том числе жирные кислоты, моно- и олигосахариды, витамины и минералы), которые проникают через стенку кишечника и достигают большого круга кровообращения. Существует четыре способа транспортировки пептидов через кишечник: парацеллюлярная диффузия, трансклеточная пассивная диффузия, транцитоз и транспорт, опосредованный переносчиками (Amigo L and Hernandez-Ledesma B, 2020). Чтобы улучшить доступность биоактивных пептидов и обеспечить их правильное всасывание слизистой оболочкой кишечника можно использовать следующие стратегии:

1. Технология химической модификации биоактивных пептидов. Одной из основных стратегий улучшения проницаемости мембран является циклизация линейных полипептидных цепей, поскольку макроциклические пептиды с их большой поверхностью лучше прилипают к кишечной мембране (Dougherty PG et al., 2019);

2. Технологии доставки. Естественный транспорт через кишечный барьер ограничен транспортёрами, присутствующими в эпителии. Использование усилителей кишечной абсорбции обеспечивает создание новых путей для соединений с низким профилем проникновения (например, микро-/наночастицы, гидрогели, биоконъюгаты (Sanchez-Navarro M et al., 2016; Ibrahim YHY et al., 2020; Luo Z et al., 2021).

3. Технологии защиты гидролизованых белков и биоактивных пептидов. С целью повышения биодоступности используются несколько методов защиты, которые, в свою очередь, делятся на два типа: нанокапсулирование и микрокапсулирование.

Нанокапсуляция производится распылительной сушкой либо электронапылением – методы липидных систем доставки, методы электропрядения, методы электрораспыления и т. д. (Chadha S, 2021). Методы распылительной сушки и электронапыления являются наиболее применимыми методами инкапсулирования биоактивных пептидов (Berraquero-Garcia C et al., 2023).

Технология микроинкапсуляции позволяет эффективно решать трудности с сохранением активных пептидов и повысить уровень их использования. Защитными покрытиями для инкапсуляции активных пептидов являются следующие полимерные материалы: природные, модифицированные и синтетические. По сравнению с природными полимерами синтетические и модифицированные демонстрируют более высокую скорость внедрения пептидов и механическую прочность (Li M et al., 2023). Одним из важнейших условий успеха процесса инкапсулирования является то, что биоактивные пептиды сохраняют свою активность до тех пор, пока не достигнут органа-мишени, где и проявят свою активность (Amigo L and Hernandez-Ledesma B, 2020);

4. Смешивание гидролизованых белковых добавок в объёме кормосмеси.

Инкапсулирование гидролизovaných белков и активных пептидов недостаточно для повышения их доступности на кишечном уровне, поэтому необходимо учитывать размер капсул и обеспечивать их однородное распределение в комбикорме, поскольку равномерность их размещения обеспечивает одинаковую пищевую ценность корма во всём его объёме (Шахов В.А. и др., 2021). Наноразмер компонентов помогает им легко проникать сквозь мембраны клеток кишечника, но процесс равномерного распределения этих наночастиц в объёме кормовой смеси очень сложен. В связи с этим была разработана новая конструкция оборудования для смешивания компонентов комбикормов с наночастицами, что позволило гомогенизировать их распределение в массе кормовой смеси (Самосюк В.В. и Шахов В.А., 2023).

Инкапсулирование биологически активных пептидов и гидролизovaných белков не только направлено на повышение их доступности на уровне тонкого кишечника, но и преодолевает трудности прямого их использования, связанные со свойствами биологически активных пептидов и гидролизovaných белков, а именно, физическая и химическая нестабильность, а также влажность и горечь (Sarabandi K et al., 2020).

Биоактивность гидролизovaných белков. Биологическая активность пептидов варьируется в зависимости от аминокислотной последовательности пептида, которая, в свою очередь, варьируется в зависимости от фермента, используемого для гидролиза исходного белка. В таблице 1 представлена различная биоактивность пептидов при гидролизе β -лактоглобулина в зависимости от используемого фермента.

Таблица 1. Различная биоактивность пептидов при гидролизе β -лактоглобулина в зависимости от используемого фермента
Table 1. Different bioactivity of peptides in β -lactoglobulin hydrolysis depending on the enzyme used

Исходный белок / <i>Original protein</i>	Фермент / <i>Enzyme</i>	Аминокислотная последовательность пептидов / <i>Amino acid sequence of peptides</i>	Биоактивность / <i>Bioactivity</i>	Ссылки/ <i>References</i>
β -лактоглобулин <i>/β-Lactoglobulin</i>	Алькаласа <i>/Alcalase</i>	Иле-Асп-Ала-Лей-Асн- Глу-Лис <i>/Ile-Asp-Ala-Leu- Asn-Glu-Lys</i>	Антиоксидант <i>/Antioxidant</i>	Garcia-Casas VE et al., 2022
β -лактоглобулин <i>/β-Lactoglobulin</i>	Пепсин <i>/Pepsin</i>	Лис-Вал-Ала-Гли-Тр <i>/Lys- Val-Ala-Gly-Thr</i>	Антимикробный пептид <i>/Antimicrobial peptide</i>	Broersen K, 2020
β -лактоглобулин <i>/β-Lactoglobulin</i>	Трипсин <i>/Trypsin</i>	Вал 15-Ала-Гли-Тр-Трп- Тир20 <i>/Val 15-Ala-Gly-Tyr- Trp-Tyr20</i>	Антиоксидант <i>/Antioxidant</i>	Meng Y et al., 2021
β -лактоглобулин <i>/β-Lactoglobulin</i>	Химотрипсин <i>/Chymotrypsin</i>	Гис ₁₄₆ -Иле-Арг-Лей ₁₄₉ <i>/His146-Ile-Arg-Leu149</i>	Опиоидная активность / <i>Opioid activity</i>	Zhao C and Ashaolu TJ et al., 2021

Из таблицы 1 видно, что пептиды, несущие в своей последовательности гистидин, глутаминовую кислоту, пролин, тирозин, цистеин, метионин или фенилаланин – это пептиды с антиоксидантными свойствами. Также многими исследователями отмечается, что при гидролизе молочных белков наблюдается выработка биологически активных пептидов, обладающих противомикробными свойствами. Таким образом, перспективным является использование гидролизата этих белков в консервировании кормов.

Пептиды, освобождённые под действием кислотности желудка от исходного белка, благодаря своей ионной природе связываются с такими минералами, как кальций и фосфор (Sun X et al., 2020), что увеличивает абсорбцию этих минералов. Например, когда белок льняного семени гидролизуется ферментом алкалазой, в результате гидролиза образуются гидрофобные и положительно заряженные аминокислоты, которые связываются с металлами, что способствует образованию пептидно-минерального комплекса (Zaky AA et al., 2022). Было опубликовано множество статей о создании и характеристике биоактивных пептидов с противомикробными, противовоспалительными, антигипертензивными, противоожирительными и антиоксидантными свойствами. Кроме того, многим исследователям удалось синтетически производить пептиды с ранее упомянутыми характеристиками. (Durand E et al., 2021; Garcia-Casas VE et al., 2022; Zaky AA et al., 2022).

Безопасность применения гидролизованных белков в кормах. Известно, что токсичность пептидов может возникнуть во время предварительной обработки или экстракции исходного белка, поскольку возможно образование нежелательных производных, таких как лизиноаланин, D-аминокислоты или биогенные амины, которые оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье (Liu L et al., 2020). Также рацемизация аминокислот, модификация пептидов, включая образование изопептидных связей, и реакция Майяра могут происходить во время экстракции белка, его предварительной обработки и приготовления пептидов (Liu L et al., 2020).

Безопасность гидролизованного белка определяется тем, что для питания животного фактически используется исходный белок, безопасность которого была проверена. Метод гидролиза также влияет на качество получаемых в результате пептидов. Например, метод ферментативного гидролиза считается более безопасным по сравнению с химическим гидролизом. Многие исследования рекомендуют получать гидролизаты белков путём ферментативного гидролиза из-за его положительного влияния на пищеварение у животных (Прокофьева А.А. и др., 2023). Также необходимо обратить внимание на тип ферментов, используемых при ферментативном гидролизе, так как попадание этих ферментов в организм животного с кормом может вызвать их активацию внутри организма из-за наличия подходящей кислотности и температурных условий, именно поэтому рекомендуется использовать пищевые ферменты. Обычно применяются различные типы протеаз животного, растительного, грибкового или бактериального происхождения (Костылева Е.В. и др., 2023). Например, в России выпускают ферментный препарат Протосубтилин (ОАО «Сиббиофарм», Россия) – препарат субтилилина BPN[®] и металлопротеазы на основе штамма *B. subtilis*, предназначенный для применения в кормопроизводстве (Костылева Е.В. и др., 2023).

Применение гидролизованных белков при производстве кормов. Использование гидролизованных белков в кормах направлено на повышение процента легкоусвояемых белков, использование свойств пептидов, образующихся в результате гидролиза (таких как антиоксидантная и антимикробная активность), сохранение корма и повышение поедаемости нетрадиционных кормов, таких, например, как отходы масложивой промышленности, при их использовании уровень загрязнения окружающей среды снижается. Среди наиболее важных протеингидролаз, которые использовались при приготовлении кормов, отметим следующие:

1. Гидролизат дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Недостаток белка в растительных ингредиентах кормов побудил исследователей восполнить его дефицит за счёт кормовых добавок с высоким содержанием белка и лёгкой усвояемостью. Использование добавок гидролизованного белка из *Saccharomyces cerevisiae* (4 % гидролизованного белка сухих пивных дрожжей) в рационе поросят-отъёмышей помогло ускорить набор веса и увеличить потребление корма (Boontiam W et al., 2022), где гидролизованные дрожжи содержали 41,84 % сырого белка от сухой массы. Добавление гидролизата дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в рацион в дозировках 50-150 мг/кг корма оказало положительное влияние на показатели роста, параметры сыворотки крови, относительную массу органов, характеристики тушки, качество мяса и антиоксидантную способность бройлеров (Wang T et al., 2022).

2. Гидролизат дрожжей *Yarrowia lipolytica*. На основании свойств *Yarrowia lipolytica* белковые гидролизаты из этих дрожжей считаются кормовой добавкой для животных, они имеют вы-

сокую пищевую ценность, сравнимую и в некоторых отношениях превосходящую таковую у пивных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Они обеспечивают животных ценными минералами, витаминами, высококачественными белками, содержание которых может достигать до 60 % от сухой массы, при этом большую часть этих белков составляют незаменимые аминокислоты. Дрожжи *Yarrowia lipolytica* являются источником полиненасыщенных жирных кислот, безопасных для использования в кормах для животных (Patsios SI et al., 2020). Многие исследования подтверждают, что эти дрожжи приводят: а) к увеличению прироста живой массы; б) к улучшению коэффициента конверсии корма; в) к положительному влиянию на микрофлору кишечника; г) к стимуляции антиоксидантных механизмов и иммунной системы; д) к стимулированию эритропоэтических процессов и е) к повышению метаболического статуса животных (Patsios SI et al., 2020).

3. Гидролизат агропромышленных отходов. Вторичное сырьё, получаемое попутно в агропромышленной сфере, считается очень хорошим источником белка и биологически активных пептидов. Эти отходы делятся на два вида: полевые отходы, такие как стебли, листья и корни сельскохозяйственных культур, и отходы последующих промышленных процессов, например, шроты, образующиеся в результате прессования масличных культур.

Кукурузный белок был идентифицирован как важный источник биоактивных пептидов. Такие пептиды могут высвобождаться при гидролизе, вызванном протеолитическими ферментами (нейтраза и алкалаза) или микробной ферментацией (Li G et al., 2019).

Соевый белок имеет высокую пищевую ценность, поскольку содержит незаменимые аминокислоты. Но зерно сои также содержит антипитательные вещества, его сложно использовать непосредственно в кормах для животных без предварительной обработки. Гидролизаты, полученные из сои, обладают биологическими функциями, которые имеют пищевое и терапевтическое применение. Добавление гидролизата соевого белка в корм курам-несушкам вызывает повышение яйценоскости с увеличением массы яиц и оказывает антистрессовое действие (Ежелев А.В. и др., 2019). С другой стороны, гидролизат соевого белка стимулирует секрецию аноректического гормона и ингибирует потребление корма свиньями (Wang T et al., 2022). Доказано, что ферментация соевого шрота бактериями (*Bacillus subtilis*) значительно увеличила содержание растворимого белка с 6,3 % до 22,8 %, что является важной стратегией для повышения ценности сырья, используемого в кормах для моногастричных животных (Filipe D et al., 2023).

Основной проблемой включения подсолнечного шрота в рацион бройлеров является высокое содержание клетчатки в подсолнечном шроте, что может отрицательно сказаться на показателях роста. Гидролизат подсолнечного шрота применяется для повышения использования клетчатки моногастричными животными (птица и свиньи). Помимо того, биоактивные пептиды, полученные в результате гидролиза белка подсолнечника, продемонстрировали противовоспалительный и иммуностимулирующий эффекты. Различные белки и аминокислоты потенциально могут применяться при приготовлении кормов для животных (Egea MB et al., 2021).

По сравнению с сырыми семенами хлопка гидролизаты семян хлопка содержат меньший процент госсипола, который является антипитательным веществом. В исследовании на телятах после отъёма гидролизат семян хлопка добавляли в разных пропорциях. Результаты показали, что добавление этой кормовой добавки в небольшой норме (2 или 4 %) не влияло на потребление корма или средний суточный прирост живой массы, но в то же время оказывало антиоксидантное и противомикробное действие. Однако при концентрации 6 % наблюдался отрицательный эффект: потребление корма снизилось на 18 %. Это объяснялось вкусом пептидов в кормовой добавке (Dolatkhah B et al., 2020).

При переработке злаковых культур на крахмал в виде отходов образуется большие количества дешёвого белка. Основным белком в этих отходах является глютен, который служит незаменимым сырьём при производстве кормов для животноводства и рыбоводства. Ферментативный гидролиз глютена даёт возможность расширить область применения глютена (Костылева Е.В. и др., 2023).

В таблице 2 представлены наиболее важные гидролизаты вторичного сырья растительного происхождения, используемые в кормах для животных, показана их биологическая активность.

Таблица 2. Гидролизаты агропромышленных отходов, используемых в кормах для животных, и биоактивность их пептидов

Table 2. Hydrolysates of agro-industrial wastes used in animal feed and the bioactivity of their peptides

Агропромышленные отходы / <i>Agro-industrial wastes</i>	Биоактивные пептиды / <i>Bioactive peptides</i>	Биоактивность / <i>Bioactivity</i>	Ссылки / <i>References</i>
Соевый шрот / <i>Soybean meal</i>	Глу-Глн-Асп-Глу-Арг-Глн-Фен-Про-Фен-Про и Лей-Фен-Сер-Мет-Сер / <i>Glu-Gln-Asp-Glu-Arg-Gln-Phe-Pro-Phe-Pro and Leu-Phe-Ser-Met-Ser</i>	Противомикробные агенты / <i>Antimicrobial agents</i> Антиоксидантная активность / <i>Antioxidant activity</i>	Freitas CS et al., 2019 Yang J et al., 2019
Пшеничные отруби / <i>Wheat bran</i>	Асп-Лей-Асп-Трп и Асп-Лей-Гли-Лей / <i>Asp-Leu-Asp-Trp and Asp-Leu-Gly-Leu</i>	Антиоксидантная активность / <i>Antioxidant activity</i>	Zhuang M et al., 2024
Подсолнечный шрот / <i>Sunflower meal</i>	Про-Ала-Асп-Вал-Тр-Про-Глю-Глю-Лис-Про-Глю-Вал / <i>Pro-Ala-Asp-Val-Thr-Pro-Gln-Gln-Lys-Pro-Gln-Val</i>	Антиоксидантная и противовоспалительная активность / <i>Antioxidant and anti-inflammatory activity</i>	Tonolo F et al., 2024
Хлопковый шрот / <i>Cottonseed meal</i>	Цис-Сер-Про-Гис / <i>Cys-Ser-Pro-His</i>	Антиоксидантная, антимикробная, и иммуномодулирующая активность / <i>Antioxidant, antimicrobial and immunomodulatory activity</i>	Kumar M et al., 2022
Кукурузный глютен / <i>Corn gluten meal</i>	Цис-Гли-Мет-Про / <i>Cys-Gly-Met-Pro</i>	Антиоксидантная активность / <i>Antioxidant activity</i>	Jiang X et al., 2020
Кунжутный шрот / <i>Sesame meal</i>	Тир-Ала-Гис-Тир-Сер-Тир-Ала / <i>Tyr-Ala-His-Tyr-Ser-Tyr-Ala</i>	Ингибирующая активность АПФ/АЦЕ (Angiotensin-Converting Enzyme) / <i>inhibitory activity</i>	Lu X et al., 2021
Рапсовый шрот / <i>Rapeseed meal</i>	Трп-Асп-Гис-Гис-Ала-Про-пул-Лей-Арг / <i>Trp-Asp-His-His-Ala-Pro-pul-Leu-Arg</i>	Антиоксидантная активность / <i>Antioxidant activity</i>	Xu F et al., 2018

В качестве вторичных материальных ресурсов, используемых для кормления животных, можно рассмотреть продукты переработки ржи. Так как в её аминокислотном составе содержится большое количество лизина и триптофана, вторичное сырьё ржи очень многообещающее для получения аминокислот, а именно L-лизина – незаменимой аминокислоты, в чистом виде являющейся высокоэффективной кормовой добавкой (Прокофьева А.А. и др., 2023).

4. Гидролизаты отходов пищевой промышленности. В связи со значительным увеличением населения мира уровень развития пищевой промышленности существенно возрос, при этом количество отходов, образующихся в отрасли, значительно увеличилось. Ежегодно предприятия пищевой промышленности, такие как заводы по производству соков, чипсов, мяса, кондитерских изделий и фруктов, а также рестораны и отели производят огромное количество органических отходов.

Накапливающиеся отходы промышленной переработки мясных продуктов и тушек животных содержат скоропортящиеся белки, которые могут создавать серьёзные неудобства для населения из-за неприятного запаха (Zainal Arifin MA et al., 2023). Кроме того, они включают компоненты, которые невозможно использовать в их естественном виде, например, перья и кости.

В процессе гидролиза эти отходы превращаются в легкоусвояемые белковые вещества, богатые аминокислотами, необходимыми для здоровья животных.

Так, только рыбоперерабатывающая промышленность производит более 60 % побочных продуктов в виде отходов. Их также можно переработать с помощью ферментативного гидролиза. Гидролизаты рыбного белка обладают многочисленными биологическими свойствами, в том числе антиоксидантными, антимикробными, антиагрегантными, а также свойством связывать кальций (Idowu AT et al., 2021).

Установлено, что при включении гидролизатов отходов тушек норки в качестве кормовой добавки в рацион бычков с возраста 4-6 месяцев наблюдается снижение содержания лейкоцитов и повышение до физиологического уровня процентного содержания в лейкограмме лимфоцитов, также была отмечена нормализация показателей резервной щёлочности. Механизм этого процесса объясняется увеличением синтеза пропионовой кислоты в рубце в активизации процесса неогликогенолиза (Денисенко В.Н. и др., 2022).

Из-за высокой стоимости кормов для аквакультуры некоторые из основных компонентов корма для рыб заменяются альтернативными источниками белка, такими как гидролизаты белков животного происхождения (Кошак Ж.В. и др., 2024).

Также стоит отметить возможность сочетания белковых гидролизатов растительного происхождения с гидролизатами белков животного происхождения для получения кормовой добавки с высокой биологической эффективностью. Так, в рацион молоди карпа был введён растительно-рыбный гидролизат в соотношении одной части рыбных отходов и двух частей рапсового жмыха или соевого шрота с целью увеличения продуктивности рыбы (Кошак Ж.В. и др., 2024).

Заключение.

Использование процесса гидролиза при приготовлении кормов имеет питательную перспективу, так как белковые гидролизаты обеспечивают организм животного легкоусвояемыми и биоактивными пептидами, а также специфическими аминокислотами, с другой стороны, гидролиз удаляет антипитательные вещества из растительного сырья, и придаёт корму приятный вкус. С экономической точки зрения пептиды, полученные из белкового гидролизата, увеличивают сроки хранения кормов и расширяют сырьевую базу, используемую в комбикормовой промышленности, поскольку позволяют использовать нетрадиционное сырьё, такое как отходы маслобойной, мясной и сельскохозяйственной промышленности. Применение гидролизированных белков считается перспективным направлением производства функциональных кормов и кормовых добавок на основе переработки промышленных отходов, избавляя таким образом окружающую среду от загрязнения.

Список источников

1. Альтернативные источники белка в кормлении рыбы / Ж.В. Кошак, А.Н. Гринько, Д.Е. Алешин, Н.П. Буряков // Аграрный вестник Нечерноземья. 2024. № 1(13). С. 54-62. [Koshak ZhV, Grinko AN, Aleshin DE, Buryakov NP. Productivity, nitrogen balance and biochemical blood parameters

in cows when fermented rapeseed meal is included in the diet of different levels. *Agrarian Bulletin of the non Chernozem region*. 2024;1(13):54-62. (*In Russ.*). https://doi.org/10.52025/2712-8679_2024_01_54

2. Гематологические и биохимические показатели крови бычков при использовании в качестве кормовой добавки гидролизата тушек норок / В.Н. Денисенко, В.А. Балыков, Р.В. Рогов, Ю.С. Круглова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2022. Т.17 № 3. С. 373-381. [Denisenko VN, Balykov VA, Rogov RV, Kruglova YuS. Hematological and biochemical parameters of bulls' blood when using mink carcass hydrolyzate as a feed additive. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2022;17(3):373-381. (*In Russ.*). <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-3-373-381>

3. Изучение влияния гидролизата соевого белка на птиц / А.В. Ежелев, Ю.Г. Ткаченко, З.Н. Федорова, В.Г. Блядзе // Адаптивное кормопроизводство. 2019. № 2. С. 77-84. [Ezhelev AV, Tkachenko YuG, Fedorova ZN, Bliadze VG. Study of the influence of soybean protein hydrolyzate for poultry. *Adaptive Fodder Production*. 2019;2:77-84. (*In Russ.*). <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2019-2-77-84>

4. Использование протеолитических ферментов для получения белковых гидролизатов пищевого назначения из вторичного сырья / Е.В. Костылева, А.С. Середя, И.А. Великорецкая, Е.И. Курбатова, Н.В. Цурикова // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 1. С. 116-132. [Kostyleva EV, Sereda AS, Velikoretskaya IA, Kurbatova EI, Tsurikova NV. Proteases for obtaining of food protein hydrolysates from proteinaceous by-products. *Problems of Nutrition*. 2023;92(1):116-132. (*In Russ.*). <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-116-132>

5. Курбанова М.Г., Генералова Н.А. Биотехнология гидролизатов молочных белков для кормовой добавки // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 2. С. 76-77. [Kurbanova MG, Generalova NA. Biotechnology of milk protein hydrolysates for feed additive. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2011;2:76-77. (*In Russ.*).]

6. Муранова Т.А., Зинченко Д.В., Мирошников А.И. Гидролизаты соевых белков для стартовых кормов аквакультуры: поведение белков при ферментализе, композиционный анализ гидролизатов // Биоорганическая химия. 2019. Т. 45. № 4. С. 380-390. [Muranova TA, Zinchenko DV, Miroshnikov AI. Hydrolysates of soybean proteins for start feeds of aquaculture: behavior of proteins at fermentolysis, compositional analysis of hydrolysates. *Bioorganicheskaya Khimiya*. 2019;45(4):380-390. (*In Russ.*).] <https://doi.org/10.1134/S0132342319030035>

7. Прокофьева А.А., Быков А.В., Кван О.В. Белковые отходы как альтернативные источники белка в рационе (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 2. С. 112-126. [Prokofieva AA, Bykov AV, Kvan OV. Protein waste as alternative sources of protein in the diet (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(2):112-126. (*In Russ.*).] <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-112>

8. Самосюк В.В., Шахов В.А. Приготовление нанокормосмеси для интенсивного откорма // Техника и технологии в животноводстве. 2023. Т. 3. № 51. С. 45-49. [Samosyuk VV, Shakhov VA. Preparation of nano feed mixture for intensive fattening. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2023;3(51):45-49. (*In Russ.*).] <https://doi.org/10.22314/27132064-2023-3-45>

9. Шахов В.А., Попов В.П., Белов А.Г. Исследование методики определения содержания наночастиц в комбикорме по сопутствующему верхтонкоизмельченному компоненту // Техника и технологии в животноводстве. 2021. Т. 4. № 44. С. 54-57. [Shakhov VA, Popov VP, Belov AG. Investigation of the nanoparticles content in compound feed determination according to the accompanying superfine component's method. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021;4(44):54-57. (*In Russ.*).] <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-4-54>

10. Amigo L, Hernandez-Ledesma B. Current evidence on the bioavailability of food bioactive peptides. *Molecules*. 2020;25(19):4479. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25194479>

11. Berraquero-Garcia C, Perez-Galvez R, Espejo-Carpio FJ, et al. Encapsulation of bioactive peptides by spray-drying and electrospraying. *Foods*. 2023;12(10):2005. <https://doi.org/10.3390/foods12102005>

12. Boontiam W, Bunchasak C, Kim YY, Kitipongpysan S, Hong J. Hydrolyzed yeast supplementation to newly weaned piglets: Growth performance, gut health, and microbial fermentation. *Animals*. 2022;12(3):350. <https://doi.org/10.3390/ani12030350>
13. Broersen K. Milk processing affects structure, bioavailability and immunogenicity of β -lactoglobulin. *Foods*. 2020;9(7):874. <https://doi.org/10.3390/foods9070874>
14. Chadha S. Recent advances in nano-encapsulation technologies for controlled release of biostimulants and antimicrobial agents. In: Jogaiah S, Singh HB, Fraceto LF, de Lima R, editors. *Advances in nano-fertilizers and nano-pesticides in agriculture*. India: Woodhead Publishing; 2021:29-55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820092-6.00002-1>
15. Chelliah R, Wei S, Daliri EBM, Elahi F, Yeon SJ, Tyagi A, Oh DH, et al. The role of bioactive peptides in diabetes and obesity. *Foods*. 2021;10(9):2220. <https://doi.org/10.3390/foods10092220>
16. Dolatkhan B, Ghorbani GR, Alikhani M, Hashemzadeh F, Mahdavi AH, Sadeghi-Sefidmazgi A, Rezamand P. Effects of hydrolyzed cottonseed protein supplementation on performance, blood metabolites, gastrointestinal development, and intestinal microbial colonization in neonatal calves. *Journal of Dairy Science*. 2020;103(6):5102-5117. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17297>
17. Dougherty PG, Sahni A, Pei D. Understanding cell penetration of cyclic peptides. *Chem Rev*. 2019;119(17):10241-10287. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00008>
18. Drucker DJ. Advances in oral peptide therapeutics. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2020;19(4):277-289. <https://doi.org/10.1038/s41573-019-0053-0>
19. Durand E, Beaubier S, Ilic I, Kapel R, Villeneuve P. Production and antioxidant capacity of bioactive peptides from plant biomass to counteract lipid oxidation. *Current Research in Food Science*. 2021;4:365-397. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.05.006>
20. Egea MB, de Oliveira Filho JG, Bertolo MRV, de Araujo JC, Gauterio GV, Lemes AC. Bioactive phytochemicals from sunflower (*Helianthus annuus* L.) Oil processing by-products. In: Ramadan Hassani MF, editor. *Bioactive Phytochemicals from Vegetable Oil and Oilseed Processing By-products*. Reference Series in Phytochemistry. Springer, Cham. 2021:1-16. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63961-7_4-1
21. Filipe D, Vieira L, Ferreira M, Oliva-Teles A, Salgado J, Belo I, Peres H. Enrichment of a plant feedstuff mixture's nutritional value through solid-state fermentation. *Animals*. 2023;13(18):2883. <https://doi.org/10.3390/ani13182883>
22. Freitas CS, Vericimo MA, da Silva ML, da Costa GCV, Pereira PR, Paschoalin VMF, Del Aguila EM. Encrypted antimicrobial and antitumoral peptides recovered from a protein-rich soybean (*Glycine max*) by-product. *Journal of Functional Foods*. 2019;54:187-198. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.01.024>
23. Garcia-Casas VE, Seiquer I, Pardo Z, Haro A, Recio I, Olías R. Antioxidant potential of the sweet whey-based beverage colada after the digestive process and relationships with the lipid and protein fractions. *Antioxidants*. 2022;11(9):1827. <https://doi.org/10.3390/antiox11091827>
24. Ibrahim YHY, Regdon G, Hamedelniei EI, Sovany T. Review of recently used techniques and materials to improve the efficiency of orally administered proteins/peptides. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2020;28:403-416. <https://doi.org/10.1007/s40199-019-00316-w>
25. Idowu AT, Igiehon OO, Idowu S, Olatunde OO, Benjakul S. Bioactivity potentials and general applications of fish protein hydrolysates. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*. 2021;27:109-118. <https://doi.org/10.1007/s10989-020-10071-1>
26. Jakubczyk A, Karas M, Rybczynska-Tkaczyk K, Zielinska E, Zielinski D. Current trends of bioactive peptides—New sources and therapeutic effect. *Foods*. 2020;9(7):846. <https://doi.org/10.3390/foods9070846>
27. Jiang X, Cui Z, Wang L, Xu H, Zhang Y. Production of bioactive peptides from corn gluten meal by solid-state fermentation with *Bacillus subtilis* MTCC5480 and evaluation of its antioxidant capacity in vivo. *LWT*. 2020;131:109767. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109767>

28. Kamal I, Ashfaq UA, Hayat S, Aslam B, Sarfraz MH, Yaseen H, Khurshid M. Prospects of antimicrobial peptides as an alternative to chemical preservatives for food safety. *Biotechnology Letters*. 2023;45(2):137-162. <https://doi.org/10.1007/s10529-022-03328-w>
29. Karami Z, Akbari-Adergani B. Bioactive food derived peptides: A review on correlation between structure of bioactive peptides and their functional properties. *Journal of Food Science and Technology*. 2019;56:535-547. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3549-4>
30. Kumar M, Hasan M, Choyal P, Tomar M, Gupta OP, Sasi M, Kennedy JF, et al. Cotton-seed feedstock as a source of plant-based protein and bioactive peptides: Evidence based on biofunctionalities and industrial applications. *Food Hydrocolloids*. 2022;131:107776. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107776>
31. Li G, Liu W, Wang Y, Jia F, Wang Y, Ma Y, et al. Functions and applications of bioactive peptides from corn gluten meal. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2019;87:1-41. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.07.001>
32. Li M, Guo Q, Lin Y, Bao H, Miao S. Recent progress in microencapsulation of active peptides—wall material, preparation, and application: a review. *Foods*. 2023;12(4):896. <https://doi.org/10.3390/foods12040896>
33. Liu L, Li S, Zheng J, Bu T, He G, Wu J. Safety considerations on food protein-derived bioactive peptides. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;96:199-207. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.022>
34. Lu X, Sun Q, Zhang L, Wang R, Gao J, Jia C, Huang J. Dual-enzyme hydrolysis for preparation of ACE-inhibitory peptides from sesame seed protein: optimization, separation, and identification. *Journal of Food Biochemistry*. 2021;45(4):13638. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13638>
35. Luo Z, Paunovic N, Leroux JC. Physical methods for enhancing drug absorption from the gastrointestinal tract. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2021;175:113814. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.05.024>
36. Meng Y, Hao L, Tan Y, Yang Y, Liu L, Li C, Du P. Noncovalent interaction of cyanidin-3-O-glucoside with whey protein isolate and β -lactoglobulin: Focus on fluorescence quenching and antioxidant properties. *LWT*. 2021;137:110386. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110386>
37. Patsios SI, Dedousi A, Sossidou EN, Zdragas A. Sustainable animal feed protein through the cultivation of *Yarrowia lipolytica* on agro-industrial wastes and by-products. *Sustainability*. 2020;12(4):1398. <https://doi.org/10.3390/su12041398>
38. Sanchez-Navarro M, Garcia J, Giralt E, Teixido M. Using peptides to increase transport across the intestinal barrier. *Advanced drug delivery reviews*. 2016;106:355-366. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.031>
39. Sarabandi K, Gharehbeglou P, Jafari SM. Spray-drying encapsulation of protein hydrolysates and bioactive peptides: Opportunities and challenges. *Drying Technology*. 2020;38(5-6):577-595. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1689399>
40. Sun X, Sarteshnizi RA, Boachie RT, Okagu OD, Abioye RO, Pfeilsticker Neves R, Ohanenye IC, Udenigwe CC. Peptide–mineral complexes: Understanding their chemical interactions, bioavailability, and potential application in mitigating micronutrient deficiency. *Foods*. 2020;9(10):1402. <https://doi.org/10.3390/foods9101402>
41. Tonolo F, Coletta S, Fiorese F, Grinzato A, Albanesi M, Folda A, de Bernard M, et al. Sunflower seed-derived bioactive peptides show antioxidant and anti-inflammatory activity: From in silico simulation to the animal model. *Food Chemistry*. 2024;439:138124. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138124>
42. Udenigwe CC, Abioye RO, Okagu IU, Obeme-Nmom JI. Bioaccessibility of bioactive peptides: recent advances and perspectives. *Current Opinion in Food Science*. 2021;39:182-189. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.03.005>

43. Verma S, Goand UK, Husain A, Katekar RA, Garg R, Gayen JR. Challenges of peptide and protein drug delivery by oral route: Current strategies to improve the bioavailability. *Drug Development Research*. 2021;82(7):927-944. <https://doi.org/10.1002/ddr.21832>
44. Wang T, Cheng K, Yu C, Tong Y, Yang Z, Wang T. Effects of yeast hydrolysate on growth performance, serum parameters, carcass traits, meat quality and antioxidant status of broiler chickens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022;102(2):575-583. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11386>
45. Xu F, Zhang J, Wang Z, Yao Y, Atungulu GG, Ju X, Wang L. Absorption and metabolism of peptide WDHAPQLR derived from rapeseed protein and inhibition of HUVEC apoptosis under oxidative stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018;66(20):5178-5189. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01620>
46. Yang J, Wu XB, Chen HL, Sun-Waterhouse D, Zhong HB, Cui C. A value-added approach to improve the nutritional quality of soybean meal byproduct: enhancing its antioxidant activity through fermentation by *Bacillus amyloliquefaciens* SWJS22. *Food Chemistry*. 2019;272:396-403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.037>
47. Zainal Arifin MA, Mohd Adzahan N, Zainal Abedin NH, Lasik-Kurdys M. Utilization of food waste and by-products in the fabrication of active and intelligent packaging for seafood and meat products. *Foods*. 2023;12(3):456. <https://doi.org/10.3390/foods12030456>
48. Zaky AA, Simal-Gandara J, Eun JB, Shim JH, Abd El-Aty AM. Bioactivities, applications, safety, and health benefits of bioactive peptides from food and by-products: A review. *Frontiers in Nutrition*. 2022;8:815640. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.815640>
49. Zhao C, Ashaolu TJ. Bioactivity and safety of whey peptides. *LWT*. 2020;134:109935. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109935>
50. Zhuang M, Li J, Wang A, Li G, Ke S, Wang X, Zhou Z, et al. Structurally manipulated antioxidant peptides derived from wheat bran: Preparation and identification. *Food Chemistry*. 2024;442:138465. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138465>

References

1. Koshak ZhV, Grinko AN, Aleshin DE, Buryakov NP. Productivity, nitrogen balance and biochemical blood parameters in cows when fermented rapeseed meal is included in the diet of different levels. *Agrarian Bulletin of the nonChernozem region*. 2024;1(13):54-62. https://doi.org/10.52025/2712-8679_2024_01_54
2. Denisenko VN, Balykov VA, Rogov RV, Kruglova YuS. Hematological and biochemical parameters of bulls' blood when using mink carcass hydrolyzate as a feed additive. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2022;17(3):373-381. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-3-373-381>
3. Ezhelev AV, Tkachenko YuG, Fedorova ZN, Bliadze VG. Study of the influence of soybean protein hydrolyzate for poultry. *Adaptive Fodder Production*. 2019;2:77-84. <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2019-2-77-84>
4. Kostyleva EV, Sereda AS, Velikoretskaya IA, Kurbatova EI, Tsurikova NV. Proteases for obtaining of food protein hydrolysates from proteinaceous by-products. *Problems of Nutrition*. 2023;92(1):116-132. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-116-132>
5. Kurbanova MG, Generalova NA. Biotechnology of milk protein hydrolyzates for feed additive. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2011;2:76-77.
6. Muranova TA, Zinchenko DV, Miroshnikov AI. Hydrolysates of soybean proteins for start feeds of aquaculture: behavior of proteins at fermentolysis, compositional analysis of hydrolyzates. *Bioorganic Chemistry*. 2019;45(4):380-390. <https://doi.org/10.1134/S0132342319030035>

7. Prokofieva AA, Bykov AV, Kvan OV. Protein waste as alternative sources of protein in the diet (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(2):112-126. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-112>
8. Samosyuk VV, Shakhov VA. Preparation of nano feed mixture for intensive fattening. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2023;3(51):45-49. <https://doi.org/10.22314/27132064-2023-3-45>
9. Shakhov VA, Popov VP, Belov AG. Investigation of the nanoparticles content in compound feed determination according to the accompanying superfine component's method. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021;4(44):54-57. <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-4-54>
10. Amigo L, Hernandez-Ledesma B. Current evidence on the bioavailability of food bioactive peptides. *Molecules*. 2020;25(19):4479. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25194479>
11. Berraquero-Garcia C, Perez-Galvez R, Espejo-Carpio FJ, et al. Encapsulation of bioactive peptides by spray-drying and electrospraying. *Foods*. 2023;12(10):2005. <https://doi.org/10.3390/foods12102005>
12. Boontiam W, Bunchasak C, Kim YY, Kitipongpysan S, Hong J. Hydrolyzed yeast supplementation to newly weaned piglets: Growth performance, gut health, and microbial fermentation. *Animals*. 2022;12(3):350. <https://doi.org/10.3390/ani12030350>
13. Broersen K. Milk processing affects structure, bioavailability and immunogenicity of β -lactoglobulin. *Foods*. 2020;9(7):874. <https://doi.org/10.3390/foods9070874>
14. Chadha S. Recent advances in nano-encapsulation technologies for controlled release of biostimulants and antimicrobial agents. In: Jogaiah S, Singh HB, Fraceto LF, de Lima R, editors. *Advances in nano-fertilizers and nano-pesticides in agriculture*. India: Woodhead Publishing; 2021:29-55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820092-6.00002-1>
15. Chelliah R, Wei S, Daliri EBM, Elahi F, Yeon SJ, Tyagi A, Oh DH, et al. The role of bioactive peptides in diabetes and obesity. *Foods*. 2021;10(9):2220. <https://doi.org/10.3390/foods10092220>
16. Dolatkah B, Ghorbani GR, Alikhani M, Hashemzadeh F, Mahdavi AH, Sadeghi-Sefidmazgi A, Rezamand P. Effects of hydrolyzed cottonseed protein supplementation on performance, blood metabolites, gastrointestinal development, and intestinal microbial colonization in neonatal calves. *Journal of Dairy Science*. 2020;103(6):5102-5117. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17297>
17. Dougherty PG, Sahni A, Pei D. Understanding cell penetration of cyclic peptides. *Chem Rev*. 2019;119(17):10241-10287. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00008>
18. Drucker DJ. Advances in oral peptide therapeutics. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2020;19(4):277-289. <https://doi.org/10.1038/s41573-019-0053-0>
19. Durand E, Beaubier S, Ilic I, Kapel R, Villeneuve P. Production and antioxidant capacity of bioactive peptides from plant biomass to counteract lipid oxidation. *Current Research in Food Science*. 2021;4:365-397. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.05.006>
20. Egea MB, de Oliveira Filho JG, Bertolo MRV, de Araujo JC, Gauterio GV, Lemes AC. Bioactive phytochemicals from sunflower (*Helianthus annuus* L.) Oil processing by-products. In: Ramadan Hassanien MF, editor. *Bioactive Phytochemicals from Vegetable Oil and Oilseed Processing By-products*. Reference Series in Phytochemistry. Springer, Cham. 2021:1-16. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63961-7_4-1
21. Filipe D, Vieira L, Ferreira M, Oliva-Teles A, Salgado J, Belo I, Peres H. Enrichment of a plant feedstuff mixture's nutritional value through solid-state fermentation. *Animals*. 2023;13(18):2883. <https://doi.org/10.3390/ani13182883>
22. Freitas CS, Vericimo MA, da Silva ML, da Costa GCV, Pereira PR, Paschoalin VMF, Del Aguila EM. Encrypted antimicrobial and antitumoral peptides recovered from a protein-rich soybean (*Glycine max*) by-product. *Journal of Functional Foods*. 2019;54:187-198. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.01.024>
23. Garcia-Casas VE, Seiquer I, Pardo Z, Haro A, Recio I, Olias R. Antioxidant potential of the sweet whey-based beverage colada after the digestive process and relationships with the lipid and protein fractions. *Antioxidants*. 2022;11(9):1827. <https://doi.org/10.3390/antiox11091827>

24. Ibrahim YHY, Regdon G, Hamedelniei EI, Sovany T. Review of recently used techniques and materials to improve the efficiency of orally administered proteins/peptides. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2020;28:403-416. <https://doi.org/10.1007/s40199-019-00316-w>
25. Idowu AT, Igiehon OO, Idowu S, Olatunde OO, Benjakul S. Bioactivity potentials and general applications of fish protein hydrolysates. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*. 2021;27:109-118. <https://doi.org/10.1007/s10989-020-10071-1>
26. Jakubczyk A, Karas M, Rybczynska-Tkaczyk K, Zielinska E, Zielinski D. Current trends of bioactive peptides—New sources and therapeutic effect. *Foods*. 2020;9(7):846. <https://doi.org/10.3390/foods9070846>
27. Jiang X, Cui Z, Wang L, Xu H, Zhang Y. Production of bioactive peptides from corn gluten meal by solid-state fermentation with *Bacillus subtilis* MTCC5480 and evaluation of its antioxidant capacity in vivo. *LWT*. 2020;131:109767. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109767>
28. Kamal I, Ashfaq UA, Hayat S, Aslam B, Sarfraz MH, Yaseen H, Khurshid M. Prospects of antimicrobial peptides as an alternative to chemical preservatives for food safety. *Biotechnology Letters*. 2023;45(2):137-162. <https://doi.org/10.1007/s10529-022-03328-w>
29. Karami Z, Akbari-Adergani B. Bioactive food derived peptides: A review on correlation between structure of bioactive peptides and their functional properties. *Journal of Food Science and Technology*. 2019;56:535-547. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3549-4>
30. Kumar M, Hasan M, Choyal P, Tomar M, Gupta OP, Sasi M, Kennedy JF, et al. Cottonseed feedstock as a source of plant-based protein and bioactive peptides: Evidence based on biofunctionalities and industrial applications. *Food Hydrocolloids*. 2022;131:107776. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107776>
31. Li G, Liu W, Wang Y, Jia F, Wang Y, Ma Y, et al. Functions and applications of bioactive peptides from corn gluten meal. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2019;87:1-41. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.07.001>
32. Li M, Guo Q, Lin Y, Bao H, Miao S. Recent progress in microencapsulation of active peptides—wall material, preparation, and application: a review. *Foods*. 2023;12(4):896. <https://doi.org/10.3390/foods12040896>
33. Liu L, Li S, Zheng J, Bu T, He G, Wu J. Safety considerations on food protein-derived bioactive peptides. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;96:199-207. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.022>
34. Lu X, Sun Q, Zhang L, Wang R, Gao J, Jia C, Huang J. Dual-enzyme hydrolysis for preparation of ACE-inhibitory peptides from sesame seed protein: optimization, separation, and identification. *Journal of Food Biochemistry*. 2021;45(4):13638. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13638>
35. Luo Z, Paunovic N, Leroux JC. Physical methods for enhancing drug absorption from the gastrointestinal tract. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2021;175:113814. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.05.024>
36. Meng Y, Hao L, Tan Y, Yang Y, Liu L, Li C, Du P. Noncovalent interaction of cyanidin-3-O-glucoside with whey protein isolate and β -lactoglobulin: Focus on fluorescence quenching and antioxidant properties. *LWT*. 2021;137:110386. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110386>
37. Patsios SI, Dedousi A, Sossidou EN, Zdragas A. Sustainable animal feed protein through the cultivation of *Yarrowia lipolytica* on agro-industrial wastes and by-products. *Sustainability*. 2020;12(4):1398. <https://doi.org/10.3390/su12041398>
38. Sanchez-Navarro M, Garcia J, Giralt E, Teixido M. Using peptides to increase transport across the intestinal barrier. *Advanced drug delivery reviews*. 2016;106:355-366. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.031>
39. Sarabandi K, Gharehbeblou P, Jafari SM. Spray-drying encapsulation of protein hydrolysates and bioactive peptides: Opportunities and challenges. *Drying Technology*. 2020;38(5-6):577-595. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1689399>

40. Sun X, Sarteshnizi RA, Boachie RT, Okagu OD, Abioye RO, Pfeilsticker Neves R, Ohanenye IC, Udenigwe CC. Peptide–mineral complexes: Understanding their chemical interactions, bio-availability, and potential application in mitigating micronutrient deficiency. *Foods*. 2020;9(10):1402. <https://doi.org/10.3390/foods9101402>
41. Tonolo F, Coletta S, Fiorese F, Grinzato A, Albanesi M, Folda A, de Bernard M, et al. Sunflower seed-derived bioactive peptides show antioxidant and anti-inflammatory activity: From in silico simulation to the animal model. *Food Chemistry*. 2024;439:138124. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138124>
42. Udenigwe CC, Abioye RO, Okagu IU, Obeme-Nmom JI. Bioaccessibility of bioactive peptides: recent advances and perspectives. *Current Opinion in Food Science*. 2021;39:182-189. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.03.005>
43. Verma S, Goand UK, Husain A, Katekar RA, Garg R, Gayen JR. Challenges of peptide and protein drug delivery by oral route: Current strategies to improve the bioavailability. *Drug Development Research*. 2021;82(7):927-944. <https://doi.org/10.1002/ddr.21832>
44. Wang T, Cheng K, Yu C, Tong Y, Yang Z, Wang T. Effects of yeast hydrolysate on growth performance, serum parameters, carcass traits, meat quality and antioxidant status of broiler chickens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022;102(2):575-583. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11386>
45. Xu F, Zhang J, Wang Z, Yao Y, Atungulu GG, Ju X, Wang L. Absorption and metabolism of peptide WDHAPQLR derived from rapeseed protein and inhibition of HUVEC apoptosis under oxidative stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018;66(20):5178-5189. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01620>
46. Yang J, Wu XB, Chen HL, Sun-Waterhouse D, Zhong HB, Cui C. A value-added approach to improve the nutritional quality of soybean meal byproduct: enhancing its antioxidant activity through fermentation by *Bacillus amyloliquefaciens* SWJS22. *Food Chemistry*. 2019;272:396-403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.037>
47. Zainal Arifin MA, Mohd Adzahan N, Zainal Abedin NH, Lasik-Kurdys M. Utilization of food waste and by-products in the fabrication of active and intelligent packaging for seafood and meat products. *Foods*. 2023;12(3):456. <https://doi.org/10.3390/foods12030456>
48. Zaky AA, Simal-Gandara J, Eun JB, Shim JH, Abd El-Aty AM. Bioactivities, applications, safety, and health benefits of bioactive peptides from food and by-products: A review. *Frontiers in Nutrition*. 2022;8:815640. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.815640>
49. Zhao C, Ashaolu TJ. Bioactivity and safety of whey peptides. *LWT*. 2020;134:109935. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109935>
50. Zhuang M, Li J, Wang A, Li G, Ke S, Wang X, Zhou Z, et al. Structurally manipulated antioxidant peptides derived from wheat bran: Preparation and identification. *Food Chemistry*. 2024;442:138465. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138465>

Информация об авторе:

Майсун Шаабан, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5, тел.: 8(499)171-43-49.

Information about the author:

Maisoon Shaaban, Cand. Sci (Biology), senior Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Bld 5, 1 st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, tel.: 8(499)171-43-49.

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 11.09.2024; approved after reviewing 16.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 324-336.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 324-336.

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

Научная статья
УДК 633.11:631.559(470.56)
doi:10.33284/2658-3135-107-4-324

Урожайность и качество зерна яровой твёрдой пшеницы в условиях Оренбургского Предуралья

Ишен Насанович Бесалиев¹, Сергей Иванович Мироненко²

¹²Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹orniish_tzk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9389-1938>

²mir.s.i.63@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9916-2662>

Аннотация. Статья содержит анализ распространённости посевов яровой твёрдой пшеницы в мире и в Оренбургской области, её урожайности за длительный период времени. Отмечается тенденция к снижению продуктивности данной культуры за изученный промежуток времени, обусловленная в первую очередь нарастанием засушливости периода вегетации. Приводятся результаты корреляционно-регрессионного анализа зависимости её урожайности от основных погодных показателей с выявлением при этом их оптимальных значений для формирования высокопродуктивных посевов данной культуры. При анализе полученных зависимостей акцентируется внимание на напряжённость условий вегетации яровой твёрдой пшеницы за последние годы в засушливой зоне, которые не позволяют реализовать её потенциальные возможности. Рассчитанные коэффициенты связи урожайности данной культуры от погодных факторов показывают достоверные зависимости от температурного режима мая, июля, количества осадков мая и относительной влажности всего периода вегетации. Представлены результаты математической зависимости показателей качества зерна твёрдой пшеницы от погодных характеристик периода вегетации. При этом оптимальные значения температуры воздуха в мае составили +13,4 °С, в июне – +15,0 °С, в июле – +23,3 °С, по сумме осадков оптимальное количество по месяцам вегетации составило в мае и июне по 30 мм и в июле – 36 мм. Вышеуказанным оптимальным значениям погодных факторов мая соответствовала теоретическая урожайность твёрдой пшеницы до 30,0 ц с 1 га, оптимальным значениям июня – 22,6 ц с 1 га и оптимальным значениям июля – 18,9 ц с 1 га. Коэффициенты корреляций и фактические данные по качественным показателям зерна позволяют отметить их значительную изменчивость от условий периода вегетации и сортовую специфичность. Высокая связь ($r=0,827-0,926$) установлена для изученных показателей качества зерна со средней относительной влажностью воздуха и со среднесуточным дефицитом влажности воздуха. Средняя связь ($r=0,635-0,745$) получена для средней температуры воздуха, максимальной температуры воздуха и среднесуточного дефицита влажности воздуха. Качество зерна подвержено изменчивости от условий периода вегетации: в урожайные годы наблюдается повышение стекловидности зерна до 92-93 %, а в годы с ростом температурного режима воздуха отмечается улучшение качества клейковины до уровня II класса.

Ключевые слова: зерновые культуры, яровая твёрдая пшеница, температура воздуха, относительная влажность воздуха, урожайность, качество зерна, Оренбургское Предуралье

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2022-0014).

Для цитирования: Бесалиев И.Н., Мироненко С.И. Урожайность и качество зерна яровой твёрдой пшеницы в условиях Оренбургского Предуралья // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107. № 4. С. 324-336. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-324>

GEOPONICS AND CROP PRODUCTION

Original article

Yield and grain quality of spring durum wheat in the conditions of the Orenburg Cis-Urals**Ishen N Besaliev¹, Sergey I Mironenko²**¹Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia¹orniish_tzk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9389-1938>²mir.s.i.63@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9916-2662>

Abstract. The article contains an analysis of the prevalence of spring durum wheat crops in the world and in the Orenburg region, and yields over a long period. There is a tendency to decrease the productivity of this crop over the studied period, primarily due to the increasing aridity of the growing season. The results of a correlation and regression analysis of the dependence of its yield on the main weather indicators are presented, while identifying their optimal values for the formation of highly productive crops of this crop. Analyzing the obtained dependencies, attention is focused on the intensity of the growing conditions of spring durum wheat in recent years in the arid zone, which do not allow realizing the potential of this crop. The calculated coefficients of the relationship between the yield of this crop and weather factors show reliable dependences on the temperature regime of May, July, the amount of precipitation in May and the relative humidity of the entire growing season. The results of the mathematical dependence of durum wheat grain quality indicators on the weather characteristics of the growing season are presented. At the same time, the optimal air temperature values in May were 13.4 °C, in June 15.0 °C, in July 23.3 °C, according to the amount of precipitation, the optimal amount for the months of vegetation was 30 mm in May and June and 36 mm in July. The above-mentioned optimal values of weather factors in May corresponded to the theoretical yield of durum wheat up to 30.0 c from 1 ha, the optimal values in June - 22.6 c from 1 ha and the optimal values in July – 18.9 c from 1 ha. Correlation coefficients and actual data on grain quality indicators allow us to note their significant variability from the conditions of the growing season and varietal specificity. A high correlation ($r = 0,827-0,926$) was established for the studied grain quality indicators with average relative humidity and with an average daily humidity deficit. The average relationship ($r = 0.635-0.745$) was obtained for the average air temperature, maximum air temperature and average daily humidity deficit. Grain quality is subject to variability from the conditions of the growing season: in harvest years, there is an increase in the vitreous content of grain to 92-93%, and in years with an increase in the temperature regime of the air, there is an improvement in the quality of gluten to the level of class II.

Keywords: grain crops, spring durum wheat, air temperature, relative air humidity, yield, grain quality, Orenburg Cis-Urals

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2022-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2022-0014).

For citation: Besaliev IN, Mironenko SI. Yield and grain quality of spring durum wheat in the conditions of the Orenburg Cis-Urals. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):324-336. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-324>

Введение.

Яровая твёрдая пшеница является одной из важнейших яровых зерновых культур, возделываемых человеком, так как её зерно используется в питании значительного населения мира. По данным анализа (Гончаров С.В. и Курашов М.Ю., 2018), в мире посевные площади данной культуры варьируют в пределах 12-15 млн га, а производство зерна составляет 37-40 млн т, в то время как в России суммарное производство составляет 650-700 тыс. т, или около 2 % от общемирового.

В Оренбургской области производится основная часть зерна (около 300 тыс. т валового сбора) данной культуры, высеваемой в России (Гончаров С.В. и Курашов М.Ю., 2018). За период 2010-2023 гг. её средняя ежегодная площадь посевов составила 251 тыс. гектаров со средней урожайностью 10,0 ц с 1 га (Ежегодные данные пресс-релиза Министерства сельского хозяйства Орен-

бургской области за 2010-2023 гг.). При этом следует заметить, что в 1966-1970 гг. в Оренбуржье площадь посевов данной культуры в среднем составляла 911 тыс. га, а в 1968 году превышала 1 млн га, затем наблюдалось сокращение её посевов до 150-230 тыс. га (Крючков А.Г. и др., 2008).

Рост засушливости климата становится основным трендом климатических изменений в глобальном масштабе и абиотические стрессы, в том числе засуха, являются основными ограничениями в растениеводстве (Rane J et al., 2021). Потери продукции от абиотических стрессов могут превышать 40 % (Bailey-Serres J et al., 2019).

Яровая твёрдая пшеница в этом плане является наиболее проблемной культурой в силу своей морфологии. Снижение урожайности, а также показателей фотосинтеза у генотипов твёрдой пшеницы, по оценке специалистов (Igbal J, 2019; Nardino M et al., 2022), обусловлены механизмом защиты от засухи и выработкой специализированных соединений (пролин). Исследованиями установлено (Besaliev IN et al., 2021), что содержание аминокислоты пролин в зерне яровой пшеницы следует рассматривать как сигнальную функцию при стрессовых условиях вегетации. Показано (Lan Y et al., 2022), что устойчивость к ранней засухе определяет биомасса корней, масса зерна и число колосков на растении пшеницы, в то время как к поздней засухе – масса 1000 зёрен и площадь флагового листа. Раннее формирование сильной корневой системы следует рассматривать как важный элемент устойчивости к засухе. Устойчивости к засухе способствует глубина проникновения корневой системы, оптимальная плотность корневой системы и диаметр ксилемы (Chaopan Li et al., 2021; Maqbool S et al., 2022). Существенное нарастание температурного прессинга на фоне дефицита воды является серьёзной проблемой для урожайности. Так, по оценке Розовой М.А. с коллегами (2021), на урожайность твёрдой пшеницы наибольшее влияние оказывает среднесуточная температура воздуха на 2-5 день и на 22-32 день после колошения, а также важно сочетание стабильности показателей продуктивности с высокой водоудерживающей способностью растений (Тимошенкова Т.А., 2023) и увеличение продолжительности вегетации (Беляев А.Ю. и др., 2023).

О влиянии окружающей среды на урожайность и качество зерна пшеницы можно судить по данным исследований с применением мета-анализа из 48 опубликованных работ 15 стран мира (Wan C et al., 2022), из которых следует, что засуха значительно (на 57,32 %) снижает урожайность и уменьшает выход белка в зерне (на 46,04 %), но при этом увеличивает в зерне содержание белка (на 9,38 %) и содержание азота (на 9,27 %). Снижение урожайности от продолжительного стресса от засухи в течение всего периода вегетации (83,60 %) значительно выше, чем от термальной засухи (26,43 %), которая представляет засуху после цветения. Кроме факторов окружающей среды на урожайность и качество урожая существенное влияние оказывает внесение удобрений, в частности, азота (Sinda Ben Mariem et al., 2020; Dolianovic Z et al., 2019). При этом установлено, что на качество зерна оказывает значительное влияние внесение азотных удобрений от цветения до созревания. Таким образом, кроме отрицательного влияния на продуктивность яровой твёрдой пшеницы засушливость периода вегетации в значительной мере отражается на показателях качества зерна.

Цель исследования.

Анализ урожайности и показателей качества зерна яровой твёрдой пшеницы и их взаимосвязи с погодными факторами периода вегетации в Оренбургском Предуралье.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Средние данные по урожайности сортов яровой твёрдой пшеницы, полученные в многолетних полевых опытах данной культуры по экологическому испытанию сортов.

Характеристика территорий и природно-климатические условия. Участок проведения полевых исследований расположен в центральной зоне Оренбургской области (Россия), в п. Нежинка Оренбургского района с координатами: долгота – 51°77'34.5", широта – 55°32'13.02". Средняя годовая температура воздуха составляет 3 °С. Среднегодовое количество осадков – 300-350 мм. Почва опытного участка – чернозём южный карбонатный малогумусный, тяжелосуглинистый. В слое 0 – 30 см почвы содержится: гумуса 4,0-4,5 %, легкогидролизуемого азота – 7,5- 8,5 мг на 100 г почвы, подвижного фосфора (P_2O_5) – 3,3-3,5 мг на 100 г почвы, обменного калия (K_2O) – 23-28 мг на 100 г почвы и обменного кальция – 25,4-29,5 мг-экв /100 г почвы. Реакция почвы pH – 7,6-8,0.

Схема эксперимента. Сорты яровой твёрдой пшеницы высевались в опыте по экологическому испытанию с 1991 по 2023 годы. Весной проводились покровное боронование, предпосевная культивация, посев и послепосевное прикатывание. Высевались сорта Оренбургская 10, Оренбургская 21, Безенчукская 182, Безенчукская 210, Харьковская 46, Светлана, Краснокутка 10, Безенчукская степная. Норма высева – 4,0 млн всхожих семян на га. Повторность опыта – трёхкратная. Площадь делянки – 66,0 м² (1,65 м×40 м).

Оборудование и технические средства. Исследования по качеству зерна выполнены в ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>) с применением весов ВЛ 124В (Россия), измерителя клейковины ИДК-3М (Россия), диафоноскопа «Янтарь» (Россия) с использованием современных методик. Для проведения эксперимента были использованы тракторы МТЗ-1221 (Беларусь), Т-25 (Россия), селекционные сеялки: СН-16 (Россия, Московская область) и СС-11 Альфа (Россия, Омсктехмаш), комбайны Сампо-500 (Sampo-Rosenlew, Финляндия) и Террион-Sampo SR2010 (Агротехмаш, Россия).

Статистическая обработка. Обработка массива экспериментальных данных была проведена методом однофакторного нелинейного корреляционно-регрессионного анализа (Фёрстер Э. и Рёнц Б., 1983) с использованием библиотеки из 34 алгебраических функций, включающих в себя в том числе: полиномиальные функции и показательные функции. Суть этого метода заключается в минимизации суммы квадратов отклонений между найденными в опыте значениями параметров оптимизации и предсказываемыми данной моделью.

Результаты исследований.

В отделе технологии зерновых и кормовых культур ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН в условиях Оренбургского Предуралья опыты с сортами яровой пшеницы, в том числе с сортами твёрдой пшеницы проводятся в течение длительного времени, с 1991 года. Анализируя данные по урожайности твёрдой пшеницы в эти годы, получили следующие результаты. Средняя урожайность твёрдой пшеницы за 32 года составила 11,7 ц с 1 га. В первые 5 лет (1991-1995 гг.) она составила 16,1 ц с 1 га, причём за 1991-1994 гг. средняя урожайность была 19,3 ц с 1 га, а в 1995 году при сильной засухе она составила 3,5 ц с 1 га. В 1996-2000 гг. урожайность была в среднем 14,9 ц с 1 га с максимумом 27,3 ц с 1 га в 2000 году и минимумом 4,3 ц с 1 га в 1998 г. Следующие пять лет были преимущественно засушливыми и средняя урожайность в 7,5 ц с 1 га их отражает: минимум урожайности составил 3,0 ц с 1 га, а максимум – 14,3 ц с 1 га. За период с 2007 по 2011 гг. урожайность твёрдой пшеницы была в среднем 14,3 ц с 1 га, но в данном интервале лет в 2010 урожай практически отсутствовал (1,1 ц с 1 га). В 2012-2016 гг. два года (2012 и 2014 гг.) были неурожайными, остальные годы – с низкой урожайностью, и в целом в это пятилетие средняя урожайность твёрдой пшеницы была 7,0 ц с 1 га, самой низкой за рассматриваемые промежутки времени. За период с 2017 по 2021 гг. последний год был неурожайным, а 2017 год – максимально продуктивным, что в целом дало среднюю величину урожайности данной культуры 13,8 ц с 1 га. За два последних года (2022 и 2023) средняя урожайность твёрдой пшеницы составила 8,8 ц с 1 га.

Таким образом, ретроспективный анализ урожайности твёрдой пшеницы в условиях центральной зоны Оренбургской области характеризует в целом её снижение. Объективно это объясняется изменениями погодных условий внутри рассматриваемых периодов. С началом нового тысячелетия количество засушливых и резко засушливых лет возрастает: если в первые 10 лет (1991-2000 гг.) число лет с высокой степенью засухи составило 20,0 %, то в следующее десятилетие (2001-2010) оно составило 40,0 % и за последующие 10 лет (2011-2020) – также 40,0 %. При этом с началом рассматриваемого периода последовательно снижается количество лет с урожайностью, превышающей среднюю урожайность твёрдой пшеницы в среднем за 32 года. Таким образом, налицо возрастание засушливости периода вегетации, которое требует изучения реакции на возникающие при этом вопросы адаптации культуры твёрдой пшеницы.

Нами рассчитаны корреляционно-регрессионные зависимости урожайности яровой твёрдой пшеницы с основными погодными показателями за май, июнь и июль месяцы в изучаемой зоне.

Результаты представлены в виде таблиц, где отражены основные параметры изученных признаков, коэффициент вариации, коэффициент корреляции, коэффициент детерминации. Приведены формулы расчётов уравнений полученных связей с отражением их соответствия критериям Фишера.

В мае основное влияние на формирование продуктивности яровой пшеницы оказывает температура воздуха, сумма осадков и среднесуточный дефицит влажности воздуха (табл. 1). Оптимальной является средняя температура воздуха в пределах $+13,4 \pm 1,20$ °C при сумме осадков 30 ± 5 мм с относительной влажностью воздуха 65 %. При таких параметрах погодных факторов за май урожайность твёрдой пшеницы теоретически может составить 25-30 ц с 1 га.

Таблица 1. Зависимость урожайности яровой твёрдой пшеницы от погодных факторов за май
Table 1. Dependence of the yield of spring durum wheat on weather factors in May

Коррелируемые величины / <i>Correlated values</i>	Параметры величин ($M \pm G$) / <i>The parameters of the values ($M \pm G$)</i>	v, %	η_{yx} /	F	
				факт/ <i>fact</i>	теор./ <i>theory</i>
1. Средняя температура воздуха, °C(x_1) / <i>Average air temperature, °C (x_1)</i>	$12,2 - 19,0$ $1,5 \pm 1,8$	10,6	-	-	-
2. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y_1) / <i>Grain yield, kg per 1 ha, (y_1)</i>	$1,0 - 19,2$ $11,2 \pm 6,2$	54,1	0,980	22,1	3,78
$y_1 = -95,627 + 17,145 \cdot x_1 - 0,639 \cdot x_1$, ц с 1 га, для 96,10 % случаев / $y_1 = -95,627 + 17,145 \cdot x_1 - 0,639 \cdot x_1$, c from 1 ha, for 96.10% of cases					
Максимальная температура воздуха, °C(x_2) / <i>Maximum air temperature, °C (x_2)</i>	$27,0 - 35,0$ $31,8 \pm 2,7$	8,4	-	-	-
3. Урожайность, ц с 1 га, (y_2) / <i>Grain yield, kg per 1 ha, (y_2)</i>	$8,1 - 19,3$ $11,7 \pm 4,1$	35,5	0,959	10,9	3,78
$y_2 = 208,624 - 11,392 \cdot x_2 + 0,162 \cdot x_2$, ц с 1 га, для 92,06 % случаев / $y_2 = 208,624 - 11,392 \cdot x_2 + 0,162 \cdot x_2$, c from 1 ha, for 92.06% of cases					
4. Осадки, мм, (x_3) / <i>Precipitation, mm, (x_3)</i>	$1,00 - 127,0$ $36,8 \pm 29,6$	80,6	-	-	-
Урожайность, ц с 1 га, (y_3) / <i>Grain yield, kg per 1 ha, (y_3)</i>	$4,0 - 18,3$ $11,6 \pm 5,1$	44,1	0,844	3,03	2,51
$y_3 = 2,515 = 0,3801 \cdot x_3 - 2,2419 \cdot x_3$, ц с 1 га, 71,38 % для случаев / $y_3 = 2,515 = 0,3801 \cdot x_3 - 2,2419 \cdot x_3$, c from 1 ha, for 71.38% of cases					
5.. Среднесуточный дефицит влажности воздуха, гПа (x_4) / <i>Average daily air humidity deficit, hPa(x_4)</i>	$2,0 - 14,0$ $9,9 \pm 3,3$	33,0	-	-	-
Урожайность, ц с 1 га, (y_4) / <i>Grain yield, kg per 1 ha, (y_4)</i>	$4,4 - 20,5$ $11,3 \pm 5,6$	49,3	0,910	5,06	2,51
$y_4 = -6,3797 + 5,8045 \cdot x_4 - 0,3676 \cdot x_4$, ц с 1 га, 82,88 % для случаев / $y_4 = -6,3797 + 5,8045 \cdot x_4 - 0,3676 \cdot x_4$, c from 1 ha, for 82.88 % of cases					

Основные зависимости урожайности твёрдой пшеницы обнаруживаются с параметрами погодных факторов июня с высокими коэффициентами корреляций и детерминаций (табл. 2). Оптимальные значения этого месяца по средней температуре воздуха составляют $+15$ °C при максимальных – не более $+31$ °C, с осадками – до 30 мм, относительной влажностью воздуха – 65 % и дефиците влажности воздуха – не более 8 гПа. Эти показатели соответствуют максимальной теоретической урожайности данной культуры 22,6 ц с 1 га.

Таблица 2. Зависимость урожайности яровой твёрдой пшеницы от погодных факторов за июнь

Table 2. Dependence of the yield of spring durum wheat on weather factors in June

Коррелируемые величины/ Correlated values	Параметры величин (M±G) / The parameters of the values (M±G)	v, %	η _{yx} /	F	
				факт. /fact	теор./ theory
1. Средняя температура воздуха, °C (x ₁) / Average air temperature, °C (x ₁)	$\frac{15,0-24,8}{20,5 \pm 2,6}$	12,6	-	-	-
2. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₁) / Grain yield, kg per 1 ha, (x ₁)	$\frac{1,5-20,5}{11,4 \pm 5,9}$	51,8	0,879	4,11	3,63
$Y_1 = 52,724 - 2,011 \cdot x_1 \pm 2,91$ ц с 1 га, для 77,30 % случаев / $Y_1 = 5.724 - 2.011 \cdot x_1 \pm 2.91$, c from 1 ha, for 77.30% of cases					
3. Максимальная температура воздуха, °C (x ₂) / Maximum air temperature, °C (x ₂)	$\frac{31-40}{35,9 \pm 2,5}$	7,0	-	-	-
4. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₂) / Grain yield, kg per 1 ha, (y ₂)	$\frac{2,26-19,18}{11,62 \pm 5,41}$	46,6	0,965	13,62	3,63
$Y_2 = 86,578 - 2,08929 \cdot x_2 \pm 1,47$ ц с 1 га, для 93,15 % случаев / $Y_2 = 86.578 - 2.08929 \cdot x_2 \pm 1.47$, c from 1 ha, for 93.15% of cases					
5. Осадки, мм (x ₃) / Precipitation, mm, (x ₃)	$\frac{1,0-42,0}{24,9 \pm 12,2}$	49,2	-	-	-
6. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₃) / Grain yield, kg per 1 ha, (y ₃)	$\frac{2,1-19,1}{11,2 \pm 4,2}$	37,4	0,843	2,99	2,51
$Y_3 = -0,202510 + 0,955604 \cdot x_3 - 1,628382E-02 \cdot x_3 \pm 2,42$ ц с 1 га, для 71,03 % случаев / $Y_3 = -0.202510 + 0.955604 \cdot x_3 - 1.628382E-02 \cdot x_3 \pm 2.42$, c from 1 ha, for 71.03% of cases					
7. Средняя относительная влажность (x ₄) / Average relative humidity, (x ₄)	$\frac{32-65}{50 \pm 8,4}$	16,8	-	-	-
8. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₄) / Grain yield, kg per 1 ha, (y ₄)	$\frac{7,4-27,4}{11,9 \pm 5,6}$	47,3	0,948	8,64	3,78
$Y_4 = 55,33593 - 2,375862 \cdot x_4 + 2,938397E-028 \cdot x_4 \pm 1,91$ ц с 1 га, для 89,96 % случаев / $Y_4 = 55.33593 - 2.375862 \cdot x_4 + 2.938397E-028 \cdot x_4 \pm 1.91$, c from 1 ha, for 89.96% of cases					
9. Средний дефицит влажности воздуха, гПа (x ₅) / Average air humidity deficit, Hpa (x ₅)	$\frac{8-24}{13 \pm 1,3}$	41,2	-	-	-
10. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₅) / Grain yield, kg per 1 ha, (y ₅)	$\frac{5,0-20,5}{11,2 \pm 5,2}$	46,4	0,878	4,07	3,63
$Y_5 = 4,580976 \cdot 10^{5,167043/X_5} \pm 2,64$ ц с 1 га, для 77,07 % случаев / $Y_5 = 4.580976 \cdot 10^{5,167043/X_5} \pm 2.64$, c from 1 ha, for 77.07% of cases					

В июле сохраняются значения оптимальности температуры воздуха (+23,3 °C), особенно её максимальных значений (не более +33 °C), суммы осадков (до 36 мм) и относительной влажности воздуха, снижение значений которой ниже 40 % создаёт неблагоприятные условия вегетации в период формирования продуктивности колоса (табл. 3). Оптимальность условий данного месяца теоретически определяет максимальную урожайность твёрдой пшеницы до 18,9 ц с 1 га.

Таблица 3. Зависимость урожайности яровой твердой пшеницы от погодных факторов за июль

Table 3. Dependence of spring hard wheat yield on weather factors in July

Коррелируемые величины/ Correlated values	Параметры величин (M±G) / The parameters of the values (M±G)	v, %	η _v	F	
				факт./ fact	теор. / theory
1. Максимальная температура воздуха, °C(x ₁) / Maximum air temperature, °C(x ₁)	$\frac{33 - 41}{36,6 \pm 2,6}$	7,0	-	-	-
2. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₁) / Grain yield, kg per 1 ha, (y ₁)	$\frac{7,4 - 16,8}{11,8 \pm 3,4}$	28,4	0,921	5,77	3,78
$y_1 = 592,3211 - 30,64532 \cdot x_1 + 0,40208978 \cdot x_1 \pm 1,40$ ц с 1 га, для 84,98 % случаев / $y_1 = 592.3211 - 3.,64532 \cdot x_1 + 0.40208978 \cdot x_1 \pm 1.40$, c from 84.98% of cases					
3. Осадки, мм(x ₂) / Precipitation, mm, (x ₂)	$\frac{5,0 - 105}{38,1 \pm 30,0}$	78,7	-	-	-
4. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₂) / Grain yield, kg per 1 ha, (y ₂)	$\frac{3,0 - 18,1}{11,3 \pm 4,0}$	35,7	0,868	3,52	2,71
$y_2 = 3,192786 + 0,4550487 \cdot x_2 - 4,012025 \cdot E - 03 \cdot x_2 \pm 2,15$ ц с 1 га, для 75,39 % случаев / $y_2 = 3.192786 + 0.4550487 \cdot x_2 - 4.012025 \cdot E - 03 \cdot x_2 \pm 2.15$, c from 75.39% of cases					
5. Средняя относительная влажность воздуха, (x ₃) / Average relative humidity, (x ₃)	$\frac{38 - 66}{51,6 \pm 6,7}$	13,0	-	-	-
6. Урожайность зерна, ц с 1 га, (y ₃) / Grain yield, kg per 1 ha, (y ₃)	$\frac{0,60 - 16,9}{11,4 \pm 4,1}$	35,6	0,848	3,09	2,51
$y_3 = - 69,3772 + 2,684208 \cdot x_3 - 2,132678 \cdot E - 02 \cdot x_3 \pm 2,32$ ц с 1 га, для 71,97 % случаев / $y_3 = - 69.3772 + 2.684208 \cdot x_3 - 2.132678 \cdot E - 02 \cdot x_3 \pm 2.32$, c from 71.97% of cases					

В целом, обобщая анализ зависимости урожайности яровой твёрдой пшеницы от условий периода вегетации за изученный период, можно констатировать рост напряжённости условий погодных факторов для формирования её продуктивности. Растения испытывают температурный стресс как в виде продолжительного стресса в период вегетативного развития, так и терминального в период после цветения. Оптимальность температурного режима воздуха является основным фактором формирования продуктивности яровой твёрдой пшеницы в условиях засушливой зоны.

Для анализа зависимости показателей качества зерна от факторов погоды использован также корреляционно-регрессионный метод, по которому установлена достоверно высокая связь стекловидности со средней относительной влажностью воздуха (r=0,827), средняя связь со средней температурой воздуха (r=0,745), максимальной температурой воздуха (r=0,635) и среднесуточным дефицитом влажности воздуха (r=0,730). Содержание клейковины имело достоверно высокую связь (r=0,813) со среднесуточным дефицитом влажности воздуха, среднюю с относительной влажностью воздуха (r=0,741) и с суммой осадков (r=0,628). Индекс деформации клейковины достоверно коррелировал со среднесуточным дефицитом влажности воздуха (r=0,926) при средних связях со средней температурой воздуха (r=0,596), максимальной температурой воздуха (r=0,603) и относительной влажностью воздуха (r=0,680).

Анализ показателей качества зерна за конкретные годы опытов показывает их значительную изменчивость. Условия вегетационного периода 2017 года отличались, как было указано выше, благоприятностью температурного режима на фоне незначительного количества осадков, что позволило сформировать высокую урожайность культур.

Особенностью погодных условий вегетационного периода 2022 года являлось рекордное количество осадков, выпавших сразу же после сева при невысокой температуре воздуха. В дальнейшем при норме выпавших осадков температура воздуха отличалась невысокими значениями в июне-июле. Урожайность сортов мягкой пшеницы составила 11,9-22,3 ц с 1 га, сортов твёрдой пшеницы – 8,3-18,0 ц с 1 га.

Условия периода вегетации в 2023 году характеризовались проявлением резко неблагоприятных условий по температуре воздуха в начале вегетации (фазы всходы-кущение яровых культур), улучшением их к фазе колошения и налива зерна. Но температурный стресс в начале вегетации отрицательно повлиял на формирование продуктивности культур в дальнейшем, что отразилось на урожайности, которая по сортам мягкой пшеницы была от 9,4 ц с 1 га до 12,4 ц с 1 га, у сортов твёрдой пшеницы – от 8,5 до 10,1 ц с 1 га.

Далее рассмотрим показатели качества зерна, полученные в эти годы (табл. 4).

Таблица 4. Показатели качества зерна сортов яровой твёрдой пшеницы в контрастные по условиям вегетации годы

Table 4. Grain quality indicators of spring durum wheat varieties in years with contrasting vegetation conditions

Сорт / <i>Variety</i>	Год / <i>Year</i>	Показатели качества зерна/ <i>Grain quality indicators</i>			
		Содержа- ние сырой клейко- вины, %/ <i>Crude gluten content, %</i>	Стек- ловид- ность, % <i>/ Vitre- ousness, %</i>	ИДК клейко- вины, ед. / <i>Gluten IDC, units.</i>	Группа качест- ва / <i>Quality Group</i>
Оренбургская 10 / <i>Orenburgskaya 10</i>	2017	32	92	115	III
	2022	45	89	98	II
	2023	34	69	93	II
Безенчукская 210 / <i>Bezenchukskaya 210</i>	2017	23	93	114	III
	2022	41	79	94	II
	2023	29	74	86	II

Как видно из данных таблицы, в урожайный 2017 год снизилось содержание сырой клейковины у сорта твёрдой пшеницы Безенчукская 210, что в итоге привело к формированию менее классного зерна. Но при этом стекловидность зерна в условиях этого года значительно повышалась.

В годы с перепадами погодных условий от благоприятных (выпадение значительного количества осадков) до резко стрессовых (рост температуры воздуха) классность зерна повышается, но снижается стекловидность зерна.

Обсуждение полученных результатов.

Яровая твёрдая пшеница является важнейшей зерновой культурой. Оренбургская область является основной зоной производства её зерна. В последние годы отмечается тенденция снижения её урожайности. Отдельной проблемой является снижение качественных показателей зерна данной культуры. Основной причиной возникающих при этом проблем является нарастание засушливости, обусловленной изменениями климата. Влияние факторов погоды на продуктивность яровой твёрдой пшеницы сказывается в более значительной мере, чем на другие зерновые культуры. При этом подчёркивается (Bapela Th et al., 2024), что одновременное повышение засухоустойчивости и урожайности за счёт селекционных достижений – сложная задача из-за неадекватных методов фе-

нотипирования, трудностей в выявлении ключевых селекционных признаков и большого генотипа при взаимодействии с окружающей средой. Оптимальные значения температуры воздуха по оценке Khan A с соавторами (2021) в период колошения, цветения и налива зерна составляют соответственно $+16\pm 2,3$ °C, $+23\pm 1,75$ °C, и $+26\pm 1,53$ °C. Значения основных погодных характеристик, установленные в нашей работе по месячным показателям, практически соответствуют данным параметрам. По данным Скороходова В.Ю. с коллегами (2023), качество зерна твёрдой пшеницы зависит от метеоусловий периода вегетации, и в годы с обильным выпадением осадков качество зерна снижается, а в засушливые (при низком уровне урожайности) имеет лучшие показатели. При этом паровые предшественники в последствии равноценны по своему влиянию на качество зерна мягкой пшеницы. Для условий Западной Сибири специалистами (Плотникова Л.Я. и др., 2022; Евдокимов М.Г. и др., 2020) также указывается на лимитирующее действие засухи на урожайность твёрдой пшеницы с ГТК=0,65, а также недостаточным увлажнением 1-й декады мая и 2-й декады июля и температуры июня. Качество зерна твёрдой пшеницы в значительной мере определяется погодными условиями конкретного года и последнее время имеется тенденция к снижению отдельных показателей. Gagliardi A с коллегами (2020) считают, для условий Средиземноморья влияние вегетационного периода на параметры качества зерна твёрдой пшеницы более очевидно, чем влияние генотипа и уровня азота.

Заключение.

Яровая твёрдая пшеница, являясь важнейшей зерновой культурой, отличается неустойчивостью урожайности и качественных показателей зерна. За период анализа урожайность данной культуры снизилась с 19.3 ц с 1 га в среднем за 1991-1994 гг до 13.8 ц с 1 га за 2017-2021 гг. Основной причиной является фактор погоды, обусловленный изменениями как глобального, так регионального климата. Наиболее негативно на формирование продуктивности данной культуры влияет нарастание температуры воздуха с началом её вегетации, что не позволяет реализовать её потенциальную продуктивность. Качество зерна подвержено изменчивости от условий периода вегетации: в благоприятные годы наблюдается повышение стекловидности зерна до 92-93 %, а в годы с ростом температурного режима воздуха отмечается улучшение качества клейковины до уровня II класса. Полученные результаты могут быть использованы в практической селекции при подборе сортов в качестве родительских форм.

Список источников

1. Гончаров С.В., Курашов М.Ю. Перспективы развития российского рынка твёрдой пшеницы // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 2(57). С. 66-75. [Goncharov SV, Kurashov MYu. Prospects for development of the Russian durum wheat market. Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2018;2(57):66-75. (In Russ.)]. doi: 10.17238/issn2071-2243.2018.2.66
2. Ежегодные данные Пресс-релиза Министерства сельского хозяйства Оренбургской области за 2010-2013 гг. [Ezhegodnye dannye Press-reliza Ministerstva sel'skogo hozyajstva Orenburgskoj oblasti za 2010-2013 gg. (In Russ.)].
3. Евдокимов М.Г., Юсов В.С., Пахотина И.В. Зависимость урожайности и качества зерна твёрдой яровой пшеницы от метеорологических факторов в Южной лесостепи Западной Сибири // Зерновое хозяйство России. 2020. № 5(71). С. 26-31. [Evdokimov MG, Yusov VS, Pakhotina IV. Correlation between productivity and grain quality of spring durum wheat and meteorological factors in the southern forest-steppe of the Western Siberia. Grain Economy of Russia. 2020; 5(71):26-31. (In Russ.)]. doi: 10.31367/2079-8725-2020-71-5-26-31
4. Крючков А.Г., Тейхриб П.П., Попов А.Н. Твёрдая пшеница. Современные технологии возделывания: монография. Изд-во: Оренб. кн. изд-во, 2008. 704 с. [Kryuchkov AG, Teikhris PP,

Popov AN. Tverdaya pshenitsa. Sovremennye tekhnologii vozdel'yvaniya: monografiya. Izd-vo: Orenburgskoe knizhnoe izdatel'stvo; 2008:704 p. (*In Russ.*).

5. Качество зерна яровой мягкой и твёрдой пшеницы в севооборотах Оренбургского Предуралья / В.Ю. Скороходов, Ю.В. Кафтан, А.А. Зоров, Е.Н. Скороходова, Н.А. Зенкова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 260-272. [Skorokhodov VYu, Kaftan YuV, Zorov AA, Skorokhodova EN, Zenkova NA. Quality of spring soft and durum wheat grain in crop rotations of the Orenburg Cis-Urals. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):260-272. (*In Russ.*)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-260>

6. Особенности формирования урожая твёрдой пшеницы на юге России / А.Ю. Беляев, Н.Ю. Петров, М.П. Аксёнов, Г.Н. Зверева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5(103). С. 27- 32. [Belyaev AI, Petrov NYu, Aksenov MP, Zvereva GN. Features of the formation of the durum wheat crop in the south of Russia. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023;103(5):27-32. (*In Russ.*)]. doi: 10.37670/2073-0853-2023-103-5-27-32

7. Плотникова Л.Я., Глушаков Д.А., Юсов В.С. Результаты изучения засухоустойчивости твёрдой пшеницы и её компонентов в Западной Сибири // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2022. № 4(48). С. 56-70. [Plotnikova LYa, Glushakov DA, Yusov VS. Results of the study of drought resistance of durum wheat and its components in Western Siberia. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;4(48):56-70. (*In Russ.*)]. doi: 10.48136/2222-0364_2022_4_56

8. Розова М.А., Зиборов А.И., Егiazарян Е.Е. Связь температурных показателей периода вегетации с основными агрономически значимыми характеристиками сортов яровой твёрдой пшеницы на Алтае // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 5. С. 9-15. [Rozova MA, Ziborov AI, Egiazaryan EE. Relationships of temperature parameters of growing period and major agronomically valuable traits of spring durum wheat varieties in Altai. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2021;5:9-15. (*In Russ.*)]. doi: 10.31857/S2500262721050021

9. Тимошенкова Т.А. Водоудерживающая способность как признак засухоустойчивости при отборе гибридных форм *Tritiumdurum* // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 4(102). С. 20-26. [Timoshenkova TA. Water-holding capacity as a sign of drought resistance in the selection of hybrid forms of *triticum durum*. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023;4(102):20-26. (*In Russ.*)]. doi: 10.37670/2073-0853-2023-102-4-20-26

10. Фёрстер Э., Рёнци Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа: руководство для экономистов / пер. с нем. и предисл. В.М. Ивановой. М.: «Финансы и статистика», 1983. 302 с. [Fjorster Je, Rjonec B. *Metody korreljacionnogo i regressionnogo analiza: rukovodstvo dlja jekonomistov*. *Perevod s nemeckogo i predislovie VM Ivanovoj*. Moscow: «Finansy i statistika»; 1983:302 p. (*In Russ.*)].

11. Bailey-Serres J, Parker JE, Ainsworth EA, Oldroyd GED, Schroede JI. Genetic strategies for improving crop yields. *Nature*. 2019;575:109-118. doi: 10.1038/s41586-019-1679-0

12. Bapela Th, Shimelis H, Tsilo TJ, Mathew I. Genetic improvement of wheat for drought tolerance: progress, challenges and opportunities. *Plants (Basel)*. 2022;11(10):1331. doi: 10.3390/plants11101331

13. Besaliev IN, Panfilov AL, Karavaytsev YaA, Reger NS, Kholodilina TN. Content of prolin and essential amino acids in spring wheat grain in dry conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;848:012116. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012116

14. Chaonan Li, Long Li, Matthew P Reynolds, Jingyi Wang, Xiaoping Chang, Xinguo Mao, Ruilian Jing. Recognizing the hidden half in wheat: root system attributes associated with drought tolerance. *J Exp Bot*. 2021;72(14):5117-5133. doi: 10.1093/jxb/erab124

15. Dolianovic Z, RoljeicNikolic S, Kovacevic D, Djurjic S, Miodragovic R, Jovanovic M, Popovic Diorievic J. Mineral profile of winter wheat grain: Effects of soil tillage systems and nitrogen fertilization. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019;17(5):11757-11771. doi: 10.15666/aer/1705_1175711771

16. Gagliardi A, Carucci F, Masci St, Flagella Z, Gatta G, Giuliani MM. Effects of genotype, growing season and nitrogen level on gluten protein assembly of durum wheat grown under mediterranean conditions. *Agronomy*. 2020;10(5):755. doi: 10.3390/agronomy10050755
17. Igbal J. Morphological, physiological and molecular markers for the adaptation of wheat in drought. *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering*. 2019;2(1):1-13. doi: 10.9734/AJBGE/2019/46253
18. Jagadish Rane, Ajay Kumar Singh, Mahesh Kumar, Karnar M Boraiah, Kamlesh K Meena, Aliza Pradhan, PV Vara Prasad. The adaptation and tolerance of major cereals and legumes to important abiotic stresses. *Int J Mol Sci*.2021;22(23):12970. doi: 10.3390/ijms222312970
19. Khan A, Ahmad M, Ahmed M, Iftikhar Hussain M. Rising atmospheric temperature impact on wheat and thermotolerance strategies. *Plants (Basel)*. 2021;10(1):43. doi: 10.3390/plants10010043
20. Lan Y, Chawade A, Kuktaite R, Johansson E. Climate change impact on performance – effects on vigour, plant traits and yield from early and late drought stress in diverse lines. *Int J Mol Sci*. 2022;23(6): 3333. doi: 10.3390/ijms23063333
21. Maqbool S, Ahmad S, Kainat Z, et al. Root system architecture of historical spring wheat cultivars is associated with alleles and transcripts of major functional genes. *BMC Plant Biol*. 2022;22(1):590. doi: 10.1186/s12870-022-03937-7
22. Nardino M, Perin EC, Aranha BC, Carpes ST, Fontoura BH, Palheta de Sousa DJ, de Freitas DS. Understanding drought response mechanismus in wheat and multi-trait selection. *Plos One*. 2022;17(4):e0266368. doi: 10.1371/journal.pone.0266368
23. Sinda Ben Mariem, Jon González-Torralba, Concha Collar, Iker Aranjuelo, Fermín Morales. Durum wheat grain yield and quality under low and high nitrogen conditions: insights into natural variation in low- and high- yielding genotypes. *Plants (Basel)*. 2020;9(12):1636. doi: 10.3390/plants9121636
24. Wan C, Dang P, Gao L, Wang J, Tao J, Qin X, Feng B and Gao J. How does the environment affect wheat yield and protein content response to drought? A meta – analysis. *Front Plant Sci*. 2022;13:896985. doi: 10.3389/fpls.2022.896985

References

1. Goncharov SV, Kurashov MYu. Prospects for development of the Russian durum wheat market. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;2(57):66-75. doi: 10.17238/issn2071-2243.2018.2.66
2. Annual data of the Press release of the Ministry of Agriculture of the Orenburg region for 2010-2013.
3. Evdokimov MG, Yusov VS, Pakhotina IV. Correlation between productivity and grain quality of spring durum wheat and meteorological factors in the southern forest-steppe of the Western Siberia. *Grain Economy of Russia*. 2020;5(71):26-31. doi: 10.31367/2079-8725-2020-71-5-26-31
4. Kryuchkov AG, Techrib PP, Popov AN. Durum wheat. Modern cultivation technologies: monograph. Publishing house: Orenburg Book Publishing House; 2008:701 p.
5. Skorokhodov VYu, Kaftan YuV, Zorov AA, Skorokhodova EN, Zenkova NA. Quality of spring soft and durum wheat grain in crop rotations of the Orenburg Cis-Urals. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):260-272. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-260>
6. Belyaev AI, Petrov NYu, Aksenov MP, Zvereva GN. Features of the formation of the durum wheat crop in the south of Russia. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023;103(5):27-32. doi: 10.37670/2073-0853-2023-103-5-27-32
7. Plotnikova LYa, Glushakov DA, Yusov VS. Results of the study of drought resistance of durum wheat and its components in Western Siberia. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2022;4(48):56-70. doi: 10.48136/2222-0364_2022_4_56
8. Rozova MA, Ziborov AI, Egiazaryan EE. Relationships of temperature parameters of growing period and major agronomically valuable traits of spring durum wheat varieties in Altai. *Russian Agricultural Science*. 2021;5:9-15. doi: 10.31857/S2500262721050021

9. Timoshenkova TA. Water-holding capacity as a sign of drought resistance in the selection of hybrid forms of triticum durum. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023;4(102):20-26. doi: 10.37670/2073-0853-2023-102-4-20-26
10. Förster E, Rönz B. Methods of correlation and regression analysis: a guide for economists. trans. from German and foreword by VM. Ivanova. Moscow: "Finances and statistics"; 1983:302 p.
11. Bailey-Serres J, Parker JE, Ainsworth EA, Oldroyd GED, Schroede JI. Genetic strategies for improving crop yields. *Nature*. 2019;575:109-118. doi: 10.1038/s41586-019-1679-0
12. Bapela Th, Shimelis H, Tsilo TJ, Mathew I. Genetic improvement of wheat for drought tolerance: progress, challenges and opportunities. *Plants (Basel)*. 2022;11(10):1331. doi: 10.3390/plants11101331
13. Besaliev IN, Panfilov AL, Karavaytsev YaA, Reger NS, Kholodilina TN. Content of prolin and essential amino acids in spring wheat grain in dry conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;848:012116. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012116
14. Chaonan Li, Long Li, Matthew P Reynolds, Jingyi Wang, Xiaoping Chang, Xinguo Mao, Ruilian Jing. Recognizing the hidden half in wheat: root system attributes associated with drought tolerance. *J Exp Bot*. 2021;72(14):5117-5133. doi: 10.1093/jxb/erab124
15. Dolianovic Z, RoljeicNikolic S, Kovacevic D, Djurjic S, Miodragovic R, Jovanovic M, Popovic Diorievic J. Mineral profile of winter wheat grain: Effects of soil tillage systems and nitrogen fertilization. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019;17(5):11757-11771. doi: 10.15666/aeer/1705_1175711771
16. Gagliardi A, Carucci F, Masci St, Flagella Z, Gatta G, Giuliani MM. Effects of genotype, growing season and nitrogen level on gluten protein assembly of durum wheat grown under mediterranean conditions. *Agronomy*. 2020;10(5):755. doi: 10.3390/agronomy10050755
17. Igbal J. Morphological, physiological and molecular markers for the adaptation of wheat in drought. *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering*. 2019;2(1):1-13. doi: 10.9734/AJBGE/2019/46253
18. Jagadish Rane, Ajay Kumar Singh, Mahesh Kumar, Karnar M Boraiah, Kamlesh K Meena, Aliza Pradhan, PV Vara Prasad. The adaptation and tolerance of major cereals and legumes to important abiotic stresses. *Int J Mol Sci*. 2021;22(23):12970. doi: 10.3390/ijms222312970
19. Khan A, Ahmad M, Ahmed M, Iftikhar Hussain M. Rising atmospheric temperature impact on wheat and thermotolerance strategies. *Plants (Basel)*. 2021;10(1):43. doi: 10.3390/plants10010043
20. Lan Y, Chawade A, Kuktaite R, Johansson E. Climate change impact on performance – effects on vigour, plant traits and yield from early and late drought stress in diverse lines. *Int J Mol Sci*. 2022;23(6): 3333. doi: 10.3390/ijms23063333
21. Maqbool S, Ahmad S, Kainat Z, et al. Root system architecture of historical spring wheat cultivars is associated with alleles and transcripts of major functional genes. *BMC Plant Biol*. 2022;22(1):590. doi: 10.1186/s12870-022-03937-7
22. Nardino M, Perin EC, Aranha BC, Carpes ST, Fontoura BH, Palheta de Sousa DJ, de Freitas DS. Understanding drought response mechanism in wheat and multi-trait selection. *Plos One*. 2022;17(4):e0266368. doi: 10.1371/journal.pone.0266368
23. Sinda Ben Mariem, Jon González-Torralba, Concha Collar, Iker Aranjuelo, Fermín Morales. Durum wheat grain yield and quality under low and high nitrogen conditions: insights into natural variation in low- and high- yielding genotypes. *Plants (Basel)*. 2020;9(12):1636. doi: 10.3390/plants9121636
24. Wan C, Dang P, Gao L, Wang J, Tao J, Qin X, Feng B and Gao J. How does the environment affect wheat yield and protein content response to drought? A meta – analysis. *Front Plant Sci*. 2022;13:896985. doi: 10.3389/fpls.2022.896985

Информация об авторах:

Ишен Насанович Бесалиев, доктор сельскохозяйственных наук, заведующий отделом технологий зерновых и кормовых культур, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина 27/1, тел.: +79228665599.

Сергей Иванович МIRONENKO, доктор сельскохозяйственных наук, руководитель структурного подразделения, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина 27/1, тел.:89228115300.

Information about the authors:

Ishen N Besaliev, Dr. Sci. (Agriculture), Head of the Department of Grain and Forage Crops Technologies, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: +79228665599.

Sergey I Mironenko, Dr. Sci. (Agriculture), Head of the Structural unit, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: +79228115300.

Статья поступила в редакцию 13.08.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 13.08.2024; approved after reviewing 17.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 337-346.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 337-346.

Научная статья
УДК 633.16:547.979.7
doi:10.33284/2658-3135-107-4-337

**Анализ содержания хлорофилла в листьях ярового ячменя с использованием
гиперспектральной визуализации и спектрофотометрии**

Екатерина Юрьевна Подласова¹, Антонина Александровна Новикова²

^{1,2}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹katerina.pryakhina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2985-198X>

²tony-novikova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6947-9262>

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по поиску универсальных вегетационных индексов на растениях ярового ячменя, выращенных на гидропонной системе в климатической камере закрытого типа. С помощью спектрофотометра концентрация хлорофилла в листьях ярового ячменя в фазу кущения находилась в диапазоне у хлорофилла *Cl a* от 0,17 до 0,35 мг/см², хлорофилла *Cl b* – от 0,11 до 0,31 мг/см², хлорофилла *Cl a+b* – от 0,11 до 0,25 мг/см² и каротиноидов (*Car*) – от 0,11 до 0,19 мг/см². Для количественной оценки содержания хлорофилла были выведены несколько вегетационных индексов, рассчитанных на основе коэффициента отражения на определённых длинах волн. Собрав спектральные изображения листьев ярового ячменя и используя корреляцию Спирмена, мы обнаружили тесную корреляционную связь между CVI и OSAVI индексами с *Cl a+b* при $r^2=0,93$ и $r^2=0,91$. Эта работа показала, что использование вегетационных индексов перспективно для оценки содержания фотосинтетических пигментов в листьях ярового ячменя. Таким образом, гиперспектральная оценка может быть использована в качестве неразрушающего и эффективного метода в селекции и семеноводстве этой культуры.

Ключевые слова: ячмень яровой (*Hordeum vulgare*), спектрофотометрия, вегетационный индекс, хлорофилл, гиперспектральный анализ

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0007).

Для цитирования: Подласова Е.Ю., Новикова А.А. Анализ содержания хлорофилла в листьях ярового ячменя с использованием гиперспектральной визуализации и спектрофотометрии // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 337-346. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-337>

Original article

**Analysis of chlorophyll content in spring barley leaves using hyperspectral imaging
and spectrophotometry**

Ekaterina Yu Podlasova¹, Antonina A Novikova²

^{1,2}Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹katerina.pryakhina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2985-198X>

²tony-novikova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6947-9262>

Abstract. The article presents the results of research on the search for universal vegetation indices on spring barley plants grown on a hydroponic system in a closed climate chamber. Using a spectrophotometer, the concentrations of chlorophyll in the leaves of spring barley during the tillering phase ranged

in chlorophyll *Cl a* from 0.17 to 0.35 mg/cm², chlorophyll *Cl b* from 0.11 to 0.31 mg/cm², chlorophyll *Cl a+b* from 0.11 to 0.25 mg/cm² and carotenoids (*Car*) from 0.11 to 0.19 mg/cm². To quantify the chlorophyll content, several vegetation indices were derived, calculated on the basis of the reflection coefficient at certain wavelengths. By collecting spectral images of spring barley leaves and using Spearman correlation, we found a close correlation between CVI and OSAVI indices with *Cl a+b* at $r^2 = 0.93$ and $r^2 = 0.91$. This work has shown that the use of vegetation indices is promising for assessing the content of photosynthetic pigments in the leaves of spring barley. Thus, hyperspectral assessment can be used as a non-destructive and effective method in selection and seed production of this crop.

Keywords: spring barley (*Hordeum vulgare*), spectrophotometry, vegetation index, chlorophyll, hyperspectral analysis

Acknowledgements: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBSI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0007).

For citation: Podlasova EYu, Novikova AA. Analysis of chlorophyll content in spring barley leaves using hyperspectral imaging and spectrophotometry. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):337-346. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-337>

Введение.

Содержание хлорофилла указывает на физиологическое состояние растений и является количественным показателем фотосинтетической способности, наиболее полно отражающим продукционный процесс (Бесалиев И.Н. и Панфилов А.Л., 2023; Новикова А.А. и др., 2022). Хлорофилл отвечает за управление световой энергии и передачу её другим молекулам, которые участвуют в синтезе органических соединений. Этот пигмент играет важную роль в поддержании баланса кислорода и углекислого газа в атмосфере, что делает его необходимым для жизни растений (Короткова А.М. и др., 2019).

Концентрацию пигментов можно исследовать с помощью хроматографии и спектрофотометрии, однако данные методы являются очень трудоёмкими и, что важно для селекционного процесса, разрушающими для объекта исследования. Поэтому более удобным методом, который стремительно развивается в настоящее время, является метод дистанционной оценки на основе анализа спектров электромагнитного излучения (Dai W et al., 2016). Данные методы основаны на том факте, что различные пигменты по-разному поглощают излучение различных длин волн. Таким образом, каждый пигмент имеет свой собственный характер спектрального отражательного излучения, который можно идентифицировать с помощью спектрометра высокого разрешения в определенном диапазоне длин волн.

Спектральные измерения в чувствительном к фотосинтетическим пигментам диапазоне спектра электромагнитного излучения стали возможными благодаря использованию мультиспектральных и гиперспектральных камер. Последние способны сканировать интересующий диапазон длины волн в высоком разрешении. Было показано, что длины волн, примыкающие к полосам 700 нм и 500 нм, более чувствительны к содержанию хлорофилла (Wang H et al., 2016). Сбор и обработка спектральных изображений позволяет бесконтактно обнаруживать и определять концентрацию хлорофилла у таких растений как земляника (Arief MAA et al., 2023), тополь (Shan L et al., 2018), кукуруза (Qingfeng S et al., 2023), клён (Игнатова М.А. и др., 2024), соя (Zolotukhina A et al., 2023) и другие. Активное развитие дистанционного мониторинга и оценка содержания хлорофилла в растениях с помощью мультиспектральных и гиперспектральных снимков являются важными методами определения содержания хлорофилла. В настоящее время для получения мультиспектральных и гиперспектральных изображений используют специальные методы, которые отличаются технологией реализации сенсора, шириной спектрального интервала, спектральным и пространственным разрешением (Zhang H et al., 2022).

Однако гиперспектральная камера выводит полученные данные, содержащие спектральные характеристики и пространственные координаты изображения растений. Пользоваться такими

данными можно только после того, как они будут преобразованы в вегетационный индекс с использованием различных формул.

Вегетационные индексы представляют собой математические комбинации отражательной способности растений в нескольких спектральных диапазонах (Koch JCO et al., 2022; Qiao L et al., 2022). В связи с этим точный расчёт какого-либо признака, в том числе концентрации хлорофилла, часто требует исчерпывающих исследований спектральной отражательной способности для каждого растения и внедрения моделей индексов, специфичных для культуры. Большинство чувствительных к хлорофиллу вегетационных индексов представляют собой математические функции отражения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, которые могут эффективно выявить фотосинтезирующую способность растений (Kooistra L and Clevers JGPW, 2016). Однако даже для одного вида растения вегетационные индексы признака способны отличаться в зависимости от его типа, стадии вегетации или условий произрастания.

В настоящем исследовании впервые проведён анализ следующих вегетационных индексов: нормализованный разностный NDVI, индекс хлорофилла CVI, модифицированный индекс коэффициента поглощения хлорофилла MCARI, модифицированный индекс коэффициента поглощения преобразованного хлорофилла TCARI и оптимизированный индекс растительности OSAVI, чувствительных к содержанию хлорофилла, но не чувствительных к площади листовой поверхности, и содержания фотосинтетических пигментов для ярового ячменя.

Цель исследований.

Оценить силу корреляционной связи между концентрациями фотосинтетических пигментов и вегетационными индексами NDVI, CVI, MCARI, TCARI, OSAVI.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Яровой ячмень сорта Губернаторский.

Схема эксперимента. Исследования проводились на растениях, выращенных в контролируемых условиях на гидропонной системе, в фазу кущения, используя листовую пластину (в трёхкратной повторности, по 5-7 листьев в каждой). В качестве гидропонной системы выступал кокосовый субстрат.

Растения выращивались в кассетах по одному. Условия выращивания были следующими: фотопериод – 16/8 часов (день/ночь) с использованием режимов рассвет/закат, температура ночью – +20 °С, днем – +25 °С, относительная влажность воздуха – 60 % с условиями тумана в утренние часы и ветра в течение светового периода до 3 м/с, средней интенсивностью освещения 100 мкмоль/м²с. Полив производили питательным раствором Кнопа, концентрацией 70 %, pH среды – 6,5. Сроки проведения полива рассчитывались термостатно-весовым методом. Вес кассет с субстратом контролировали с помощью весов, установленных на дне камеры. Способ полива – нижнее затопление.

Листья сканировали с диапазоном 400-1000 нм, спектральным разрешением 2,5 нм, до 1200 спектральных каналов с дополнительным освещением лампами накаливания, интенсивностью света 200 Вт.

На гиперспектральном снимке выделялись зоны интереса путём одноэтапной сегментации с помощью поставки барьера по индексу Carter5 со значением более 1,4.

Вегетационные индексы CVI, NDVI, TCARI, MCARI, OSAVI рассчитывались с использованием среднего коэффициента отражения в спектральных диапазонах зелёный Rgreen 550-650 нм и красный Rred 600-650 нм, коэффициент отражения Nir 800-850 нм (Blackmer TM et al., 1994). Формулы для расчёта вегетационных индексов представлены в таблице 1.

Для получения эталонных значений содержания хлорофилла в листьях ярового ячменя использовали методику Смашевского (Смашевский Н.Д., 2011). Концентрацию хлорофилла оценивали в тех же листьях, где проводили гиперспектральные измерения. В течение 24 часов была проведена гиперспектральная визуализация и деструктивное содержание хлорофилла.

Таблица 1. **Вегетационные индексы, использованные для оценки содержания хлорофилла в листьях ярового ячменя в момент кущения**

Table 1. **Vegetation indices used to estimate the chlorophyll content in spring barley leaves at the time of tillering**

Вегетационный индекс / <i>Vegetation index</i>	Формула / <i>Formula</i>	Источник литературы / <i>Reference</i>
CVI	$(R_{Nir}/R_{green}) * (R_{red}/R_{green})$	Vincini M et al., 2008
NDVI	$(R_{Nir}-R_{640})/(R_{Nir}+R_{640})$	El-Henawi S et al., 2021
MCARI	$[(R_{850}-R_{715})-0,2*(R_{850}-R_{580})]*(R_{850}/R_{715})$	Daughtry CST et al., 2022
OSAVI	$[(1+0,16)*(R_{850}-R_{640})/(R_{850}+R_{640}+0,16)]$	Daughtry CST et al., 2022
TCARI	$3*[(R_{850}-R_{640})-0,2*(R_{850}-R_{550})]*(R_{850}/R_{640})]$	Haboudane D et al., 2002

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>) с использованием уникальной установки – Системы цифровых устройств закрытого типа для культивирования биологических объектов типа «Синерготрон ИСР 11.02» (Россия). Оценка вегетационных индексов производилась с использованием гиперсектральной камеры «FigSpec» (Китай). Спектральные данные, представленные в виде необрабатываемого файла, преобразовывали в фото с помощью программного обеспечения «Sinergotron» (Россия) и программы «Finich» (Китай). Концентрацию хлорофилла определяли с помощью спектрофотометра «UNIKO 1201» (Корея).

Статистическая обработка. Обработку проводили с использованием непараметрического коэффициента корреляции Спирмена. Для оценки силы связи использовали шкалу Чеддока. Линейная регрессия использовалась для моделирования зависимости между концентрацией пигмента и значениями вегетационных индексов CVI, NDVI, MCARI, OSAVI, TCARI. Точность модели и её тестов оценивали по средней абсолютной процентной погрешности (MAPE) и значению коэффициента измерения r^2 . Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (t-критерий Стьюдента) статистики. Представленные данные имели статистически значимые различия между вариантами при $P \leq 0,05$.

Результаты исследований.

Для того, чтобы подобрать наиболее универсальный вегетационный индекс в данном исследовании был проведён лабораторный опыт по определению содержания фотосинтетических пигментов в листьях ярового ячменя. Для точного измерения содержания хлорофилла вегетационные индексы должны быть проверены по отношению к эталонным измерениям, полученным с помощью спектрофотометрии. На рисунке 1 представлены данные концентрации хлорофилла в листьях ярового ячменя, полученных с помощью спектрофотометрического анализа. Содержание хлорофилла *a* (*Cl a*) в листьях находилось в пределах от 0,17 до 0,35 мг/см², хлорофилла *b* (*Cl b*) – от 0,11 до 0,31 мг/см², хлорофилла *a+b* (*Cl a+b*) – от 0,11 до 0,25 мг/см² и каротиноидов (*Car*) – от 0,11 до 0,19 мг/см².

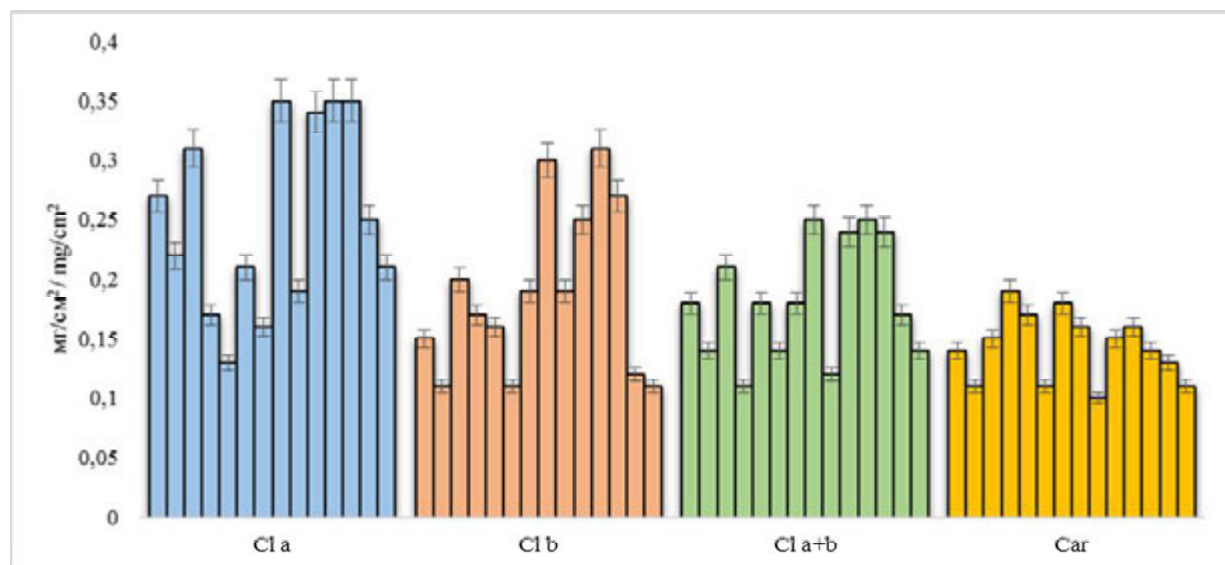


Рисунок 1. Ряды концентрации хлорофилла и каротиноидов в верхних листьях ярового ячменя в момент кущения, мг/см²

Figure 1. Concentration ranges of chlorophyll and carotenoids in the upper leaves of spring barley at the time of tillering, mg/cm²

Мы выбрали пять вегетационных индексов, которые оказались эффективными для измерения концентрации хлорофилла в листьях ярового ячменя. Чтобы установить на сколько тесно данные индексы взаимодействуют с хлорофиллом, рассчитали корреляционную связь по Спирмену (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции Спирмена между концентрацией хлорофиллов в листьях ярового ячменя и значениями вегетационных индексов
Table 2. The values of the Spearman correlation coefficient between the concentration of chlorophylls in the leaves of spring barley and the values of vegetation indices

Концентрация хлорофилла / <i>Chlorophyll concentration</i>	Вегетационные индексы / <i>Vegetation indices</i>				
	CVI	OSAVI	TCARI	MCARI	NDVI
<i>Cl a</i>	0,80	0,86	0,84	0,83	0,54
<i>Cl b</i>	0,73	0,79	0,81	0,75	0,70
<i>Cl a+b</i>	0,93	0,91	0,83	0,86	0,64
<i>Car</i>	0,16	0,14	0,09	0,07	-0,003

Из представленных в таблице показателей отмечается весьма высокая корреляционная связь между *Cl a+b* и вегетационными индексами CVI и OSAVI при $r^2=0,93$ и $r^2=0,91$, и менее выраженная корреляционная связь – с NDVI индексом при $r^2=0,64$.

Почти все вегетационные индексы имеют высокую связь с *Cl a* коэффициент корреляции превышает значение 0,8, только NDVI имеет умеренную связь при $r^2=0,54$. При сравнении корреляционной связи с *Cl b* только с вегетационным индексом TCARI была выявлена высокая сила связи при $r^2=0,81$.

Изученные вегетационные индексы показали положительную минимальную корреляционную связь с концентрацией *Car*, и только NDVI показал отрицательную корреляционную связь.

Обсуждение полученных результатов.

Оценка определения концентрации хлорофилла в листьях требует сбора большого количества статистических данных и приводит к неизбежным неточностям из-за труднопредсказуемых факторов окружающей среды. Для точного определения концентрации хлорофилла необходимо проверять любые модели на основе индексов по текущим эталонным значениям.

Если для конкретной культуры и поля не существует хорошо зарекомендовавшего себя вегетационного индекса, то определение концентрации хлорофилла становится ещё более сложной. В этом случае сначала необходимо определить наиболее подходящий вегетационный индекс, затем указать модель оценки содержания хлорофилла и применить её для расчёта распределения концентрации хлорофилла (Zolotukhina A et al., 2023).

За последние годы произошла заметная интенсификация по поиску подходящих вегетационных индексов с использованием спектрального сканирования на растениях сои (Zolotukhina A et al., 2023), листьях клёна (Игнатова М.А. и др., 2024), яровой мягкой пшенице (Альт В.В. и др., 2020), салата (Taha MF et al., 2024).

Полученные в наших исследованиях тесные корреляционные связи между вегетационными индексами и концентрацией хлорофилла в листьях ярового ячменя позволяют проводить дальнейшие исследования как в лабораторных, так и в полевых экспериментах по картированию концентрации хлорофилла.

Заключение.

Согласно данным, полученным с помощью линейной корреляции Спирмена, было выявлено, что проанализированные вегетационные индексы имели заметную связь с концентрацией хлорофилла в листьях. Наиболее высокая корреляционная связь была отмечена между $Cl\ a+b$ и вегетационными индексами CVI и OSAVI при $r^2=0,93$ и $r^2=0,91$.

Список источников

1. Бесалиев И.Н., Панфилов А.Л. Продолжительность и условия межфазных периодов вегетации как факторы продуктивности сортов яровой пшеницы в Оренбургском Предуралье // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 3. С. 202-212. [Besaliev IN, Panfilov AL. Duration and conditions of interphase periods of vegetation as productivity factors of spring wheat varieties in Orenburg Cis-Urals. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(3):202-212. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-202>
2. Использование гиперспектральной камеры Specim IQ для анализа растений / В.В. Альт, Т.А. Гурова, О.В. Елкин, Д.Н. Клименко, Л.В. Максимов, И.А. Пестунов, О.А. Дубровская, М.А. Генаев, Т.В. Эрст, К.А. Генаев, Е.Г. Комышев, В.К. Хлесткин, Д.А. Аффонилов // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. Т. 24. № 3. С. 259-266. [Alt VV, Gurova TA, Elkin OV, Klimenko DN, Maksimov LV, Pestunov IA, Dubrovskaya OA, Genaev MA, Erst TV, Genaev KA, Komyshev EG, Khlestkin VK, Affonnikov DA. The use Specim IQ a hyperspectral camera for plant analysis. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020;24(3):259-266. (In Russ.)]. doi: 10.18699/VJ19.587
3. Определение концентрации хлорофилла растений нескольких культур методом видеоспектрометрии / А.А. Золотухина, А.В. Гурьева, В.О. Гресис, К.Р. Дехканова, С.С. Полякова, Г.В. Нестеров, Н.Б. Платонова // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф., (г. Суздаль, 09-12 окт. 2023 г.). М.: НТЦ УП РАН, 2023. С. 394-398. [Zolotukhina AA, Guryleva AV, Gresis VO, Dekhkanova KR, Polyakova SS, Nesterov GV, Platonova NB. Multi-crop determination of chlorophyll concentration using imaging spectroscopy. (Conference proceedings) Acoustooptic and Radar Methods for Information Measurements and Processing: tr. XVI Mezhdunar. nauch.-tehnikeskoy konf., (g. Suzdal', 09-12 okt. 2023 g.). Moscow: NTC UP RAN; 2023:394-398. (In Russ.)].

4. Оценка влияния ультрадисперсных частиц на биометрические параметры проростков пшеницы / А.М. Короткова, С.В. Лебедев, О.В. Кван, К.Н. Атландерова // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102, № 2. С. 7-20 [Korotkova AM, Lebedev SV, Kvan OV, Atlanderova KN. Evaluation of ultrafine particles influence on biometric parameters of wheat germs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(2):7-20. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-7
5. Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки / М.А. Игнатова, Б.Л. Козловский, А.А. Дмитриева, Т.В. Вардуни, П.А. Дмитриев // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2024. № 2. [Ignatova MA, Kozlovsky BL, Dmitrieva AA, Varduny TV, Dmitriev PA. Assessment of the seasonal dynamics of photosynthetic pigments in maple leaves using vegetation indices calculated from hyperspectral survey data. *AgroEcoInfo: Electronic science-productive magazine*. 2024;2. (*In Russ.*)]. doi:10.51419/202142206
6. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов ярового ячменя по урожайности в условиях Оренбургского региона / А.А. Новикова, А.А. Емельянова, А.А. Пустовалова, О.С. Гречишкина, Т.А. Мишенина, М.В. Замерзляк // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 4. С. 220-231. [Novikova AA, Emelyanova AA, Pustovalova AA, Grechishkina OS, Mishenina TA, Zamerzlyak MV. Assessment of ecological plasticity and stability of spring barley varieties by yield in the conditions of Orenburg region. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(4):220-231. (*In Russ.*)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-4-220>
7. Смашевский Н.Д. Практикум по физиологии растений: учеб. пособие. Астрахань: Астрах. гос. ун-т, Издат. дом «Астраханский университет», 2011. 77 с. [Smashevsky ND. Practical training in plant physiology: a textbook. Astrakhan: Astrakhan State University, Publishing House "Astrakhan University"; 2011:77 p. (*In Russ.*)].
8. Arief MAA, Kim H, Kurniawan H, Nugroho AP, Kim T, Cho BK. Chlorophyll fluorescence imaging for early detection of drought and stress in strawberry plants. *Plants*. 2023;12(6):1387. doi: 10.3390/plants12061387
9. Blackmer TM, Shepers JS, Varvel G V. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy Journal*. 1994; 86(6):934-938.
10. Dai W, Girdthai T, Huang Z, Ketudat-Cairns M, Tang R, Wang S. Genetic analysis for anthocyanin and chlorophyll contents in rapeseed. *Cienc Rural*. 2016;46(5):790-795. doi: 10.1590/0103-8478CR20150564
11. Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, De Colstoun EB, McMurtrey JE III. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens Environ*. 2000;74(2):229-239. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00113-9
12. El-Hendawi S, Elsayed S, Al-Suhaibani N, Alotaibi M, Tahir MU, Mubushar M, Attiyah A, Hassan VM. Using hyperspectral imaging to assess the growth and content of chlorophyll in spring wheat grown under simulated soil salinity. *Plants*. 2021;10:101. doi: 10.1038/s41598-019-52802-5
13. Haboudane D, Miller JR, Tremblay N, Zarco-Tejada PJ, Dextraze L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens Environ*. 2002;81:416-426. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00018-4
14. Koch JCO, Banerjee BP, Spangenberg G, Kant S. Automated hyperspectral vegetation index derivation using a hyperparameter optimisation framework for high-throughput plant phenotyping. *New Phytol*. 2022;233(6):2659-2670. doi: 10.1111/NPH.17947
15. Kooistra L, Clevers JGPW. Estimating potato leaf chlorophyll content using ratio vegetation indices. *Remote Sensing Letters*. 2016;7(6):611-620. doi: 10.1080/2150704X.2016.1171925
16. Qiao L, Tang W, Gao D, Zhao R, An L, Li M, et al. UAV-based chlorophyll content estimation by evaluating vegetation index responses under different crop coverages. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;196:106775. doi: 10.1016/J.COMPAG.2022.106775
17. Qingfeng S, Fusang L, Hongyi B, Xin-Guang Z. Quantifying contributions of different factors to canopy photosynthesis in 2 maize varieties: development of a novel 3D canopy modeling pipeline. *Plant Phenomics*. 2023;5: 0075. doi: 10.34133/plantphenomics.0075

18. Shan L, Fan L, Wenqiang Y, Zheyi W, Yu L, Kenji O. A robust vegetation index for remotely assessing chlorophyll content of dorsiventral leaves across several species in different seasons. *Plant Methods*. 2018;14:15. doi: 10.1186/s13007-018-0281-z
19. Taha MF, Mao H, Wang Y, ElManawy AI, Elmasry G, Wu L, Memon MS, Niu Z, Huang T, Qiu Z. High-throughput analysis of leaf chlorophyll content in aquaponically grown lettuce using hyperspectral reflectance and RGB images. *Plants*. 2024;13(3):392. doi: 10.3390/plants13030392
20. Vincini M, Frazzi E, D'Alessio P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precis Agric*. 2008;9:303-319. doi: 10.1007/s11119-008-9075-z
21. Wang H, Shi R, Liu PD, Gao W. The study of vegetation indices for the monitoring of differences in chlorophyll and carotenoid composition in green vegetables. *The International Society for Optical Engineering*. 2016;36(7):2189-2194. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2189-06
22. Zhang H, Ge Y, Xie X, et al. High throughput analysis of leaf chlorophyll content in sorghum using RGB, hyperspectral, and fluorescence imaging and sensor fusion. *Plant Methods*. 2022;18:60. doi: 10.1186/s13007-022-00892-0
23. Zolotukhina A, Machikhin A, Guryleva A, Gresis V, Tedeeva V. Extraction of chlorophyll concentration maps from AOTF hyperspectral imagery. *Front Environ Sci*. 2023;11:1152450. doi: 10.3389/fenvs.2023.1152450

References

1. Besaliev IN, Panfilov AL. Duration and conditions of interphase periods of vegetation as productivity factors of spring wheat varieties in Orenburg Cis-Urals. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(3):202-212. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-202>
2. Alt VV, Gurova TA, Elkin OV, Klimenko DN, Maksimov LV, Pestunov IA, Dubrovskaya OA, Genaev MA, Erst TV, Genaev KA, Komyshev EG, Khlestkin VK, Affonikov DA. The use Specim IQ a hyperspectral camera for plant analysis. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(3):259-266. doi: 10.18699/VJ19.587
3. Zolotukhina AA, Guryleva AV, Gresis VO, Dekhkanova KR, Polyakova SS, Nesterov GV, Platonova NB. Multi-crop determination of chlorophyll concentration using imaging spectroscopy (Conference proceedings) Acoustooptic and Radar Methods for Information Measurements and Processing: Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference (Suzdal', 09-12 October 2023). Moscow: STC UI RAS; 2023:394-398.
4. Korotkova AM, Lebedev SV, Kvan OV, Atlanderova KN. Evaluation of ultrafine particles influence on biometric parameters of wheat germs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(2):7-20. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-7
5. Ignatova MA, Kozlovsky BL, Dmitrieva AA, Varduny TV, Dmitriev PA. Assessment of the seasonal dynamics of photosynthetic pigments in maple leaves using vegetation indices calculated from hyperspectral survey data. *AgroEcoInfo: Electronic science-productive magazine*. 2024;2. doi:10.51419/202142206
6. Novikova AA, Emelyanova AA, Pustovalova AA, Grechishkina OS, Mishenina TA, Zammerzlyak MV. Assessment of ecological plasticity and stability of spring barley varieties by yield in the conditions of Orenburg region. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(4):220-231. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-4-220>
7. Smashevsky ND. Practical training in plant physiology: a textbook. Astrakhan: Astrakhan State University, Publishing House "Astrakhan University"; 2011:77 p.
8. Arief MAA, Kim H, Kurniawan H, Nugroho AP, Kim T, Cho BK. Chlorophyll fluorescence imaging for early detection of drought and stress in strawberry plants. *Plants*. 2023;12(6):1387. doi:10.3390/plants12061387
9. Blackmer TM, Shepers JS, Varvel G V. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy Journal*. 1994;86(6):934-938.

10. Dai W, Girdthai T, Huang Z, Ketudat-Cairns M, Tang R, Wang S. Genetic analysis for anthocyanin and chlorophyll contents in rapeseed. *Cienc Rural*. 2016;46(5):790-795. doi: 10.1590/0103-8478CR20150564
11. Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, De Colstoun EB, McMurtrey JE III. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens Environ*. 2000;74(2):229-239. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00113-9
12. El-Hendawi S, Elsayed S, Al-Suhaibani N, Alotaibi M, Tahir MU, Mubushar M, Attiyah A, Hassan VM. Using hyperspectral imaging to assess the growth and content of chlorophyll in spring wheat grown under simulated soil salinity. *Plants*. 2021;10:101. doi: 10.1038/s41598-019-52802-5
13. Haboudane D, Miller JR, Tremblay N, Zarco-Tejada PJ, Dextraze L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens Environ*. 2002;81:416-426. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00018-4
14. Koch JCO, Banerjee BP, Spangenberg G, Kant S. Automated hyperspectral vegetation index derivation using a hyperparameter optimisation framework for high-throughput plant phenotyping. *New Phytol*. 2022;233(6):2659-2670. doi: 10.1111/NPH.17947
15. Kooistra L, Clevers JGPW. Estimating potato leaf chlorophyll content using ratio vegetation indices. *Remote Sensing Letters*. 2016;7(6):611-620. doi: 10.1080/2150704X.2016.1171925
16. Qiao L, Tang W, Gao D, Zhao R, An L, Li M, et al. UAV-based chlorophyll content estimation by evaluating vegetation index responses under different crop coverages. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;196:106775. doi: 10.1016/J.COMPAG.2022.106775
17. Qingfeng S, Fusang L, Hongyi B, Xin-Guang Z. Quantifying contributions of different factors to canopy photosynthesis in 2 maize varieties: development of a novel 3D canopy modeling pipeline. *Plant Phenomics*. 2023;5: 0075. doi: 10.34133/plantphenomics.0075
18. Shan L, Fan L, Wenqiang Y, Zheyi W, Yu L, Kenji O. A robust vegetation index for remotely assessing chlorophyll content of dorsiventral leaves across several species in different seasons. *Plant Methods*. 2018;14:15. doi: 10.1186/s13007-018-0281-z
19. Taha MF, Mao H, Wang Y, ElManawy AI, Elmasry G, Wu L, Memon MS, Niu Z, Huang T, Qiu Z. High-throughput analysis of leaf chlorophyll content in aquaponically grown lettuce using hyperspectral reflectance and RGB images. *Plants*. 2024;13(3):392. doi: 10.3390/plants13030392
20. Vincini M, Frazzi E, D'Alessio P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precis Agric*. 2008;9:303-319. doi: 10.1007/s11119-008-9075-z
21. Wang H, Shi R, Liu PD, Gao W. The study of vegetation indices for the monitoring of differences in chlorophyll and carotenoid composition in green vegetables. *The International Society for Optical Engineering*. 2016;36(7):2189-2194. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2189-06
22. Zhang H, Ge Y, Xie X, et al. High throughput analysis of leaf chlorophyll content in sorghum using RGB, hyperspectral, and fluorescence imaging and sensor fusion. *Plant Methods*. 2022;18:60. doi: 10.1186/s13007-022-00892-0
23. Zolotukhina A, Machikhin A, Guryleva A, Gresis V, Tedeeva V. Extraction of chlorophyll concentration maps from AOTF hyperspectral imagery. *Front Environ Sci*. 2023;11:1152450. doi: 10.3389/fenvs.2023.1152450

Информация об авторах:

Екатерина Юрьевна Подласова, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в растениеводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина 27/1, тел.: 89877866593.

Антонина Александровна Новикова, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией селекционно-генетических исследований в растениеводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 89228884481.

Information about the authors:

Ekaterina Yu Podlasova, Cand. Sci. (Agriculture), Junior Researcher at the Laboratory of Breeding and Genetic Research in Crop Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: 89877866593.

Antonina A Novikova, Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Breeding and Genetic Research in Crop Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: 89228884481.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 21.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.



Памяти

Николая Ивановича ТИШКОВА

кандидата сельскохозяйственных наук

01.09.1946-21.11.2024

Николай Иванович родился 01.09.1946 г. в селе Буренино Ташлинского района Оренбургской области. Окончил Оренбургский сельскохозяйственный институт в 1969 году (учёный-агроном). С 1971 года вся его жизнь связана с сельским хозяйством – от старшего научного сотрудника в отделе селекции ОНИИСХ до ведущего научного сотрудника лаборатории селекции ярового ячменя ФНЦ БСТ РАН. При этом он постоянно повышал свой профессиональный уровень, защитив диссертацию кандидата сельскохозяйственных наук.

Н.И. Тишков являлся главным специалистом по селекции ярового ячменя в Оренбургской области. За годы работы в институте, начав практически с нуля, он создал богатейший по биотипическому составу селекционный материал (20 000 образцов). В процессе селекции им выведено 19 сортов ярового ячменя. При непосредственном участии и руководстве Н.И. Тишкова в производстве возделывались 7 высокоурожайных сортов. Они имеют широкий ареал возделывания, занимают более 50 % посевных площадей ярового ячменя в Оренбургской области, а также выращиваются в республиках Башкортостан, Калмыкия, Бурятия и Якутия, Алтайском крае и Астраханской области. На X Московской международной выставке инноваций и инвестиций сорт Натали был удостоен золотой медали, а сорт Т 12 – серебряной.

Последние сорта ячменя Николая Ивановича – Анна, Адамовский 1, Первоцелинник, Натали – сорта нового поколения, с высокой адаптивной способностью, потенциальной урожайностью до 50-60 ц зерна с 1 га. Сорт Анна внесён в Государственный реестр селекционных достижений по Уральскому, Средне-Волжскому, Восточно-Сибирскому регионам, пользуется популярностью у земледельцев Оренбуржья. Сорта Адамовский 1, Первоцелинник, Натали успешно прошли государственное испытание.

Результаты селекционной деятельности Н.И. Тишкова отражены более чем в 100 печатных научных работах. Он является соавтором методической рекомендации: «Яровой ячмень. Современные технологии возделывания в хозяйствах Оренбургской области», 2022.

За весомый вклад в научное обеспечение агропромышленного комплекса Оренбургской области Николай Иванович Тишков неоднократно был отмечен почётными грамотами и благодарностями: Почётная грамота Российской академии сельскохозяйственных наук, Почётная грамота Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, бронзовая медаль ВДНХ, серебряная медаль ВДНХ, лауреат премии администрации Оренбургской области в сфере науки и техники, Почётная грамота департамента АПК Оренбургской области, Почётная грамота Министерства сельского хозяйства Оренбургской области. Николай Иванович имеет почётное звание «Заслуженный агроном Российской Федерации».

Руководство и сотрудники Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук выражают свои соболезнования родным и близким Николая Ивановича Тишкова в связи с тяжёлой утратой.

100 лет со дня рождения С.Г. Леушина.....	2

Нанотехнологии в животноводстве и кормопроизводстве

Гвоздиков А.М., Поливанова О.Б., Федорова Д.Г. Особенности влияния биосинтезированных нанопорошков на каллусные культуры <i>in vitro</i>	1
Камирова А.М., Сизова Е.А., Иванищева А.П., Шошин Д.Е., Яшуева Е.В. Органоминеральный комплекс на основе ультрадисперсных кремнийсодержащих частиц, как модулятор микробиома желудочно-кишечного тракта крупного рогатого скота.....	2
Мирошникова Е.П., Аринжанова М.С., Аринжанов А.Е., Мирошников С.А. Использование препарата наночастиц SiO ₂ в кормлении карпа.....	4
Шошин Д.Е., Сизова Е.А., Камирова А.М., Иванищева А.П. Ультрадисперсные частицы Co ₃ O ₄ и Mn ₂ O ₃ как эффекторы рубцового пищеварения <i>in vitro</i>	1

Биоэлементология в животноводстве и растениеводстве

Иньшин О.В., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е., Мирошников С.А. Влияние активированного угля на элементный статус мышечной ткани радужной форели.....	2
Тарасова Е.И., Полякова В.С., Сизова Е.А. Связь полиморфизма гена <i>DGAT1</i> с элементным составом биосубстратов и продуктивностью коров чёрно-пёстрой породы Ленинградской, Вологодской и Оренбургской областей.....	3
Фролов А.Н., Завьялов О.А. Влияние сезона года на элементный статус и продуктивные качества бычков.....	4
Шошина О.В. Оценка элементного и биохимического состава сыворотки крови при включении в рацион бычков казахской белоголовой породы пиколината хрома.....	1

Разведение, селекция, генетика

Бардуков Н.В., Никипелова А.К., Отраднов П.И., Никипелов В.И., Белоус А.А. Определение достоверности происхождения сибирского осетра на основе результатов микросателлитного анализа и коэффициентов генетического сходства.....	4
Ветох А.Н., Волкова Н.А., Ларионова П.В., Джагаев А.Ю., Абдельманова А.С., Зиновьева Н.А. Полногеномные ассоциативные исследования показателей цвета мяса у кур F2 ресурсной популяции.....	4
Герасимов Н.П., Сангаков А.К. Динамика весового роста у молодняка казахской белоголовой породы с различным уровнем экспрессии генов соматотропной оси.....	1
Додохов В.В. Полиморфизм микросателлитных локусов ДНК у домашних северных оленей эвенской породы.....	3
Дунин И.М., Герасимов А.А., Никитина С.В., Матвеева Е.А. Определение племенной ценности абердин-ангусского скота Российской Федерации по Методике Евразийского экономического союза.....	3
Елемесов Б.К., Явнова М.С., Джуламанов К.М. Весовой и линейный рост животных герефордской породы скота разных экстерьерных типов.....	2
Камалдинов Е.В., Петров А.Ф., Нарожных К.Н., Пальчиков П.Н. Оценка качества генеалогических данных в племенных предприятиях Западной Сибири.....	4
Коновалова Е.Н., Романенкова О.С., Гладырь Е.А. Анализ российских популяций крупного рогатого скота мясного направления продуктивности по полиморфизмам гена кальпаина 1.....	1
Коновалова Е.Н., Евстафьева Л.В., Сафонова С.С., Романенкова О.С., Гладырь Е.А. Химический состав и гистологическая структура длиннейшей мышцы спины крупного рогатого скота абердин-ангусской породы в зависимости от генотипа.....	4
Криворучко А.Ю., Скокова А.В., Скорых Л.Н., Каниболоцкая А.А., Криворучко О.Н. Использование микросателлитных локусов для генетической идентификации овец шерстного направления продуктивности в Ставропольском крае.....	2

Лейбова В.Б., Позовникова М.В. Вариативность морфометрических параметров тела у коз зааненской породы разных месяцев рождения и их связь с продуктивными и репродуктивными показателями.....	3
Мукий Ю.В., Костюнина О.В. Идентификация <i>LOF</i> -мутаций в популяции айрширского скота.....	1
Насамбаев Е.Г., Третьякова Р.Ф., Винс М.С., Амиршоев Ф.С. Оценка бычков на основе их собственной продуктивности как передовой подход к повышению производственных характеристик мясного скота	3
Позовникова М.В., Тулинова О.В., Васильева О.К., Щербаков Ю.С. Идентификация и анализ значимых локусов генома, ассоциированных с устойчивостью к маститу у айрширских коров методом GWAS.....	4
Романенкова О.С. Использование генов домашнего хозяйства в качестве эталонов при оценке уровня экспрессии у кур (обзор).....	3
Сафронова А.А. Формирование мясной продуктивности и качества мяса у герефордских бычков разных генотипов.....	2
Чеченихина О.С., Менщиков Н.Н., Степанов А.В., Смирнова Е.С., Синько В.Н., Шиловцев А.В. Влияние линейной принадлежности на показатели молочной продуктивности коров голштинской породы различных уровней стрессустойчивости.....	4
Шевелёва О.М., Бахарев А.А., Терещенко И.Я. Экстерьерные особенности крупного рогатого скота абердин-ангусской породы в условиях Северного Зауралья.....	2

Технология производства, качество продукции и экономика в животноводстве

Баркова А.С., Зель Е.А., Верхотуров В.В., Шурманова Е.И. Прогноз пантовой продуктивности европейского благородного оленя в условиях Калининградской области.....	1
Боголюбова Н.В., Колесник Н.С., Лахонин П.Д., Елаткин Н.П., Николаев А.А. Взаимосвязь некоторых показателей состава и качества мяса бычков абердин-ангусской породы.....	4
Винс М.С., Третьякова Р.Ф., Каюмов Ф.Г. Эффективность разведения калмыцкого скота в Кабардино-Балкарии: анализ и перспективы.....	2
Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Карпенко Е.В., Мосолова Д.А., Шахбазова О.П., Раджабов Р.Г. Эффективность скрещивания коров симментальской породы с быками мясных пород.....	2
Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Мосолова Н.И., Кудряшова О.В., Ткаченко Н.А., Пузанкова В.А. Влияние новой кормовой добавки КД-Биш на качество молочных продуктов.....	1
Горшков В.В., Щетинина Е.В. Возможность увеличения объёмов получения промышленного молока за счёт изменения молочной продуктивности коров при внутрилинейном подборе.....	3
Горшков В.В., Щетинина Е.М. Линейная принадлежность коров как базовый фактор формирования качества молока-сырья.....	3
Гульбет А.Э., Амерханов Х.А., Соловьева О.И. Качество молозива и молока коров разных пород при использовании пробиотика Зоонорм.....	2
Кувшинов В.Н., Дуборезов В.М., Цис Е.Ю. Продуктивность и качество молока при скармливании суспензии хлореллы высокопродуктивным коровам.....	1
Лебедев С.В., Бельков Г.И., Костюк Р.В., Герасимов Н.П. Производственный потенциал отрасли мясного скотоводства в России.....	4
Медетов Е.С. Интерьерные показатели коров голштино-фризской породы при сочетанном применении крезацина и половых гормонов.....	2
Терещенко В.А. Влияние комплексной минеральной добавки на качество яиц кур-несушек промышленного стада.....	1
Харламов А.В., Фролов А.Н., Ильин В.В. Влияние кормовых добавок, содержащих Zn и Se органической формы, на продуктивные и гематологические показатели бычков чёрно-пёстрой породы при заключительном откорме.....	3
Хохлов В.В., Поносков С.В., Ситников В.А. Влияние многоплодия овцематок романовской породы на рост, развитие и откормочные качества получаемого молодняка.....	2

Часовщикова М.А., Пунегова В.В. Биологические и хозяйственные особенности коров чёрно-пёстрой породы разного уровня продуктивности.....	2
Явнов М.В., Фролов А.Н., Соболева Н.В. Влияние различных способов доращивания на интенсивность роста, убойные качества и экономическую эффективность выращивания бычков казахской белоголовой породы.....	3

Теория и практика кормления

Гойлян Д.В., Кристина Р.Т., Дома А.О., Думитреску Е., Фолеску М., Муселин Ф. Содержание микроэлементов в молоке дойных коров, получавших глицин-хелатные минеральные добавки.....	4
Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Folescu M, Muselin F. Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals.....	4
Головин А.В. Эффективность использования растительных белковых концентратов при оптимизации протеинового питания молочных коров.....	4
Довыденкова М.В., Колодина Е.Н., Никанова Д.А., Логвинова Т.И., Артемьева О.А. Эффективность использования каротинсинтезирующих дрожжей <i>Rhodotorula spp.</i> в кормлении сельскохозяйственных животных (обзор).....	2
Залюбовская Е.Ю., Мансурова М.С. Эффективность применения кормовых добавок в кормлении сельскохозяйственной птицы (обзор).....	3
Мусабаева Л.Л., Сизова Е.А., Нечитайло К.С. Сравнительная оценка влияния кормовой добавки Silaccess на основе льняного жмыха и цеолита на переваримость и морфологические показатели крови цыплят-бройлеров.....	1
Нуржанов Б.С., Логачев К.Г., Дускаев Г.К. Эффективность комбикормов с скорректированной минеральной питательностью по различным нормативам NRC и NASEM на молочную продуктивность коров.....	4
Остренко К.С., Луговой М.М., Некрасов Р.В. Сравнительная оценка влияния холина хлорида и жидкого бетаина на интенсивность роста, биохимические и экономические показатели у телят молочного периода.....	4
Петруша Ю.К. Влияние фитобиотиков в составе рациона на зоотехнические и биохимические показатели цыплят-бройлеров.....	4
Сенченко М.А., Горнич Е.А., Ткачева И.С., Чугреев М.К., Мельникова Л.Э. Разработка полнорационного комбикорма с заданными свойствами для зайцеобразных на основе апипродукции и его апробация.....	4
Сложенкина М.И., Горлов И.Ф., Антипова Т.А., Кудряшова О.В., Воронцова Е.С., Брехова С.А., Дурдыев А.К., Сложенкина А.А. Влияние новой пребиотической кормовой добавки на основе крахмального полисахарида на молочную продуктивность и качественные показатели получаемой продукции.....	4
Ширнина Н.М., Кононец В.В. Кавитированные концентраты, как стимулирующий фактор продуктивности дойных коров.....	4

Физиология животных

Гулюкин А.М., Завьялова Е.А., Дрошнев А.Е. Ветеринарное благополучие аквакультуры – важный механизм сохранности поголовья и увеличения продуктивности отрасли.....	3
Иньшин О.В., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е. Биологическое действие активированного угля в качестве кормовой добавки на организм радужной форели.....	1
Иолчиев Б.С., Шмидт А.В., Луконина О.Н., Мороз Т.А., Машталер Д.В., Комбарова Н.А., Ушакова С.Н., Приданова И.Е. Дисперсия хроматина сперматозоидов быков-производителей в зависимости от возраста.....	4
Логвинова Т.И. Изучение антибиотикорезистентности выделенных штаммов пропионовых кислотных бактерий.....	3

Мингазова М.С., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е., Килякова Ю.В. Общее понимание кворум сенсинга бактерий и применение ингибиторов кворума в аквакультуре (обзор).....	1
Рязанов В.А., Колпаков В.И., Тарасова Е.И., Ручай А.Н. Кишечный микробиом и функциональный прогноз метаболических путей, связанных с накоплением жировой и мышечной ткани у мясного скота.....	4
Сингина Г.Н., Чинаров Р.Ю., Шедова Е.Н., Луканина В.А., Жукова А.С. Результаты выделения ооцитов и получения IVP эмбрионов у тёлочек истобенской породы в зависимости от режима проведения ОРУ.....	4
Шошин Д.Е., Ерофеев Н.Г., Сизова Е.А., Павлова М.Ю. Стресс как лимитирующий фактор в животноводстве (обзор).....	3
Яушева Е.В., Сизова Е.А. Таксономическое разнообразие микробиоты толстого кишечника коров при различном уровне эссенциальных элементов в организме животных.....	4

Кормопроизводство и корма

Камова А.И., Степанова Т.В., Орлова А.Г. Продуктивность люцерны изменчивой в зависимости от инокуляции <i>Sinorhizobium meliloti</i> в условиях Республики Карелия.....	4
Сечнев Ю.А., Шейда Е.В., Кван О.В., Сизенцов Я.А. Характер ферментации питательных веществ ячменя при использовании экзоферментов.....	2
Шаабан М. Гидролизированные белки: доступность, биоактивность, безопасность, применение при производстве кормов (обзор).....	4

Общее земледелие и растениеводство

Бакиров Ф.Г., Берлишев Н.Д., Васильев И.В., Васильева Т.Н. Изменение плотности чернозёма южного под влиянием приёмов и систем обработки почвы.....	2
Бесалиев И.Н., Мироненко С.И. Урожайность и качество зерна яровой твёрдой пшеницы в условиях Оренбургского Предуралья.....	4
Камалеев Р.Д., Новикова А.А. Об эффективности оценки селекционного материала проса посевного на основе рекомбинационной способности.....	3
Подласова Е.Ю., Новикова А.А. Анализ содержания хлорофилла в листьях ярового ячменя с использованием гиперспектральной визуализации и спектрофотометрии.....	4
Скороходов В.Ю., Кафтан Ю.В., Максютлов Н.А., Зенкова Н.А., Скороходова Е.Н. Урожайность зерновых культур в богарных условиях степной зоны Южного Урала.....	1

Юбилейные даты

Горлов Иван Фёдорович	1
Лебедев Святослав Валерьевич	1
Насамбаев Едиге Гапуевич	1
Нотова Светлана Викторовна	2
Хайнацкий Валерий Юрьевич	1

Памяти Левахина Георгия Ивановича	3
Памяти Тишкова Николая Ивановича	4

100 years since the birth of S.G. Leushin.....	2

Nanotechnology in animal husbandry and fodder production

Gvozdikova AM, Polivanova OB, Fedorova DG. Features of the effect of biosynthesized nanopowders on callus cultures <i>in vitro</i>	1
Kamirova AM, Sizova EA, Ivanishcheva AP, Shoshin DE, Yausheva EV. The organic mineral complex based on ultrafine silicon-containing particles as a microbiome modulator of gastrointestinal tract of cattle.....	2
Miroshnikova EP, Arinzhanova MS, Arinzhanov AE, Miroshnikov SA. Use of SiO ₂ nanoparticles preparation in carp feeding.....	4
Shoshin DE, Sizova EA, Kamirova AM, Ivanishcheva AP. Ultrafine particles of Co ₃ O ₄ and Mn ₂ O ₃ as effectors of rumen digestion <i>in vitro</i>	1

Bioelementology in animal husbandry and crop production

Frolov AN, Zavyalov OA. The influence of season on the elemental status and productive qualities of bulls.....	4
Inshin OV, Miroshnikova EP, Arinzhanov AE, Miroshnikov SA. Effect of activated carbon on the elemental status of muscle tissue in rainbow trout.....	2
Shoshina OV. Assessment of the elemental and biochemical composition of blood serum after inclusion of chromium picolinate in Kazakh White-Headed bulls' diet.....	1
Tarasova EI, Polyakova VS, Sizova EA. Association of DGAT1 gene polymorphism with the elemental composition of biosubstrates and productivity of black-and-white cows in the Leningrad, Vologda, and Orenburg Regions.....	3

Breeding, selection, genetics

Bardukov NV, Nikipelova AK, Otradnov PI, Nikipelov VI, Belous AA. Determining the reliability of the origin of Siberian sturgeon based on the results of microsatellite analysis and genetic similarity coefficients.....	4
Chechenikhina OS, Menshchikov NN, Stepanov AV, Smirnova ES, Sinko VN, Shilovtsev AV. The influence of line on indicators of dairy productivity of the Holstein cows with various levels of stress resistance.....	4
Dodokhov VV. Microsatellite DNA polymorphism in Evenskaya reindeer.....	3
Dunin IM, Gerasimov AA, Nikitina SV, Matveeva EA. Estimation of breeding values of Aberdeen-Angus cattle in the Russian Federation according to the methodology of the Eurasian Economic Union.....	3
Elemesov BK, Yavnova MS, Dzhulamanov KM. Weight and linear growth of Hereford cattle of different exterior types.....	2
Gerasimov NP, Sangakov AK. Dynamics of weight growth in young Kazakh White-Headed breed with different levels of somatotrophic axis gene expression.....	1
Kamaldinov EV, Petrov AF, Narozhnykh KN, Palchikov PN. Assessment of the quality of genealogical data in breeding enterprises of Western Siberia.....	4
Konovalova EN, Evstafeva LV, Safonova SS, Romanenkova OS, Gladyr EA. Chemical composition and histological structure of the longest muscle of the back of Aberdeen-Angus cattle depending on genotype.....	4
Konovalova EN, Romanenkova OS, Gladyr EA. The analysis of the Russian beef cattle population on polymorphism of CAPN1 gene.....	1
Krivoruchko AYU, Skokova AV, Skorykh LN, Kanibolotskaya AA, Krivoruchko ON. The use of microsatellite loci for genetic identification of wool sheep in the Stavropol Territory.....	2

Leibova VB, Pozovnikova MV. Variability of body morphometric parameters in Saanen goats of different birth months and their relationship with productive and reproductive indicators.....	3
Nasambayev EG, Tretiyakova RF, Vince MS, Amirshoev FS. Assessment of bulls according to their own performance as a best approach to improving the performance characteristics of beef cattle.....	3
Pozovnikova MV, Tulinova OV, Vasileva OK, Shcherbakov YuS. Identification and GWAS analysis of significant genomic loci associated with mastitis resistance in Ayrshire cows.....	4
Romanenkova OS. Using housekeeping genes as references in assessing expression levels in chickens (review).....	3
Safronova AA. The development of meat productivity and beef quality in Hereford bulls of various Genotypes.....	2
Sheveleva OM, Bakharev AA, Tereshchenko IYa. Exterior features of the Angus cattle in the conditions of the Northern Trans-Urals.....	2
Vetokh AN, Volkova NA, Larionova PV, Dzhagaev AYU, Abdelmanova AS, Zinovieva NA. Genome-wide association studies of meat color indicators in young F2 chickens resource population.....	4
Mukiy JV, Kostyunina OV. Identification of LOF-mutations in a population of Ayrshire cattle.....	1

Production technology, quality and economy in animal husbandry

Barkova AS, Zel EA, Verkhoturov VV, Shurmanova EI. Forecast of antler productivity of European red deer in the conditions of Kaliningrad region.....	1
Bogolyubova NV, Kolesnik NS, Lakhonin PD, Elatkin NP, Nikolaev AA. The relationship of some indicators of composition and quality of meat of the Angus bulls.....	4
Chasovshchikova MA, Punegova VV. Biological and economic characteristics of Black Spotted cows of different productivity levels.....	2
Gorlov IF, Slozhenkina MI, Karpenko EV, Mosolova DA, Shakhbazova OP, Radzhabov RG. The effectiveness of crossing Simmental cows and beef bulls.....	2
Gorlov IF, Slozhenkina MI, Mosolova NI, Kudryashova OV, Tkachenkova NA, Puzankova VA. The influence of the new feed additive KD-Bish on the quality of dairy products1	
Gorshkov VV, Shchetinina EM. Line of cows as a basic factor in the formation of raw milk quality.....	3
Gorshkov VV, Shchetinina EV. Possible increase of volumes of industrial milk production due to changes in milk productivity of cows in the course of intra-line selection.....	3
Gulbet AE, Amerkhanov KhA, Soloveva OI. Quality of colostrum and milk from cows of different breeds when using Zoonorm probiotic.....	2
Kharlamov AV, Frolov AN, Ilyin VV. The influence of feed additives containing organic Zn and Se on productive and hematological parameters of Black Spotted bulls on final fattening.....	3
Khokhlov VV, Ponosov SV, Sitnikov VA. The influence of the multiplicity of Romanov sheep on growth, development and fattening qualities of the resulting young stock.....	2
Kuvshinov VN, Duborezov VM, Tsis EYu. Productivity and milk quality after feeding high-yielding cows with chlorella suspension.....	1
Lebedev SV, Belkov GI, Kostyuk RV, Gerasimov NP. Production potential of the beef cattle breeding industry in Russia.....	4
Medetov ES. Interior parameters of the Holstein-Friesian cows with the combined use of krezacin and sex hormones.....	2
Tereshchenko VA. The influence of a complex mineral additive on the quality of eggs of commercial laying hens.....	1
Vince MS, Tretiyakova RF, Kayumov FG. Efficiency of production of Kalmyk cattle in Kabardino-Balkaria: analysis and prospects.....	2
Yavnov MV, Frolov AN, Soboleva NV. Influence of different rearing methods on growth rate, slaughter qualities and economic efficiency of growing Kazakh white-headed bulls.....	3

Theory and practice of feeding

Dovydenkova MV, Kolodina EN, Nikanova DA, Logvinova TI, Artemyeva OA. Efficiency of using carotene-synthesizing yeast <i>Rhodotorula</i> spp. in the feeding of farm animals (review).....	2
Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Folescu M, Muselin F. Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals.....	4
Goilean GV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Folescu M, Muselin F. Milk trace minerals content in dairy cows supplemented with glycine chelated minerals (in Russ.).....	4
Golovin AV. Efficiency of plant protein concentrates in optimizing protein nutrition of dairy cows.....	4
Musabaeva LL, Sizova EA, Nechitailo KS. Comparative assessment of the effect of the feed additive Silaccess based on flaxseed cake and zeolite on digestibility and morphological parameters of broiler chickens.....	1
Nurzhanov BS, Logachev KG, Duskaev GK. Efficiency of compound feeds with adjusted mineral nutrition according to various NRC and NASEM standards on milk productivity of cows.....	4
Ostrenko KS, Lugovoy MM, Nekrasov RV. Comparative assessment of the effect of choline chloride and liquid betaine on growth intensity, biochemical and economic indicators in calves in milking period.....	4
Petrusha YK. The effect of phytobiotics in the diet on the zootechnical and biochemical parameters of broiler chickens.....	4
Senchenko MA, Gornich EA, Tkacheva IS, Chugreev NK, Melnikova LE. Development and approbation of a full-ration apicultural products based concentrated feed for the lagomorphs.....	4
Shirnina NM, Kononets VV. Cavitated concentrates as a stimulating factor for the productivity of dairy cows.....	4
Slozhenkina MI, Gorlov IF, Antipova TA, Kudryashova OV, Vorontsova ES, Brekhova SA, Durdyev AK, Slozhenkina AA. Effect of a new prebiotic feed additive based on starch polysaccharide on dairy productivity and quality parameters of the obtained products.....	4
Zalyubovskaya EY, Mansurova MS. Efficiency of using plant feed additives in feeding poultry (review).....	3

Physiology of animals

Gulukin AM, Zavyalova EA, Droshnev AE. Veterinary welfare in aquaculture is an important mechanism for protecting fish and increasing the productivity of the industry.....	3
Inshin OV, Miroshnikova EP, Arinzhanov AE. Biological effect of activated carbon as a feed additive on the organism of rainbow trout.....	1
Iolchiev BS, Schmidt AV, Lukonina ON, Moroz TA, Mashtaler DV, Kombarova NA, Ushakova SN, Pridanova IE. Chromatin dispersion of spermatozoa of stud bulls depending on age.....	4
Logvinova TI. Study of antibiotic resistance of isolated strains of propionic acid bacteria.....	3
Mingazova MS, Miroshnikova EP, Arinzhanov AE, Kilyakova YuV. General understanding of bacterial quorum sensing and use of quorum inhibitors in aquaculture (review).....	1
Ryazanov VA, Kolpakov VI, Tarasova EI, Ruchay AN. Gut microbiome and functional prediction of metabolic pathways associated with fat and muscle tissue accumulation in beef cattle.....	4
Shoshin DE, Erofeev NG, Sizova EA, Pavlova MYu. Stress as a limiting factor in animal husbandry (review).....	3
Singina GN, Chinarov RYu, Shedova EN, Lukanina VA, Zhukova AS. Results of oocyte isolation and obtaining IVP embryos from heifers of Istoben breed depending on OPU regimen.....	4
Yausheva EV, Sizova EA. Taxonomic diversity of the large intestine microbiota of cows with different levels of essential elements in the body.....	4

Fodder production and fodders

Sechnev YuA, Sheida EV, Kvan OV, Sizentsov YaA. The nature of barley nutrients fermentation using exoenzymes.....	2
Kamova AI, Stepanova TV, Orlova AG. Productivity of alfalfa depending on inoculation of <i>Sinorhizobium meliloti</i> in conditions of the Republic of Karelia.....	4
Shaaban M. Hydrolyzed proteins: availability, bioactivity, safety, applications in feed production (review).....	4

Geoponics and crop production

Bakirov FG, Berlishev ND, Vasiliev IV, Vasilyeva TN. Changes in the density of southern black soil under the influence of soil cultivation techniques and systems.....	2
Besaliev IN, Mironenko SI. Yield and grain quality of spring durum wheat in the conditions of the Orenburg Cis-Urals.....	4
Kamaleev RD, Novikova AA. On the efficiency of evaluation of seed millet breeding material based on recombination ability.....	3
Podlasova EYu, Novikova AA. Analysis of chlorophyll content in spring barley leaves using hyperspectral imaging and spectrophotometry.....	4
Skorokhodov YuV, Kaftan YuV, Maksyutov NA, Zenkova NA, Skorokhodova EN. Grain crop yields under rain-fed conditions in the steppe zone of the Southern Urals.....	1

Anniversaries

Gorlov Ivan Fedorovich	1
Khainatsky Valery Yurievich	1
Lebedev Svyatoslav Valerievich	1
Nasambaev Edige Gapuevich	1
Notova Svetlana Viktorovna	2
In memory Levakhin Georgy Ivanovich	3
In memory Tishkov Nikolai Ivanovich	4

Требования к статьям

В теоретическом и научно-практическом журнале «Животноводство и кормопроизводство» публикуются результаты научных исследований и их внедрения в сфере АПК.

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, доктора наук» по отраслям наук и группам специальностей: 4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки), 4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства (сельскохозяйственные и биологические науки), 4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных (сельскохозяйственные и биологические науки). **Отнесён к категории К 1.**

Журнал «Животноводство и кормопроизводство» включён в Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал «Животноводство и кормопроизводство» включён в систему Российского индекса цитирования.

Периодичность выхода журнала «Животноводство и кормопроизводство» – 4 раза в год.

Стоимость публикации одной статьи – 12000 рублей. Оплата подписки осуществляется через банки РФ. Для стран СНГ – 15000 руб., оплата – через любые банки РФ в валюте РФ.

Электронные полнотекстовые версии журнала размещаются на сайте журнала <http://gk.fncbst.ru/> и РУНЭБ <http://www.elibrary.ru>.

При подготовке статей в журнал рекомендуем руководствоваться следующими правилами:

- Статья должна содержать результаты научных исследований, теоретические, практические (инновационные) разработки и соответствовать основным научным направлениям журнала. **Оформление статьи – по ГОСТ 7.0.7-2021.** Оригинальность статьи должна составлять не менее 80 %.

- Авторы должны делать ссылки на ORCID, указывая адреса электронной почты для обратной связи.

- Материалы представляются в электронном виде в редакторе Word. Объём статьи – не менее 6 страниц, с полями 2 см, шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал – одинарный.

- Статья должна быть структурирована: выделены полужирным шрифтом разделы «Введение», «Цель исследования», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов», «Заключение».

«Материалы и методы исследования» должны включать по абзацам:

Объект исследования.

Характеристика территорий, природно-климатические условия (как правило, для земледелия и растениеводства).

Схема эксперимента.

Оборудование и технические средства.

Статистическая обработка.

- **На русском и английском языках:** заглавие статьи – строчными жирными буквами; затем через интервал – имя, отчество и фамилия авторов полностью; название учреждения, где работают авторы; адреса электронной почты и ORCID каждого автора; название учреждения, где работают авторы; через интервал перед текстом статьи размещаются: аннотация – не более 150-200 слов, ключевые слова – не более 10; через интервал – текст статьи на русском языке с таблицами и рисунками. Название и содержимое рисунков и таблиц приводятся полностью **на русском и английском языках.**

- К научной статье определяется её индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

- Графический материал (диаграммы, рисунки и т. д.) должен быть представлен в форме, обеспечивающей

ясность передачи всех деталей, контрастным, выполненным на компьютере и позволять дальнейшее редактирование в программах «Microsoft Word» или «Microsoft Excel». Графический материал публикуется только в чёрно-белом варианте, но авторами в электронном виде предоставляется в цветном. Название и содержимое рисунков приводятся полностью **на русском и английском языках.**

Литература размещается в конце статьи в виде общего списка, который должен содержать лишь те источники, на которые имеется ссылка в статье. Источники должны быть из изданий с высоким импакт-фактором, не старше 5-7 лет с момента публикации. Не использовать в качестве источников учебники, учебные и справочные пособия, диссертации и авторефераты диссертаций.

Список источников должен включать не менее 15 наименований. Самоцитирование не должно превышать 20 % от общего числа источников. В списке литературы 90 % должны быть статьи с DOI.

Ссылка на источник в тексте ставится в круглых скобках с указанием фамилии, инициалов автора и года публикации (Иванов И.И., 2011). При упоминании нескольких публикаций одного автора за один год используется буквенный маркер (Иванов И.И., 2011а; 2011б; 2011в). При цитировании ссылки, имеющих двух авторов, указываются оба автора (Иванов И.И. и Петров В.В., 2011). При цитировании ссылки, имеющей более двух авторов, указываются фамилия и инициалы первого автора и ставится пометка «и др.» (Иванов И.И. и др., 2011; английский вариант: Ivanov IM et al., 2011).

Описание русскоязычных источников должно быть оформлено в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 (см. раздел «Затекстовая библиографическая ссылка»). Согласно стилю Ванкувер, принятому в журнале, после каждого описания русского источника должна быть его транслитерация.

Описание англоязычных источников следует составлять в формате Vancouver Style.

Список начинается с русскоязычной литературы в алфавитном порядке, его продолжает список англоязычных авторов с соблюдением алфавитного порядка. Дополнительно этот же список источников приводится на английском языке в References, нумерация записей должна совпадать с нумерацией в русскоязычном списке источников.

В конце статьи **на русском и английских языках** должны быть указаны сведения об авторах: имя, отчество, фамилия полностью, учёная степень, учёное звание, занимаемая должность и место работы с адресными данными, контактными телефонами.

Пример оформления статьи:

<http://gk.fncbst.ru/archive.html>

Статья, поступившая в редакцию, проверяется через программу «Антиплагиат» и проходит через институт рецензирования в соответствии с Положением об институте рецензирования теоретического и научно-практического журнала «Животноводство и кормопроизводство». Отрицательная рецензия является основанием для отказа в публикации статьи.

Рукопись статьи, подготовленная к публикации, должна быть подписана лично автором. Автор несёт юридическую ответственность за содержание статьи, точность приводимых в рукописи цитат, статистических данных, фактов.

Статьи, оформление которых не соответствует изложенным выше требованиям, редколлегией не рассматриваются и возврату не подлежат.

Адрес редакции: 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29
ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН, тел. 8(3532)30-81-76
e-mail: ntip_vniims@rambler.ru
сайт журнала: <http://gk.fncbst.ru/>