

Номер 8

ISSN 0002-1881

Август 2023



# АГРОХИМИЯ

[www.sciencejournals.ru](http://www.sciencejournals.ru)



# СОДЕРЖАНИЕ

---

Номер 8, 2023

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

Динамика содержания и распределения микроэлементов  
в дерново-подзолистых почвах и растениях агроценозов

*А. А. Уткин, Н. И. Аканова, И. Б. Нода*

3

### Удобрения

Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений  
на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность  
многолетних трав в кормовом севообороте Европейского Севера

*Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова*

16

Аминокислотный состав и биологическая ценность клубней орошаемого картофеля  
на каштановой почве при внесении возрастающих доз серных удобрений  
на фоне применения NPK

*М. Г. Меркушева, Л. Л. Убугунов, Л. Н. Болонева, И. Н. Лаврентьева*

23

Эффективность применения удобрений с микроэлементами в посевах ярового ячменя  
в условиях Курской области

*Ж. Н. Минченко, В. И. Лазарев*

29

### Регуляторы роста растений

Эффективность использования комплексного биопрепарата на посевах озимой пшеницы  
в полевых условиях республики Мордовия

*А. С. Пронин, Т. С. Колмыкова, А. С. Лукаткин*

38

### Пестициды

Особенности развития технологий защиты растений в агроэкосистемах  
в условиях рыночной экономики России

*В. А. Захаренко*

45

### Агроэкология

Режим влажности чернозема выщелоченного, урожайность и качество  
корнеплодов сахарной свеклы при разных погодных и агротехнических условиях в ЦЧР

*О. К. Боронтов, П. А. Косякин, Е. Н. Манаенкова*

58

Микробиоценоз почв криоморфозов юга Витимского плоскогорья

*Э. О. Чимитдоржиева, Ц. Д.-Ц. Корсунова, Г. Д. Чимитдоржиева*

68

### Экотоксикология

Анализ связи изоэнзимного полиморфизма ярового двурядного ячменя (*Hordeum vulgare* L.)  
с его сортовой устойчивостью к воздействию кадмия

*А. В. Дикарев, В. Г. Дикарев, Н. С. Дикарева*

75

Распределение редкоземельных элементов в профиле аллювиальной луговой почвы  
залива Куркуты оз. Байкал

*О. В. Зарубина*

88

---

# Contents

---

No. 8, 2023

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

Dynamics of the Content and Distribution of Trace Elements in Sod-Podzolic Soils and Plants of Agroecosystems

*A. A. Utkin, N. I. Akanova, I. B. Noda*

3

### Fertilizers

The Effect of Long-Term Use of Organic and Mineral Fertilizers on the Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and The Productivity of Perennial Grasses in Forage Culture in The European North

*N. T. Chebotarev, O. V. Brovarova*

16

Amino Acid Composition and Biological Value of Irrigated Potato Tubers on Chestnut Soil at Increasing Doses of Sulfur Fertilizers (with NPK)

*M. G. Merkusheva, L. L. Ubugunov, L. N. Boloneva, I. N. Lavrentieva*

23

Effectiveness of the Use of Fertilizers with Trace Elements on Spring Barley Crops in the Conditions of the Kursk Region

*Zh. N. Minchenko, V. I. Lazarev*

29

### Plant Growth Regulators

Efficiency of Complex Biopreparation Use on Winter Wheat Crops in Mordovia

*A. S. Pronin, T. S. Kolmykova, A. S. Lukatkin*

38

### Pesticides

Features of the Development of Plant Protection Technologies in Agroecosystems in the Conditions of the Russian Market Economy

*V. A. Zakharenko*

45

### Agroecology

Moisture Regime of Leached Chernozem, the Yield and Quality of Sugar Beet Root Crops under Different Weather and Agrotechnical Conditions in the Central Chernozem Region

*O. K. Borontov, P. A. Kosyakin, E. N. Manaenkova*

58

Microbiocenosis of cryofrost soils in the south of the Vitim Plateau

*E. O. Chimitdorzhieva, Ts. D-Ts. Korsunova, G. D. Chimitdorzhieva*

68

### Ecotoxicology

Analysis of the Spring Barley (*Hordeum vulgare* L.) Isoenzyme Polymorphism Connection with Its Tolerance to the Cadmium Influence

*A. V. Dikarev, V. G. Dikarev, N. S. Dikareva*

75

Distribution of Rare-Earth Elements in the Profile of Alluvial Meadow Soil in Kurkuty Bay oz. Baikal

*O. V. Zarubina*

88

---

УДК 631.416.3:631.445.24

## ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ АГРОЦЕНОЗОВ

© 2023 г. А. А. Уткин<sup>1,\*</sup>, Н. И. Аканова<sup>2</sup>, И. Б. Нода<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российский 127434 аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева  
153012 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

<sup>3</sup>Станция агрохимической службы “Ивановская”  
153506 Ивановская обл., с. Богородское, ул. Центральная, 8, Россия

\*E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

В работе представлены результаты обследования дерново-подзолистых почв сельскохозяйственного назначения и растений реперных участков Ивановской обл. на содержание в них бора, меди, кобальта, марганца и цинка, проведенного в 2014 и 2021 гг. Корреляционным анализом определено влияние отдельных физико-химических свойств почв на содержание и распределение доступных форм микроэлементов в почве и взаимосвязи между самими микроэлементами. Установлены изменения обеспеченности микроэлементами почв участков. По величине содержания доступных форм микроэлементов в почвах определена потребность в применении микроудобрений. Определены последовательности культур по содержанию микроэлементов в зерне и соломе злаков, зеленой массе кормовых трав, а также распределению микроэлементов между частями выращенного урожая. Произведена оценка зерна, соломы и зеленой массы на соответствие ветеринарным нормативам, предъявляемым к содержанию в кормах меди, цинка и кобальта. Рассчитаны коэффициенты накопления микроэлементов растительной продукцией культур и проведен их сравнительный анализ. По величине и знаку коэффициентов корреляции между концентрациями микроэлементов в растениях определили проявление антагонизма и синергизма между микроэлементами. Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена между содержанием подвижных форм микроэлементов в почве и их содержанием в растительной продукции, а также между содержанием микроэлементов в зерне и соломе злаков позволили выявить их силу и неоднозначный характер взаимосвязей.

**Ключевые слова:** микроэлементы, дерново-подзолистая почва, растения, агроценозы, реперные участки, Ивановская обл.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080100, **EDN:** ZEKAXB

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в отечественной и зарубежной агрономической науке большое внимание уделяется исследованию содержания, трансформации и подвижности форм микроэлементов (МЭ) в почве и их роли в жизни культурных растений. Это связано с тем, что МЭ, наряду с кислотностью почвы, содержанием гумуса и основных элементов питания, являются одним из основных показателей почвенного плодородия [1–3].

В условиях интенсификации земледелия и повышения уровня химизации стало необходимым изучение микроэлементного состава почв, выявление роли МЭ с целью разработки научно обоснованной системы применения микроудобрений

с учетом региональных почвенно-климатических особенностей, особенно на фоне распространения деградации пахотных почв и земель России [1–5].

Принято считать, что к МЭ относят химические элементы, обязательные для растительных организмов, содержание которых измеряется от 0.001 до 0.00001% [6]. Они играют ведущую роль в обмене веществ, росте и развитии растений. Избыточное или недостаточное содержание того или иного МЭ приводит к нарушению сбалансированного поступления в растения других элементов питания, снижению или увеличению их усвояемости из-за нарушения соотношения в

почве, появления хлорозов и некрозов, снижения величины урожая и ухудшения его качества [3].

С практической точки зрения наибольший интерес представляют подвижные формы МЭ в почвах, как наиболее доступные для растений. Почва служит основным источником МЭ для культурных растений, поэтому изучение содержания и поведения форм МЭ в почвах — важное и актуальное направление современной агрохимии.

Оценка текущего уровня плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. по содержанию доступных форм МЭ и их связи с отдельными физико-химическими свойствами почвы, доступности МЭ для растений, в научной литературе освещены недостаточно и требуют дополнительного изучения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

Объект исследования — дерново-подзолистые почвы, доля которых в пахотных землях Ивановской обл. составляет 92% [7].

Цель работы — оценить влияние отдельных физико-химических показателей плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. на содержание и поведение подвижных форм МЭ: меди (Cu), цинка (Zn), кобальта (Co), марганца (Mn) и бора (B) в почве, установить параметры накопления МЭ растительной продукцией различных культур и взаимосвязь между содержанием МЭ в почве и растениях.

Особое внимание к изученным элементам вызвано тем, что все они относятся к основным МЭ, играющим важную роль в росте и развитии многих сельскохозяйственных культур.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Агрохимическое обследование почв реперных участков и растений на содержание B, Cu, Co, Mn и Zn проводили в 2014 и 2021 гг. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на 11-ти реперных участках, занятых дерново-подзолистыми почвами, расположенных в отдельных районах Ивановской обл., путем отбора образцов растений и почв из пахотного горизонта (0–20 см) для анализа.

Общая площадь дерново-подзолистых почв реперных участков — 207.7 га. Реперные участки располагались на пахотных землях и кормовых естественных угодьях. Преобладающая растительность участков — культурные растения: овес посевной (*Avena sativa* L.), клевер розовый (*Trifolium hybridum* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.),

ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) и злаковое разнотравье, преимущественно в виде полевицы собачьей (*Agrostis canina* L.), мятлика лугового (*Poa pratensis* L.) и щучки дернистой (*Deschampsia cespitosa* L.).

На отдельном реперном участке в зависимости от его площади с помощью тростьевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец массой ~0.5 кг составляли из 25–30-ти точечных проб и в среднем отбирали с каждых 6–7 га площади реперного участка. Смешанную пробу растений массой ~0.5 кг натуральной влажности составляли из 8–10-ти точечных проб.

Пробы почв и растений отбирали на одних и тех же локациях реперных участков. Отобранные образцы почв и растений высушивали до воздушно-сухого состояния, а затем измельчали на мельнице.

Анализы почв и растений были выполнены по принятым в агрохимической практике методикам: обменная кислотность ( $pH_{KCl}$ ) — ГОСТ Р 58594-2019, органическое вещество ( $C_{org}$ ) — ГОСТ 26213-91 (по Тюрину в модификации ЦИНАО), сумма поглощенных оснований ( $S$ ) — ГОСТ 27821-88 (по Каппену), фракции физической глины и ила (по Качинскому) — по [8], содержание подвижного B — ГОСТ Р 50688-94 (по Бергеру и Труogu в модификации ЦИНАО), обменного Mn — ГОСТ 26486-85 (по ЦИНАО), подвижного Co — ГОСТ 50687-94 (по Пейве–Ринькису), подвижной Cu — ГОСТ 50684-94 (по Пейве–Ринькису в модификации ЦИНАО), подвижного Zn — ГОСТ Р 50686–94 (по Крупскому–Александровой в модификации ЦИНАО), содержание Cu и Zn в растениях — ГОСТ 27995-88 и ГОСТ 27996-88 соответственно, B и Co в растениях — ОСТ 10.154-88 и ОСТ 10.155-88 соответственно, Mn в растениях — ГОСТ 27997-88.

Для оценки накопления МЭ растениями из почвы рассчитывали коэффициент накопления ( $K_n$ ), равный отношению содержания МЭ в растениях (мг/кг) к содержанию подвижной формы МЭ в почве (мг/кг).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка ( $p > 0.05$ ). Средние величины изученных показателей в исследованных образцах при нормальном распределении сравнивали между собой с помощью 2-х выборочного  $t$ -критерия Стьюдента для зависимых переменных ( $p < 0.05$ ), при ненормальном — критерия Вилкоксона ( $p < 0.05$ ). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении

Таблица 1. Физико-химические свойства пахотного слоя дерново-подзолистых почв реперных участков

| Реперный участок, №* | Число смешанных образцов, <i>n</i> | Район              | Фракция, %**  |                | $C_{\text{орг}}$ , %                             | $pH_{KCl}$ , ед.                                 | $S$ , мг-экв/100 г почвы                           |
|----------------------|------------------------------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                      |                                    |                    | <0.001 мм     | <0.01 мм       |                                                  |                                                  |                                                    |
| 1                    | 2                                  | Ивановский         | 4.8           | 18.3           | <u>2.1</u><br>2.0                                | <u>5.2</u><br>5.8                                | <u>11.8</u><br>10.8                                |
| 6                    | 2                                  | Пучежский          | 2.0           | 9.3            | <u>2.1</u><br>1.7                                | <u>5.6</u><br>6.3                                | <u>10.7</u><br>9.1                                 |
| 8                    | 3                                  | Верхнеландеховский | 3.5           | 16.0           | <u>1.9</u><br>1.6                                | <u>5.0</u><br>5.5                                | <u>12.5</u><br>8.2                                 |
| 9                    | 4                                  | Вичугский          | 3.0           | 14.1           | <u>2.3</u><br>2.1                                | <u>6.1</u><br>6.2                                | <u>27.9</u><br>27.6                                |
| 11                   | 2                                  | Кинешемский        | 5.5           | 25.0           | <u>2.4</u><br>2.2                                | <u>5.5</u><br>5.9                                | <u>16.0</u><br>16.2                                |
| 12                   | 5                                  | Комсомольский      | 5.7           | 20.0           | <u>2.1</u><br>2.1                                | <u>6.2</u><br>6.2                                | <u>17.0</u><br>20.7                                |
| 14                   | 3                                  | Родниковский       | 5.2           | 31.0           | <u>1.8</u><br>2.0                                | <u>5.1</u><br>5.4                                | <u>12.2</u><br>11.8                                |
| 15                   | 4                                  | Тейковский         | 2.3           | 9.0            | <u>2.0</u><br>2.5                                | <u>6.5</u><br>6.2                                | <u>16.8</u><br>9.9                                 |
| 17                   | 4                                  | Палехский          | 3.3           | 16.3           | <u>2.2</u><br>3.0                                | <u>6.0</u><br>6.8                                | <u>12.5</u><br>19.4                                |
| 18                   | 4                                  | Шуйский            | 4.9           | 16.2           | <u>3.1</u><br>3.0                                | <u>5.7</u><br>5.7                                | <u>17.2</u><br>20.3                                |
| 21                   | 3                                  | Приволжский        | 5.1           | 19.9           | <u>2.8</u><br>2.6                                | <u>6.4</u><br>6.5                                | <u>38.6</u><br>30.8                                |
| $M \pm m$            |                                    |                    | $4.1 \pm 0.4$ | $17.7 \pm 1.9$ | <u><math>2.3 \pm 0.1</math></u><br>$2.3 \pm 0.1$ | <u><math>5.8 \pm 0.2</math></u><br>$6.0 \pm 0.1$ | <u><math>17.6 \pm 2.5</math></u><br>$16.8 \pm 2.3$ |

\*Нумерация реперных участков та же в табл. 2, 3.

\*\*Содержание фракции (%) определяли в момент закладки почвенного разреза.

Примечания. 1. Приведены средние арифметические величины:  $M$  – среднее арифметическое,  $m$  – ошибка среднего арифметического. То же в табл. 2, 3. 2. Над чертой – 2014 г., под чертой – 2021 г. То же в табл. 2, 3.

признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В своих работах Добровольский, Чернова и Бекецкая отмечали, что основными факторами, влияющими на накопление, распределение и миграцию МЭ в почвах, являются содержание органического вещества, реакция среды, гранулометрический и химический составы почвы [9, 10].

Исследованные физико-химические показатели дерново-подзолистых почв реперных участков, влияющие на особенности поведения в них изученных МЭ, представлены в табл. 1. Согласно

градации распределения глинистых частиц, почвы большинства участков имели супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав. Средние величины обеспеченности почв участков  $C_{\text{орг}}$  в 2014 и 2021 гг. соответствовали низкому уровню обеспеченности.

За период наблюдения средняя величина обменной кислотности почв участков снизилась на 0.2 ед. Величины сумм поглощенных оснований почв большинства участков соответствовали повышенным степеням обеспеченности. Средняя величина  $S$  почв участков за период наблюдения снизилась на 0.8 мг-экв/100 г почвы.

Варьирование всех физико-химических показателей дерново-подзолистых почв участков подчинялось закону нормального распределения. Величины критерия Шапиро–Уилка удовлетворяли условию:  $p > 0.05$ .

Сравнение физико-химических показателей почв по 2-м аналогичным зависимым выборкам 2014 и 2021 гг. показало, что существенно различались показатели  $pH_{KCl}$ , это подтверждено расчетом величин  $t$ -критерия Стьюдента ( $p < 0.05$ ).

Одним из критериев потребности растений в МЭ является их содержание в растениях. Обеспеченность растений МЭ устанавливают по содержанию их в почве. При этом учитывают не общее содержание МЭ в почве, а концентрацию подвижных форм, которые являются наиболее доступными для растений. Содержание Cu, Mn, Co и Zn в подвижной форме чаще всего составляет ~10–15% от их валового содержания в почве, В – 2–4% [1].

Одним из факторов, тесно связанным с плодородием почвы и влияющим на урожайность и качество растительной продукции, является обеспеченность почв доступными формами МЭ для питания растений [11]. Проанализируем данные по содержанию в дерново-подзолистых почвах реперных участков доступных форм МЭ (табл. 2).

**Бор.** Среднее содержание и пределы изменений содержания водорастворимых форм В в почвах участков на протяжении всего мониторинга согласовались с данными, приведенными в монографии Панашина для этих почв (0.43–1.7 мг/кг) [1].

Согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны водорастворимыми формами В [12], и исходя из изменений его содержания в почвах большинства реперных участков в 2014 и 2021 гг., его содержание преимущественно отвечало средней степени обеспеченности. В 2021 г. отмечали увеличение количества участков, имеющих высокую обеспеченность почв В.

Адсорбция В в определенной мере зависит от величины  $pH_{KCl}$  и содержания  $C_{орг}$  [6]. Отмечали, что наилучшей способностью к поглощению водорастворимого В обладают тонкодисперсные иллы и коллоидные частицы [13].

**Медь.** Пределы содержания подвижных форм Cu в почвах участков соответствовали пределам его содержания (1.0–5.4 мг Cu/кг почвы), указанным для дерново-подзолистой почвы в работе [11]. Обеспеченность почв участков подвижной Cu варьировала от низкой до средней на протяжении всего периода наблюдения. В целом, в 2014–2021 гг. средний уровень обеспеченности почв участков Cu соответствовал средней степени [12].

Подвижная Cu может вступать во взаимодействие с органическим веществом почв (гуминовыми и фульвокислотами) и в обменные реакции с минеральными компонентами почв. Кроме того, повышение кислотности почвы увеличивает содержание подвижной Cu [13]. За период с 2014

по 2021 г. содержание В в изученных почвах увеличилось на 25.9, Cu – снизилось на 7.9%. Как показал расчет критерия Вилкоксона, отмеченные изменения не были достоверными.

**Кобальт.** Содержание подвижного Co в почвах участков согласовалось с пределами его содержания в дерново-подзолистых почвах (0.12–3.0 мг/кг), отмеченными в работе Пейве [13]. Варьирование содержания подвижного Co в почвах реперных участков в 2014 и 2021 гг. отмечено от низкой степени обеспеченности до средней, однако в 2014 г. большинство почв участков имели низкую обеспеченность МЭ, в 2021 г. – среднюю [12].

Распределение содержания Co в почве зависит от количества физической глины и илстых фракций, величин  $C_{орг}$ ,  $pH_{KCl}$  и оксидов железа [6]. Оценка содержания Co с помощью двухвыборочного  $t$ -критерия Стьюдента показала, что увеличение его присутствия в почвах на 63.4% было существенным.

В данном исследовании решили выявить взаимосвязи между доступными формами изученных МЭ и исследованными свойствами дерново-подзолистых почв, которые оценивали по величинам коэффициентов линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена. Показано, что в основном между величинами  $pH_{KCl}$ ,  $S$ ,  $C_{орг}$ , суммарным количеством илстых и глинистых частиц и содержанием подвижных форм В, Cu и Co установлены недостоверные, преимущественно прямые корреляционные взаимосвязи слабой и реже – средней силы, за исключением существенной корреляции между содержанием Co и  $S$  (табл. 2). Низкие коэффициенты корреляции между содержаниями подвижных форм изученных МЭ и количеством тонкодисперсных частиц в большинстве исследованных почв можно объяснить недостаточным количеством илстых частиц, которые принимают участие в адсорбции подвижных форм МЭ.

**Марганец.** Для дерново-подзолистых почв России характерно наличие наибольших количеств обменных форм Mn (50–150 мг/кг почвы) [6]. Среднее содержание обменного Mn в почвах участков в 2014–2021 гг., согласно градации обеспеченности почв России подвижными формами МЭ, соответствовало высокой степени обеспеченности (60–100 мг Mn/кг) [12].

В своей работе Битюцкий [6] отмечал, что концентрация Mn в почвах зависит от реакции среды и содержания гумуса. Зырин указывает на то, что значительная часть подвижного Mn почв сосредоточена в тонкодисперсных частицах и в связях с органическим веществом [14].

В нашем исследовании между содержанием обменного Mn,  $S$  и  $pH_{KCl}$  установлены слабые

Таблица 2. Содержание подвижных форм МЭ в почве, мг/кг

| Реперный участок, №                           | B                                                                      | Cu                                                                     | Co                                                                     | Mn                                                                   | Zn                                                                     |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1                                             | <u>0.43</u><br>0.72                                                    | <u>1.55</u><br>1.92                                                    | <u>0.89</u><br>2.01                                                    | <u>66.3</u><br>58.0                                                  | <u>1.78</u><br>1.15                                                    |
| 6                                             | <u>0.44</u><br>0.56                                                    | <u>2.25</u><br>2.01                                                    | <u>0.81</u><br>1.63                                                    | <u>60.0</u><br>73.0                                                  | <u>0.80</u><br>1.15                                                    |
| 8                                             | <u>0.53</u><br>0.52                                                    | <u>1.92</u><br>0.96                                                    | <u>0.62</u><br>0.79                                                    | <u>60.5</u><br>70.0                                                  | <u>1.00</u><br>0.83                                                    |
| 9                                             | <u>0.42</u><br>0.52                                                    | <u>3.42</u><br>2.58                                                    | <u>1.07</u><br>1.36                                                    | <u>73.2</u><br>80.0                                                  | <u>0.97</u><br>1.35                                                    |
| 11                                            | <u>0.56</u><br>0.66                                                    | <u>2.66</u><br>3.08                                                    | <u>1.01</u><br>1.55                                                    | <u>78.4</u><br>67.0                                                  | <u>1.04</u><br>1.56                                                    |
| 12                                            | <u>0.41</u><br>0.55                                                    | <u>1.58</u><br>1.10                                                    | <u>0.93</u><br>1.70                                                    | <u>51.3</u><br>71.0                                                  | <u>0.82</u><br>0.75                                                    |
| 14                                            | <u>0.47</u><br>0.74                                                    | <u>2.28</u><br>2.60                                                    | <u>0.95</u><br>1.69                                                    | <u>70.0</u><br>58.0                                                  | <u>0.77</u><br>0.94                                                    |
| 15                                            | <u>0.69</u><br>0.81                                                    | <u>1.84</u><br>1.85                                                    | <u>0.90</u><br>1.22                                                    | <u>65.1</u><br>65.0                                                  | <u>1.65</u><br>2.03                                                    |
| 17                                            | <u>0.43</u><br>0.35                                                    | <u>1.65</u><br>1.57                                                    | <u>0.80</u><br>1.34                                                    | <u>75.3</u><br>25.0                                                  | <u>1.40</u><br>1.54                                                    |
| 18                                            | <u>0.47</u><br>1.08                                                    | <u>1.79</u><br>2.22                                                    | <u>0.91</u><br>1.61                                                    | <u>70.1</u><br>61.0                                                  | <u>1.41</u><br>2.07                                                    |
| 21                                            | <u>1.12</u><br>0.92                                                    | <u>4.01</u><br>3.05                                                    | <u>1.30</u><br>1.84                                                    | <u>69.8</u><br>69.0                                                  | <u>1.03</u><br>2.31                                                    |
| $M \pm m$                                     | <u><math>0.54 \pm 0.06</math></u><br><u><math>0.68 \pm 0.06</math></u> | <u><math>2.27 \pm 0.24</math></u><br><u><math>2.09 \pm 0.21</math></u> | <u><math>0.93 \pm 0.05</math></u><br><u><math>1.52 \pm 0.10</math></u> | <u><math>67.3 \pm 2.3</math></u><br><u><math>63.4 \pm 4.3</math></u> | <u><math>1.15 \pm 0.11</math></u><br><u><math>1.43 \pm 0.16</math></u> |
| $r(C_{\text{орг}} : \text{МЭ})$               | <u>0.06</u><br>0.37                                                    | <u>0.23</u><br>0.21                                                    | <u>0.52</u><br>0.14                                                    | <u>0.35</u><br>-0.39                                                 | <u>0.16</u><br><b>0.75</b>                                             |
| $r(\text{pH}_{\text{KCl}} : \text{МЭ})$       | <u>0.05</u><br>-0.33                                                   | <u>0.07</u><br>0.02                                                    | <u>0.53</u><br>0.09                                                    | <u>-0.03</u><br>0.19                                                 | <u>0.12</u><br>0.38                                                    |
| $r(\Sigma (<0.001$<br>и $<0.01) : \text{МЭ})$ | <u>0.04</u><br>0.16                                                    | <u>0.05</u><br>0.37                                                    | <u>0.31</u><br>0.39                                                    | <u>0.25</u><br>-0.34                                                 | <u>-0.32</u><br>-0.21                                                  |
| $r(S : \text{МЭ})$                            | <u>0.17</u><br>0.16                                                    | <u>0.36</u><br>0.44                                                    | <u>0.85*</u><br>0.27                                                   | <u>0.21</u><br>0.11                                                  | <u>-0.14</u><br>0.46                                                   |
| B                                             | =<br>-                                                                 |                                                                        |                                                                        |                                                                      |                                                                        |
| Cu                                            | <u>0.48</u><br>0.45                                                    | =<br>-                                                                 |                                                                        |                                                                      |                                                                        |
| Co                                            | <u>0.16</u><br>0.39                                                    | <u>0.64*</u><br>0.46                                                   | =<br>-                                                                 |                                                                      |                                                                        |
| Mn                                            | <u>0.11</u><br>-0.26                                                   | <u>0.33</u><br>0.01                                                    | <u>0.35</u><br>-0.08                                                   | =<br>-                                                               |                                                                        |
| Zn                                            | <u>0.23</u><br>0.63*                                                   | <u>-0.44</u><br>0.53                                                   | <u>-0.13</u><br>0.13                                                   | <u>0.23</u><br>-0.22                                                 | =<br>-                                                                 |

\*Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена. выделены значимые коэффициенты корреляции при  $p = 0.95$ . То же в табл. 3.

недостовверные корреляции, между  $C_{\text{орг}}$  и Mn — прямые и обратные корреляции средней силы, между Mn и частицами ила и глины — корреляции слабой и средней силы (табл. 2). На отсутствие взаимосвязей четкого характера между обменным Mn и  $pH_{\text{КСЛ}}$  на дерново-подзолистых почвах Удмуртии и Кировской обл. России, Беларуси отмечено в работах [15–17]. Отсутствие высоких и значимых связей между изученными свойствами дерново-подзолистых почв и содержанием подвижного Mn в них может быть связано с тем, что значительное влияние на концентрацию подвижного Mn оказывает окислительно-восстановительный потенциал почвы и содержание лабильного органического вещества [18], изучение которых не входило в программу исследования. Как показал расчет критерия Вилкоксона, содержание Mn в 2021 г. не существенно снизилось на 5.8% к уровню 2014 г.

**Цинк.** Пределы изменений содержания подвижного цинка в дерново-подзолистой почве реперных участков совпадали с пределами содержания его усвояемых форм (0.12–20 мг/кг) для данной почвы, при этом следует отметить, что содержание Zn в дерново-подзолистых почвах участков находились ближе к нижней границе изменений [19].

Среднее содержание подвижных форм Zn, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с  $pH$  4.8, в дерново-подзолистых почвах участков в 2014 и 2021 гг. соответствовало в основном низкой (<1.0 мг/кг) и реже — средней обеспеченности (1–2 мг Zn/кг) почв как микроэлементом питания растений.

Как показал расчет коэффициентов корреляции, между изученными свойствами почвы и содержанием подвижного Zn значимое ( $p = 0.95$ ) взаимовлияние отмечено только между содержанием в почве  $C_{\text{орг}}$  и содержанием Zn в 2021 г., в остальных случаях выявлены недостоверные корреляции. За 7-летний период мониторинга, среднее содержание Zn в почвах участков несущественно увеличилось на 24.3%.

Предположительно, повышение обеспеченности подвижными формами В, Со и Zn связано с поступлением в почвы дополнительных количеств данных элементов от техногенных источников загрязнения и внесением с удобрениями.

Взаимодействия между различными МЭ в почвах могут проявляться по-разному и зависят от их количественного и качественного составов, факторов внешней среды, свойств почвы и др. [6]. Особенности возможного взаимовлияния между подвижными формами изученных МЭ в дерново-

подзолистых почвах выявили с помощью расчета корреляционных связей (табл. 2). В нашем случае направление и сила взаимосвязей среди изученных МЭ изменялась по годам, завися от условий внешней среды. Достоверно установлено, что изменение концентрации в почве подвижной Со было тесно связано с наличием в почве подвижного Со в 2014 г. Между концентрациями подвижного Zn и В в 2021 г. также отмечена прямая значимая корреляция. В остальных случаях между доступными формами МЭ в почвах в 2014 и 2021 гг. отмечали несущественные корреляции (табл. 2). По-видимому, концентрации доступных форм МЭ в почвах больше зависели от влияния других факторов.

Разные авторы приводят пограничные величины содержания МЭ в почвах, ниже которых отмечают их дефицит для растений. Например, граничными показателями содержания подвижных форм Mn является 40, Zn и В — 0.3, Со — 2.5, Cu — 1.5–2 мг/кг почвы [12, 20].

Дерново-подзолистые почвы всех реперных участков на протяжении всего периода мониторинга были плохо обеспечены подвижным Со, что создавало риск снижения урожайности растений и ухудшения качества продукции. Для устранения недостаточной обеспеченности растений Со рекомендуется внесение в почву кобальтсодержащих микроудобрений.

Содержание МЭ в растениях агроценозов представлено в табл. 3. Накопление МЭ растениями из почв главным образом зависит от типа и свойств почвы, вида и сорта растений, явлений антагонизма и синергизма между отдельными элементами питания при поступлении их в растения [3]. Были определены последовательности культур по содержанию МЭ в зерне и соломе злаков. Усредненное содержание В в зерне снижалось в ряду: яровая пшеница > ячмень = озимая пшеница > овес; Cu — озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес; Со — ячмень > озимая пшеница > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Снижение содержания Cu и Со в соломе злаков совпадало со снижением их содержания в зерне. Содержание В снижалось в ряду: озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > овес > ячмень > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > ячмень > овес > озимая пшеница. Установлено, что в зеленой массе клевера и тимopheевки больше содержалось В, Со и Mn и меньше Cu и Zn, чем в полевице, мятлике и щучке.

Таблица 3. Содержание МЭ в растениях, мг/кг

| Реперный участок, № | Культура (вид продукции)                                                       | B                                    | Cu                                   | Co                                   | Mn                                  | Zn                                  |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1                   | Овес (зерно/солома)<br>Овес (зерно/солома)                                     | <u>1.86/6.09</u><br><u>1.65/5.23</u> | <u>2.30/1.55</u><br><u>1.52/1.20</u> | <u>0.12/0.05</u><br><u>0.01/0.04</u> | <u>56.0/53.0</u><br><u>6.5/15.0</u> | <u>22.3/4.2</u><br><u>21.0/4.0</u>  |
| 6                   | Озимая пшеница (зерно/солома)<br>Овес (зерно/солома)                           | <u>1.82/6.73</u><br><u>1.72/4.71</u> | <u>7.30/2.10</u><br><u>2.05/1.30</u> | <u>0.05/0.30</u><br><u>0.02/0.05</u> | <u>31.0/36.0</u><br><u>6.5/17.0</u> | <u>23.5/4.8</u><br><u>21.0/5.8</u>  |
| 8                   | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)<br>Клевер, тимopheевка (зеленая масса) | <u>2.50</u><br><u>3.40</u>           | <u>2.65</u><br><u>0.64</u>           | <u>0.02</u><br><u>0.12</u>           | <u>16.0</u><br><u>32.5</u>          | <u>4.2</u><br><u>3.0</u>            |
| 9                   | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)<br>Клевер, тимopheевка (зеленая масса) | <u>2.90</u><br><u>2.09</u>           | <u>1.34</u><br><u>0.55</u>           | <u>0.02</u><br><u>0.12</u>           | <u>15.0</u><br><u>42.0</u>          | <u>3.5</u><br><u>2.9</u>            |
| 11                  | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)<br>Клевер, тимopheевка (зеленая масса) | <u>2.54</u><br><u>2.70</u>           | <u>1.60</u><br><u>0.64</u>           | <u>0.03</u><br><u>0.14</u>           | <u>15.5</u><br><u>18.0</u>          | <u>5.1</u><br><u>2.8</u>            |
| 12                  | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)<br>Клевер, тимopheевка (зеленая масса) | <u>2.59</u><br><u>2.44</u>           | <u>2.77</u><br><u>0.55</u>           | <u>0.02</u><br><u>0.11</u>           | <u>16.0</u><br><u>29.0</u>          | <u>3.8</u><br><u>2.9</u>            |
| 14                  | Ячмень (зерно/солома)<br>Яровая пшеница (зерно/солома)                         | <u>1.74/5.78</u><br><u>2.73/4.64</u> | <u>2.90/1.70</u><br><u>2.85/1.90</u> | <u>0.25/0.80</u><br><u>0.01/0.04</u> | <u>22.0/23.0</u><br><u>6.5/9.3</u>  | <u>15.6/9.1</u><br><u>25.0/10.6</u> |
| 15                  | Ячмень (зерно/солома)<br>Клевер, тимopheевка (зеленая масса)                   | <u>1.90/6.19</u><br><u>1.85</u>      | <u>2.50/1.00</u><br><u>0.54</u>      | <u>0.26/0.79</u><br><u>0.10</u>      | <u>20.0/23.0</u><br><u>30.0</u>     | <u>14.8/8.5</u><br><u>1.9</u>       |
| 17                  | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)<br>Клевер, тимopheевка (зеленая масса) | <u>2.41</u><br><u>2.73</u>           | <u>1.66</u><br><u>0.61</u>           | <u>0.02</u><br><u>0.12</u>           | <u>14.0</u><br><u>27.5</u>          | <u>3.8</u><br><u>2.4</u>            |
| 18                  | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)<br>Клевер, тимopheевка (зеленая масса) | <u>2.28</u><br><u>2.47</u>           | <u>2.54</u><br><u>0.59</u>           | <u>0.01</u><br><u>0.12</u>           | <u>15.0</u><br><u>28.0</u>          | <u>4.5</u><br><u>2.9</u>            |
| 21                  | Клевер, тимopheевка (зеленая мас<br>Овес (зерно/солома)                        | <u>3.26</u><br><u>1.88/4.73</u>      | <u>2.73</u><br><u>1.85/1.20</u>      | <u>0.02</u><br><u>0.02/0.04</u>      | <u>15.0</u><br><u>5.3/16.5</u>      | <u>5.9</u><br><u>13.8/5.6</u>       |

Таблица 3. Окончание

| Реперный участок, №                      | Культура (вид продукции)                | B                           | Cu                          | Co                            | Mn                         | Zn                        |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| <i>M</i> ± <i>m</i>                      | Овес (зерно/солома)                     | 1.78 ± 0.06/<br>5.19 ± 0.32 | 1.93 ± 0.16/<br>1.31 ± 0.08 | 0.04 ± 0.003/<br>0.04 ± 0.001 | 18.6 ± 12.5/<br>25.4 ± 9.2 | 19.5 ± 1.9/<br>4.9 ± 0.5  |
|                                          | Яровая пшеница (зерно/солома)           | 2.73 ± 0.19/<br>4.64 ± 0.31 | 2.85 ± 0.23/<br>1.90 ± 0.19 | 0.01 ± 0.001/<br>0.01 ± 0.001 | 6.5 ± 0.7/<br>9.3 ± 1.0    | 25.0 ± 2.2/<br>10.6 ± 0.9 |
|                                          | Ячмень (зерно/солома)                   | 1.82 ± 0.08/<br>5.99 ± 0.21 | 2.70 ± 0.20/<br>1.35 ± 0.35 | 0.26 ± 0.01/<br>0.80 ± 0.01   | 21.0 ± 1.0/<br>22.9 ± 0.1  | 15.2 ± 0.4/<br>8.8 ± 0.3  |
|                                          | Озимая пшеница (зерно/солома)           | 1.82 ± 0.07/<br>6.73 ± 0.36 | 7.30 ± 0.33/<br>2.10 ± 0.24 | 0.05 ± 0.002/<br>0.30 ± 0.01  | 31.0 ± 1.1/<br>36.0 ± 1.3  | 23.5 ± 0.6/<br>4.8 ± 0.4  |
|                                          | Полевица, мяглик, щучка (зеленая масса) | 2.54 ± 0.09                 | 2.09 ± 0.26                 | 0.02 ± 0.003                  | 15.3 ± 0.3                 | 4.2 ± 0.2                 |
|                                          | Клевер, тимopheевка (зеленая масса)     | 2.62 ± 0.19                 | 0.86 ± 0.27                 | 0.11 ± 0.01                   | 27.8 ± 3.0                 | 3.1 ± 0.4                 |
|                                          | Овес (зерно/солома)                     | 0.08/−0.67                  | −0.34/−0.68                 | −1.00/0.85                    | −0.32/0.40                 | 0.75/0.26                 |
|                                          | Яровая пшеница (зерно/солома)           | 0.45/−0.34                  | 0.24/0.10                   | −0.44/−0.14                   | 0.21/0.11                  | −0.11/0.13                |
| <i>r</i> <sub>МЭ</sub> почва/МЭ растение | Ячмень (зерно/солома)                   | 0.80/−0.80                  | 0.20/0.40                   | −0.40/−0.20                   | 0.31/0.17                  | −0.51/0.17                |
|                                          | Озимая пшеница (зерно/солома)           | 0.43/−0.37                  | 0.26/0.11                   | −0.02/−0.24                   | 0.44/0.14                  | −0.03/0.07                |
|                                          | Полевица, мяглик, щучка (зеленая масса) | −0.28                       | −0.73                       | 0.20                          | −0.68                      | 0.18                      |
|                                          | Клевер, тимopheевка (зеленая масса)     | 0.07                        | 0.31                        | 0.27                          | 0.50                       | −0.59                     |
|                                          | Овес (зерно/солома)                     | 0.23                        | 0.87                        | 0.82                          | 0.63                       | −0.57                     |
|                                          | Яровая пшеница (зерно/солома)           | −0.51                       | 0.45                        | 0.58                          | 0.81*                      | −0.20                     |
|                                          | Ячмень (зерно/солома)                   | −0.40                       | 0.80                        | 0.80                          | 0.99*                      | −0.14                     |
|                                          | Озимая пшеница (зерно/солома)           | −0.31                       | 0.70                        | 0.77                          | 0.86*                      | −0.23                     |
| <i>r</i> <sub>МЭ</sub> зерно/МЭ солома   |                                         |                             |                             |                               |                            |                           |

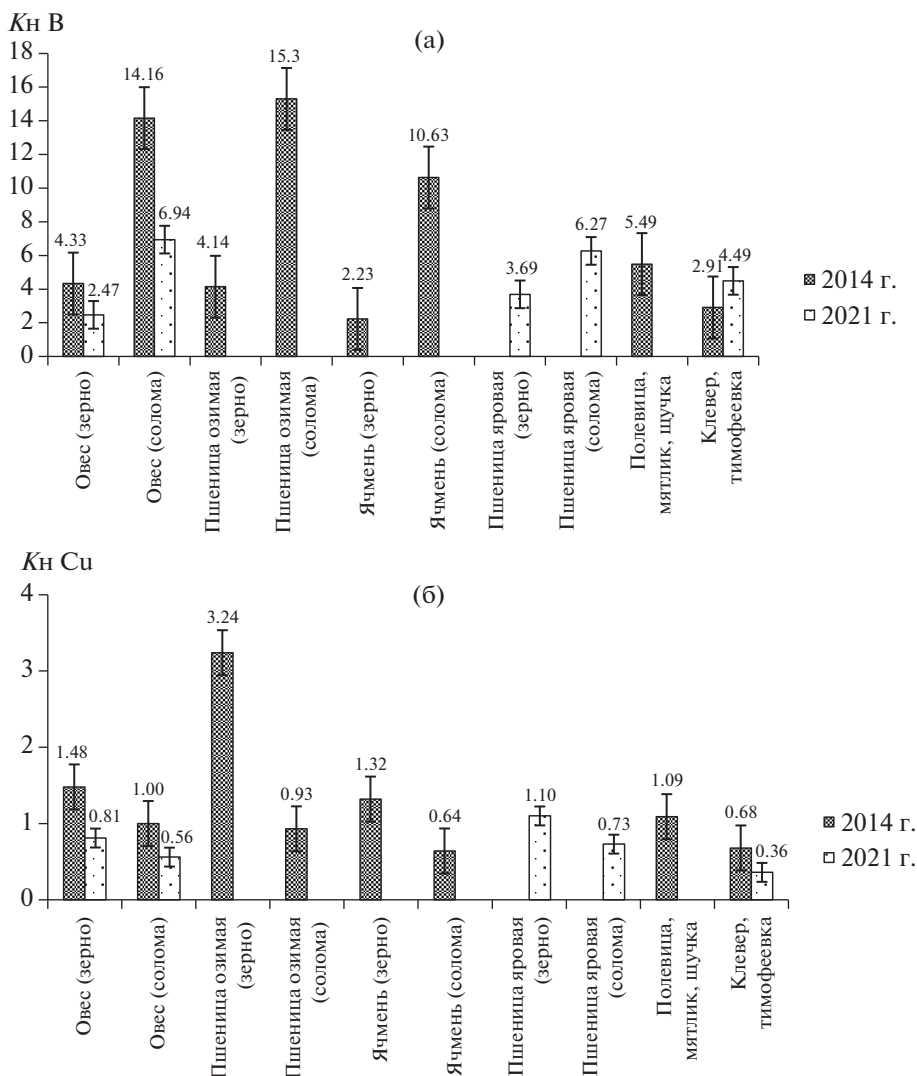


Рис. 1. Коэффициенты накопления МЭ растениями: (а) – В, (б) – Cu, (в) – Co, (г) – Mn, (д) – Zn.

Для растений овса, ячменя, озимой и яровой пшениц было характерно большее содержание В и Mn в соломе урожая, Cu и Zn – в зерне культуры. У овса Co распределялся равномерно между обеими частями урожая, у ячменя, озимой и яровой пшениц его больше накапливалось в соломе. На факт схожего с отмеченным нами распределением В в соломе и зерне ячменя и яровой пшеницы, Cu и Zn – в соломе и зерне ячменя и овса на дерново-подзолистых почвах указано в работе [1].

Фактические величины содержания всех изученных МЭ (на сухое вещество) в зерне озимой пшеницы, В и Zn – зерне и соломе яровой пшеницы, ячменя и овса, Mn – в зерне ячменя и овса соответствовали показателям, характерным для данных культур, выращенных на дерново-подзолистых почвах. В то же время отмечали заниженное содержание Cu и Co в зерне и Mn – в зерне и

соломе яровой пшеницы, Cu – в зерне и соломе ячменя и овса и Mn – в соломе этих культур по сравнению с типичными показателями концентраций этих МЭ [1].

Вся выращенная растительная продукция (зерно, грубые и сочные корма) удовлетворяла требованиям к временному максимально допустимому уровню (МДУ) в кормах для сельскохозяйственных животных для Cu (30 мг/кг), Zn (50 мг/кг) и Co (1 мг/кг) [21]. Содержание Mn и В в растительной продукции, используемой на кормовые цели, не нормируется.

Установлено, что коэффициент накопления ( $K_n$ ) В, Co и Mn соломой ячменя, озимой и яровой пшениц были больше, чем  $K_n$  этих МЭ зерном, и наоборот,  $K_n$  Cu и Zn зерновой частью урожая данных культур, были больше, чем  $K_n$  Cu и Zn соломой (рис. 1).  $K_n$  В, Cu, Co и Mn соломой

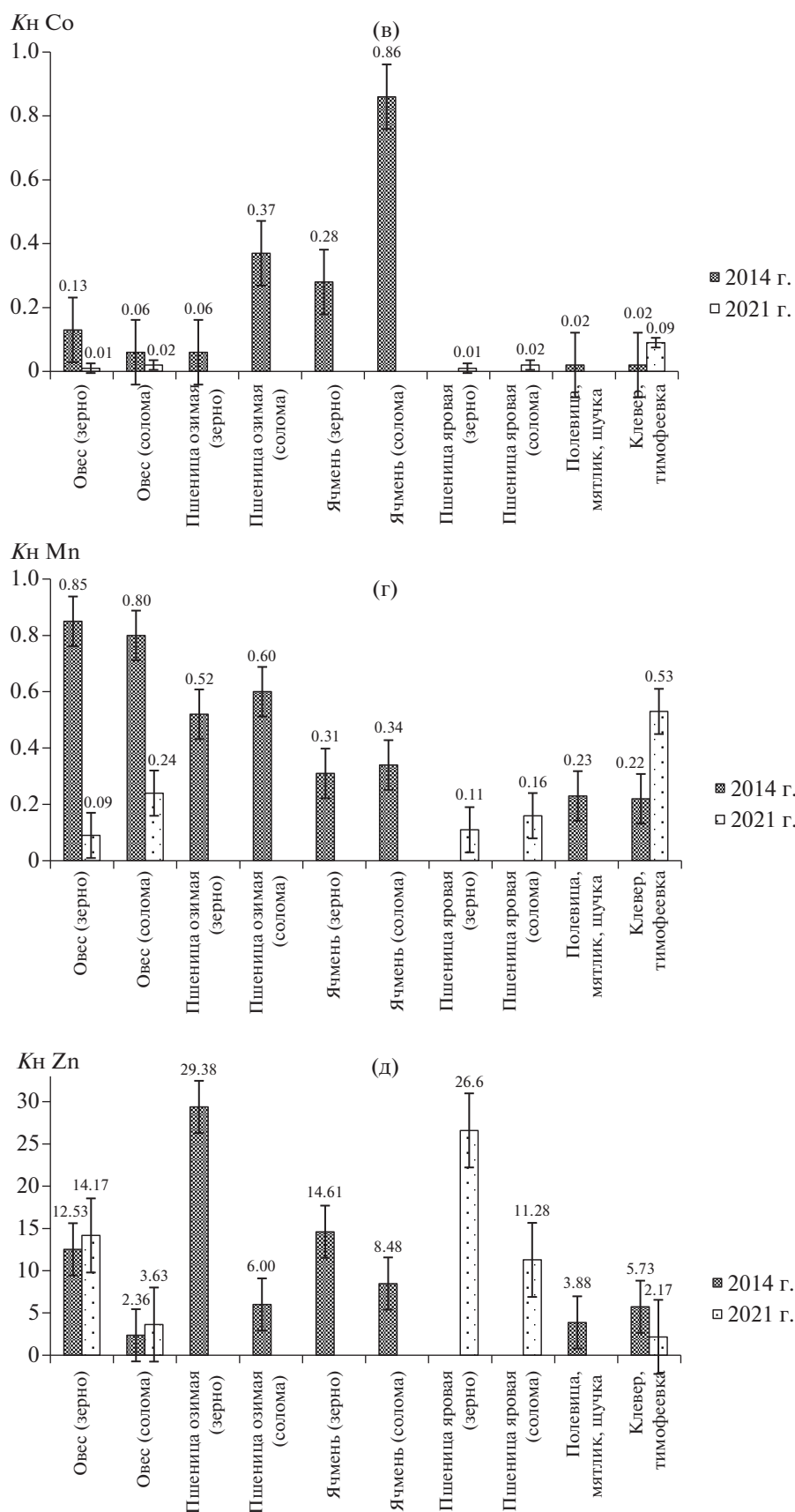


Рис. 1. Окончание.

овса были больше, чем зерном, а  $K_H$  Zn зерном больше, чем соломой.

Величины  $K_H$  В, Cu и Zn зеленой биомассой полевицы, мятлика и щучки были больше, чем клевера и тимopheевки, а  $K_H$  Co и Mn — наоборот, были больше у клевера и тимopheевки, чем у полевицы, мятлика и щучки.

Изученные МЭ обладают разным потенциалом поглощения растениями. Поступление элементов в биомассу растений регулируется процессами трансформации и иммобилизации их почвой, а также зависит от наличия у растений различных физиологических барьеров поглощения [22]. По величинам  $K_H$  к МЭ с барьерным типом поглощения относятся Mn, Co и В, у которых функции физиологического барьера, препятствующего избыточному поступлению элементов в биомассе, играет корневая система. Zn и Cu относятся к МЭ с безбарьерным типом поглощения и накапливаются в зерне злаков в концентрациях, превышающих концентрации в соломе. Применение Zn и Cu, обладающих наиболее высоким потенциалом поглощения, необходимо контролировать во избежание избыточного накопления их в растительной продукции.

Парный корреляционный анализ показал, что между количеством отдельных МЭ в растениях, для которых характерны явления антагонизма и синергизма, отсутствовали достоверные ( $p = 0.95$ ) антагонистические и синергические взаимодействия для всех исследованных видов растений [3].

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена показал, что между содержанием подвижных форм МЭ в почве и содержанием МЭ в зерне и соломе зерновых культур и зеленой массе многолетних трав и злакового разнотравья отмечены недостоверные взаимосвязи (табл. 3). Между изученными показателями в основном отмечали связь слабой и средней силы, которая изменялась в зависимости от видовой принадлежности культур.

Между содержанием Zn и В в зерне и соломе зерновых культур отмечали преимущественно обратные недостоверные корреляции средней и слабой силы. Между содержанием и распределением Cu, Co и Mn в зерне и соломе выявлены прямые корреляции в основном высокой силы, причем для Mn у ячменя, озимой и яровой пшениц они были существенными.

## ВЫВОДЫ

1. Среднее содержание и пределы изменений подвижных форм изученных МЭ в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. соответствовали типичным показателям, характерным для дерново-подзолистых почв России.

2. За период с 2014 по 2021 г. содержание В и Zn в почвах реперных участков несущественно увеличилось на 25.9 и 24.3%, Co — достоверно увеличилось на 63.4%, Cu и Mn — не существенно снизилось на 7.9 и 5.8% соответственно.

3. В целом с 2014 по 2021 г., согласно градации обеспеченности почв В и Cu, их содержание отвечало средней степени обеспеченности. Среднее содержание Zn в почвах в основном соответствовало низкой и реже — средней степени, Co в 2014 г. — низкой, в 2021 г. — средней степени, Mn — высокой степени обеспеченности.

4. Между содержанием МЭ в почвах, величинами  $r_{HCl}$ ,  $S$ ,  $C_{орг}$ , содержанием глинистых и илестых частиц в основном отмечены недостоверные, преимущественно прямые корреляции слабой и реже — средней силы, за исключением существенной корреляции между содержанием Co и показателем  $S$  в 2014 г., Zn и  $C_{орг}$  — в 2021 г.

5. Между концентрациями подвижных Cu и Co в 2014 г., а также Zn и В в почве в 2021 г. отмечена достоверная корреляция. В остальных случаях между формами МЭ в почвах выявлены несущественные взаимосвязи.

6. Дерново-подзолистые почвы всех реперных участков на протяжении всего периода мониторинга были плохо обеспечены подвижным Co.

7. Содержание В в зерне снижалось в ряду: яровая пшеница > ячмень = озимая пшеница > овес; Cu — озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес; Co — ячмень > озимая пшеница > > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > > ячмень > овес > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Содержание В в соломе снижалось в ряду: озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > овес > ячмень > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > ячмень > овес > > озимая пшеница. Снижение содержания Cu и Co в соломе совпадало со снижением их содержания в зерне.

8. В зеленой массе клевера и тимopheевки больше содержалось В, Co и Mn и меньше Cu и Zn, чем в злаковом разнотравье.

9. Для растений овса, ячменя, озимой и яровой пшениц было характерно большее содержание В и Mn в соломе, Cu и Zn — в зерне. У овса Co рас-

пределялся равномерно между обеими частями урожая, у ячменя, озимой и яровой пшениц его больше накапливалось в соломе.

10. Содержание Cu, Zn и Co в зерне, соломе и зеленой массе удовлетворяло требованиям к временному МДУ в кормах для животных.

11. Между содержанием подвижных форм МЭ в почве и МЭ в растительной продукции отмечены недостоверные взаимосвязи слабой и средней силы.

12. Коэффициенты накопления ( $K_H$ ) В, Со и Мп соломой ячменя, озимой и яровой пшениц были больше, чем  $K_H$  этих МЭ зерном, и наоборот,  $K_H$  Cu и Zn зерновой частью урожая данных культур были больше, чем  $K_H$  Cu и Zn соломой.  $K_H$  В, Cu, Со и Мп соломой овса были больше, чем зерна, а  $K_H$  Zn зерном — больше, чем соломой.  $K_H$  В, Cu и Zn зеленой массой полевицы, мятлика и щучки были больше, чем клевера и тимофеевки, а  $K_H$  Со и Мп клевера и тимофеевки — наоборот, были больше, чем злакового разнотравья.

13. К МЭ с барьерным типом поглощения относятся Мп, Со и В. Zn и Cu относятся к МЭ с безбарьерным типом поглощения.

14. Между содержанием Zn и В в зерне и соломе отмечали в основном обратные недостоверные корреляции средней и слабой силы. Между содержанием и распределением Cu, Со и Мп зерне и соломе выявлены прямые корреляции преимущественно высокой силы. Для Мп у ячменя, озимой и яровой пшениц они были существенными.

Авторы выражают благодарность сотруднику САС “Ивановская” Е.А. Востряковой за помощь в проведении химических анализов почвенных и растительных образцов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасин В.И. Микроэлементы и урожай. Калининград: Калининград. кн. изд-во, 2000. 276 с.
2. Анисимова Л.Н. Накопление Со, Cu и Zn ячменем в зависимости от содержания и формы нахождения металлов в дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 2008. № 10. С. 62–68.
3. Кабата Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
4. Уткин А.А., Лукьянов С.Н. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 12–21. <https://doi.org/10.31857/S0002188122030139>
5. Уткин А.А. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188122060126>
6. Битюцкий Н.П. Микроэлементы и растение. Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 232 с.
7. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищ-во научн. изд. КМК, 2006. 509 с.
8. Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
9. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
10. Чернова О.В., Бекецкая О.В. Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // *Почвоведение*. 2011. № 9. С. 1102–1113.
11. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
12. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
13. Пейве Я.В. Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.
14. Зырин Н.Г. Узловые вопросы учения о микроэлементах в почвоведении: Докл. на соиск. уч. степени д-ра биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 1968. 39 с.
15. Клебанович Н.В. Влияние кислотности дерново-подзолистых почв Беларуси на содержание подвижных форм микроэлементов // *Вестн. Акад. Аграр. Навук Беларусі*. 1998. № 3. С. 37–40.
16. Кузнецов Н.К. Микроэлементы в почвах Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт.ГУ, 1994. 285 с.
17. Шихова Л.Н., Егошина Т.Л. Тяжелые металлы в почвах и растениях таежной зоны Северо-Востока Европейской России. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2004. 264 с.
18. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
19. Ермолаев С.А., Сычев В.Г., Плющиков В.Г. Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв России // *Плодородие*. 2001. № 1. С. 4–9.
20. Власюк П.А., Жидков В.А., Ивченко В.И. Микроэлементы в обмене веществ растений / Под ред. П.А. Власюка. Киев: Наукова думка, 1976. 208 с.
21. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. (утв. Главным управлением ветеринарии Госагропрома СССР 7 августа 1987 г.).
22. Пейве Я.В. Агрохимия и биохимия микроэлементов. Избр. тр. М., 1980. 430 с.

## **Dynamics of the Content and Distribution of Trace Elements in Sod-Podzolic Soils and Plants of Agrocenoses**

**A. A. Utkin<sup>a, #</sup>, N. I. Akanova<sup>b</sup>, and I. B. Noda<sup>c</sup>**

*<sup>a</sup>Russian State Agrarian University—K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy,  
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow, 127434 Russia*

*<sup>b</sup>The All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia*

*<sup>c</sup>Agrochemical service station "Ivanovskaya"  
Tsentrlnaya ul. 8, Ivanovo region, d. Bogorodskoye 153506, Russia*

*<sup>#</sup>E-mail: aleut@inbox.ru*

The paper presents the results of a survey of sod-podzolic soils for agricultural purposes and plants of reference sites of the Ivanovo region for the content of boron, copper, cobalt, manganese and zinc in them, conducted in 2014 and 2021. Correlation analysis determined the influence of individual physical and chemical properties of soils on the content and distribution of available forms of trace elements in the soil and the relationship between the trace elements themselves. Changes in the availability of trace elements of the soils of the plots have been established. According to the amount of content of available forms of trace elements in soils, the need for the use of micronutrients is determined. The sequences of crops were determined by the content of trace elements in grain and straw of cereals, the green mass of forage grasses, as well as the distribution of trace elements between parts of the grown crop. Grain, straw and green mass were evaluated for compliance with veterinary standards for the content of copper, zinc and cobalt in feed. The coefficients of accumulation of trace elements by plant products of crops are calculated and their comparative analysis is carried out. By the magnitude and sign of the correlation coefficients between the concentrations of trace elements in plants, the manifestation of antagonism and synergy between trace elements was determined. The Pearson and Spearman correlation coefficients between the content of mobile forms of trace elements in the soil and their content in plant products, as well as between the content of trace elements in grain and straw of cereals revealed their strength and the ambiguous nature of the relationships..

*Key words:* trace elements, sod-podzolic soil, plants, agrocenoses, reference sites, Ivanovo region.

УДК 631.82/86:631.41:631.445.24:631.559:631.582:633.2(470.13)

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ В КОРМОВОМ СЕВООБОРОТЕ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА

© 2023 г. Н. Т. Чеботарев<sup>1</sup>, О. В. Броварова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт агробиотехнологий им. А.В. Журавского Коми НЦ УрО РАН  
ул. Ручейная 27, Сыктывкар 167023, Россия

\*E-mail: olbrov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.02.2023 г.

После доработки 18.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

В длительном стационарном полевом опыте на дерново-подзолистой почве установлена эффективность применения органических и минеральных удобрений и их влияние на свойства почвы, урожайность и качество многолетних трав в кормовом 6-польном севообороте. Определено, что совместное применение удобрений наиболее эффективно влияло на повышение плодородия почвы и продуктивности клеверо-тимофеечной смеси. Повышалось содержание гумуса в почве на 0.4–0.6%, подвижного фосфора на 70–150 мг/кг, понижались обменная и гидролитическая кислотности. Комплексное применение удобрений, особенно в высоких дозах, наиболее значительно увеличивало урожайность и качество многолетних трав.

**Ключевые слова:** дерново-подзолистая почва, органические и минеральные удобрения, кормовой севооборот, гумус, продуктивность, сырой протеин, сухое вещество, нитраты, урожайность.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080045, **EDN:** ZDSFMS

### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение продуктивности агроценозов дерново-подзолистых почв Севера невозможно без совершенствования технологий сохранения и расширенного воспроизводства плодородия почв, а также возделывания сельскохозяйственных культур, адаптированным к региональным почвенно-климатическим условиям [1–4].

Для широкого воспроизводства продуктивности агроценозов Республики Коми требуются совершенствование технологий сохранения и воспроизводства плодородия почв, возделывание районированных сортов культур, переход от зональной системы земледелия к адаптивно-ландшафтному земледелию и биологизированному кормопроизводству [4–10].

В связи с недостаточными ресурсами органических удобрений и высокой стоимостью минеральных для повышения плодородия почв возрастает значение севооборотов с высокой насыщенностью однолетними и многолетними травами, позволяющими без значительных затрат за счет транс-

формации корнепоживных остатков повышать продуктивность агроценозов при высоком качестве сельскохозяйственной продукции [11–15].

Наиболее полно изучить возможности применения таких севооборотов и оценить влияние вносимых доз удобрений на их продуктивность и качество продукции, рациональное использование материальных ресурсов и возмещение в почву элементов питания и органического вещества позволяют длительные полевые опыты, один из которых, заложенный в 1978 г. на землях Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, послужил основой для проведения данного исследования. Изучение применения органических и минеральных удобрений, а также их комплексное использование в кормовом севообороте проводят более 40 лет [11, 12]. Такой подход является важным резервом обеспечения воспроизводства плодородия и продуктивности дерново-подзолистых почв в адаптивно-ландшафтной системе земледелия Республики Коми, сохранения и поддержания их гумусового состояния.

В связи с вышеизложенным цель работы — изучение влияния комплексного применения удобрений на свойства пахотных почв, продуктивность и качество культур в 6-польном кормовом севообороте в условиях Европейского Северо-Востока и выявление закономерностей трансформации почв сельскохозяйственных угодий. В задачи исследований входило:

— оценка продуктивности многолетних трав (средние данные 1-го и 2-го года пользования, г.п.) 3-го и 4-го поля кормового севооборота, применения органических и минеральных удобрений, а также результатов анализа растениеводческой продукции (многолетних трав), ее соответствия нормативам (содержание сухого вещества, сырого протеина, фосфора, калия и кальция);

— оценка изменения агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы при возделывании многолетних трав в 6-польном кормовом севообороте;

— энергетическая и экономическая эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистой почве Республики Коми.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексные исследования пахотных почв, их физико-химических особенностей, продуктивности многолетних трав выполняли на землях Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, где, начиная с 1978 г., проводят длительный полевой опыт с удобрениями в кормовом севообороте согласно методике ВИА им. Д.Н. Прянишникова для Географической сети

опытов с удобрениями. Почва опытного участка — сильноподзолистая легкосуглинистая на покровных суглинках. На начало эксперимента (1978 г.) содержание гумуса варьировало в пределах 2.0–2.6%,  $pH_{KCl}$  4.8–5.6, сумма поглощенных оснований — 9.2–11.6 ммоль/100 г почвы, содержание подвижных форм фосфора — 180–246, калия — 146–190 мг/кг почвы.

В 1978–2019 гг. проводили изучение влияния различных доз минеральных удобрений (расчетной, 1/3 и 1/2 от расчетной) и действия 2-х доз органических удобрений (торфо-навозный компост (ТНК) 40 и 80 т/га) на плодородие дерново-подзолистой почвы, рост и развитие многолетних трав в 6-польном кормовом севообороте со следующим чередованием культур: картофель—однолетние травы + многолетние травы—многолетние травы 1-го г.п.—многолетние травы 2-го г.п.—однолетние травы—картофель. Органические удобрения (ТНК) вносили осенью в период с 1977–2018 гг. отдельно и на фоне применения минеральных удобрений. Также в 2018 г. для снижения обменной и гидролитической кислотности проведено известкование известняковой мукой по полной гидролитической кислотности (8.0 т/га). Расчетные дозы NPK под многолетние травы на запланированный урожай (15.0 т/га) составили: N13P11K36 (1/3 дозы), N20P16K54 (1/2 дозы), N40P32K108 (полная расчетная доза). Площадь опытной делянки 100 м<sup>2</sup> (12.5 × 8 м), повторность опыта четырехкратная, площадь участка под опытом 4800 м<sup>2</sup>.

Схема опыта, варианты:

|                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1. Контроль            | 5. ТНК 40 т/га (фон 1) | 9. ТНК 80 т/га (фон 2) |
| 2. N13P11K36 (1/3 NPK) | 6. Фон 1 + 1/3NPK      | 10. Фон 2 + 1/3NPK     |
| 3. N20P65K54 (1/2 NPK) | 7. Фон 1 + 1/2NPK      | 11. Фон 2 + 1/2NPK     |
| 4. N40P32K108 (1 NPK)  | 7. Фон 1 + 1NPK        | 12. Фон 2 + 1NPK       |

Полевые и лабораторные исследования включали фенологические наблюдения в фазах развития растений, учет урожая многолетних трав в фазе полного цветения клевера лугового, определение сухого вещества, содержания азота, сырого протеина, фосфора, калия и кальция в урожае трав. Определение выполняли по методикам, принятым в агрохимической службе и почвоведении, расчет энергетической и экономической эффективности удобрений по — рекомендациям [5, 7, 16]. Отбор почвенных образцов из пахотного горизонта на опытных делянках проводили после уборки многолетних трав.

На станции химизации “Сыктывкарская” и Институте агробиотехнологий им. А.В. Журавского в растениях клевера лугового и тимopheевки луговой проводили следующие виды анализов: содержание сухого вещества — высушиванием в термостате при температуре 100–105°C, содержание общего азота — индофенольным методом (ГОСТ 13496.4-85), фосфора — по ГОСТу 26657-97 фотометрическим методом, калия — методом пламенной фотометрии после сухого озоления, кальция — трилометрическим методом, сырого протеина — расчетным методом, нитратного азота — ионометрическим методом.

**Таблица 1.** Влияние органических и минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы (среднее за 2 года), многолетние травы

| Вариант                  | Гумус, %                |     |     |     |     |     |     |         | Н <sub>г</sub> , ммоль/100 г почвы          |     |     |     |     |     |     |         |   |
|--------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|---------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|---|
|                          | ротации                 |     |     |     |     |     |     | среднее | ротации                                     |     |     |     |     |     |     | среднее |   |
|                          | 1-я                     | 2-я | 3-я | 4-я | 5-я | 6-я | 7-я |         | 1-я                                         | 2-я | 3-я | 4-я | 5-я | 6-я | 7-я |         |   |
| Без удобрений (контроль) | 2.1                     | 2.1 | 2.0 | 2.1 | 2.0 | 2.1 | 2.0 | 2.0     | 3.1                                         | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.5 | 3.4 | 3.3 | 3.4     |   |
| 1/3 NPK                  | 2.3                     | 2.4 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.3 | 2.3 | 2.3     | 3.7                                         | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.7 | 3.6 | 3.1 | 3.5     |   |
| 1/2 NPK                  | 2.5                     | 2.4 | 2.4 | 2.3 | 2.4 | 2.3 | 2.3 | 2.4     | 3.4                                         | 3.2 | 3.1 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.2 | 3.3     |   |
| 1 NPK                    | 2.5                     | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.3 | 2.2 | 2.2 | 2.3     | 3.4                                         | 3.8 | 4.3 | 3.8 | 3.6 | 3.4 | 3.0 | 3.6     |   |
| ТНК 40 т/га (фон 1)      | 2.5                     | 2.5 | 2.6 | 2.4 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5     | 3.7                                         | 3.5 | 3.4 | 3.4 | 3.3 | 3.4 | 3.4 | 3.4     |   |
| фон 1 + 1/3 NPK          | 2.4                     | 2.5 | 2.6 | 2.5 | 2.6 | 2.6 | 2.5 | 2.5     | 3.7                                         | 3.5 | 3.3 | 3.4 | 3.3 | 3.2 | 3.3 | 3.4     |   |
| фон 1 + 1/2 NPK          | 2.4                     | 2.5 | 2.6 | 2.5 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 2.5     | 3.4                                         | 3.3 | 3.3 | 3.4 | 3.3 | 3.2 | 3.2 | 3.3     |   |
| фон 1 + 1 NPK            | 2.1                     | 2.3 | 2.6 | 2.5 | 2.6 | 2.5 | 2.5 | 2.4     | 4.2                                         | 3.9 | 3.0 | 3.4 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5     |   |
| ТНК 80 т/га (фон 2)      | 2.4                     | 2.5 | 2.7 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.6     | 3.8                                         | 3.6 | 3.4 | 3.4 | 3.3 | 3.2 | 3.3 | 3.4     |   |
| фон 2 + 1/3 NPK          | 2.0                     | 2.4 | 2.7 | 2.7 | 2.6 | 2.7 | 2.6 | 2.5     | 3.9                                         | 3.4 | 2.9 | 3.2 | 3.3 | 3.2 | 3.3 | 3.3     |   |
| фон 2 + 1/2 NPK          | 2.6                     | 2.6 | 2.7 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.6     | 4.4                                         | 3.7 | 3.2 | 3.4 | 3.3 | 3.3 | 3.4 | 3.5     |   |
| фон 2 + 1 NPK            | 2.3                     | 2.4 | 2.6 | 2.6 | 2.5 | 2.6 | 2.6 | 2.5     | 3.6                                         | 3.4 | 3.3 | 3.4 | 3.3 | 3.4 | 3.3 | 3.4     |   |
| НСР <sub>0.5</sub>       | 0.3                     |     |     |     |     |     |     | —       | 0.5                                         | 0.4 |     |     |     |     |     | 0.3     | — |
| Вариант                  | рН <sub>KCl</sub> , ед. |     |     |     |     |     |     |         | Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> , мг/кг почвы |     |     |     |     |     |     |         |   |
|                          | ротации                 |     |     |     |     |     |     | среднее | ротации                                     |     |     |     |     |     |     | среднее |   |
|                          | 1-я                     | 2-я | 3-я | 4-я | 5-я | 6-я | 7-я |         | 1-я                                         | 2-я | 3-я | 4-я | 5-я | 6-я | 7-я |         |   |
| Без удобрений (контроль) | 5.5                     | 5.3 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 5.2     | 223                                         | 218 | 220 | 198 | 225 | 194 | 235 | 216     |   |
| 1/3 NPK                  | 5.6                     | 5.2 | 4.9 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.6 | 5.3     | 193                                         | 227 | 240 | 225 | 234 | 242 | 248 | 230     |   |
| 1/2 NPK                  | 5.6                     | 5.4 | 5.0 | 5.1 | 5.3 | 5.2 | 5.5 | 5.3     | 187                                         | 320 | 420 | 344 | 326 | 312 | 315 | 318     |   |
| 1 NPK                    | 5.4                     | 5.2 | 4.8 | 5.0 | 5.2 | 5.3 | 5.6 | 5.2     | 201                                         | 345 | 540 | 434 | 348 | 352 | 340 | 366     |   |
| ТНК 40 т/га (фон 1)      | 5.2                     | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 5.3     | 211                                         | 288 | 310 | 294 | 312 | 294 | 320 | 290     |   |
| Фон 1 + 1/3 NPK          | 5.3                     | 5.1 | 5.0 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 5.2 | 5.0     | 211                                         | 324 | 360 | 344 | 325 | 312 | 325 | 314     |   |
| Фон 1 + 1/2 NPK          | 5.2                     | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 5.3 | 5.0     | 246                                         | 345 | 490 | 372 | 298 | 345 | 354 | 350     |   |
| Фон 1 + 1 NPK            | 4.8                     | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 5.0     | 184                                         | 467 | 380 | 446 | 351 | 358 | 360 | 364     |   |
| ТНК 80 т/га (фон 2)      | 5.3                     | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.4 | 5.5 | 5.4     | 201                                         | 289 | 330 | 312 | 324 | 292 | 322 | 296     |   |
| Фон 2 + 1/3 NPK          | 5.1                     | 5.3 | 5.5 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.6 | 5.5     | 180                                         | 276 | 380 | 344 | 296 | 317 | 318 | 302     |   |
| Фон 2 + 1/2 NPK          | 5.2                     | 5.2 | 5.4 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.5 | 5.4     | 240                                         | 294 | 390 | 352 | 336 | 328 | 338 | 326     |   |
| Фон 2 + 1 NPK            | 5.3                     | 5.3 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.5 | 5.5 | 5.4     | 227                                         | 325 | 470 | 433 | 388 | 416 | 425 | 383     |   |
| НСР <sub>0.5</sub>       | 0.6                     | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | —       | 23                                          | 37  | 39  | 44  | 38  | 40  | 36  | —       |   |

Таблица 1. Окончание

| Вариант                   | K <sub>2</sub> O, мг/кг почвы |     |     |     |     |     |     |         |
|---------------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
|                           | ротации                       |     |     |     |     |     |     |         |
|                           | 1-я                           | 2-я | 3-я | 4-я | 5-я | 6-я | 7-я | среднее |
| Без удобрений (контроль)  | 146                           | 137 | 130 | 124 | 112 | 118 | 98  | 123     |
| 1/3 NPK                   | 148                           | 152 | 170 | 152 | 146 | 137 | 138 | 135     |
| 1/2 NPK                   | 152                           | 234 | 290 | 233 | 221 | 164 | 212 | 215     |
| 1 NPK                     | 156                           | 254 | 320 | 312 | 286 | 192 | 218 | 248     |
| ТНК 40 т/га (фон 1)       | 148                           | 165 | 180 | 165 | 166 | 158 | 160 | 163     |
| Фон 1 + 1/3 NPK           | 162                           | 216 | 240 | 224 | 217 | 165 | 184 | 201     |
| Фон 1 + 1/2 NPK           | 178                           | 288 | 370 | 344 | 322 | 184 | 192 | 268     |
| Фон 1 + 1 NPK             | 181                           | 290 | 360 | 329 | 316 | 294 | 307 | 297     |
| ТНК 80 т/га (фон 2)       | 170                           | 194 | 210 | 216 | 241 | 203 | 206 | 206     |
| Фон 2 + 1/3 NPK           | 173                           | 196 | 240 | 238 | 218 | 214 | 225 | 215     |
| Фон 2 + 1/2 NPK           | 185                           | 215 | 270 | 233 | 221 | 218 | 234 | 225     |
| Фон 2 + 1 NPK             | 190                           | 253 | 300 | 288 | 265 | 248 | 240 | 255     |
| <i>HCP</i> <sub>0.5</sub> | 19                            | 27  | 32  | 29  | 28  | 27  | 21  | —       |

Примечание. 1-я ротация — 1978–1983 г., 2-я — 1984–1989 г., 3-я — 1990–1995 г., 4-я — 1996–2001 г., 5-я — 2002–2007 г., 6-я — 2008–2013 г., 7-я — 2014–2019 г.

В образцах почв определение величины pH водной и солевых вытяжек проводили ионометрическим методом, обменной кислотности — по Соколову. Содержание фосфора определяли колориметрическим методом по Кирсанову, калия — методом пламенной фотометре. Обменные катионы кальция и магния извлекали ацетатно-аммонийным буфером (pH 7.0) с последующим определением на атомно-эмиссионном спектрофотометре ICP-Spectro ciros. Содержание гумуса определяли по Тюрину.

Математическая обработка полученных данных выполнена методами дисперсионного анализа с использованием пакета программ Microsoft Excel и Statistica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование различных доз органических и минеральных удобрений и их совместное использование в длительном полевом опыте оказало значительное влияние на агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы (табл. 1). Применение 3-х доз минеральных удобрений

(1/3–1 NPK) в течение длительного времени способствовало повышению среднего содержания гумуса до 2.2–2.3%, при совместном использовании ТНК 40 т/га + 3 дозы NPK — до 2.4–2.5%, ТНК 80 т/га + 3 дозы NPK — до 2.5–2.6%. Накопление гумуса в почве происходило прежде всего за счет трансформации органических удобрений, а также корнепознанных остатков культур, особенно бобово-злаковых травосмесей под действием почвенных микроорганизмов.

Исходная обменная кислотность почвы (1978 г.) составляла 4.8–5.6 ед. pH. В течение длительного времени удавалось сохранить обменную кислотность на уровне 5.0–5.5 ед. pH<sub>KCl</sub>, но к 2016 г. она повысилась до уровня 4.8–5.2 ед. pH<sub>KCl</sub>, поэтому в 2018 г. было проведено известкование опытного участка (8.0 т/га), что позволило ее снизить. Средняя обменная кислотность за годы исследования при применении 3-х доз NPK составила 5.2–5.3 ед. pH<sub>KCl</sub>, 2-х доз ТНК — 5.3–5.4 ед. pH<sub>KCl</sub>, применение 3-х доз NPK на фоне применения ТНК 40 т/га — 5.0 ед. pH<sub>KCl</sub> и на фоне ТНК 80 т/га —

**Таблица 2.** Влияние органических и минеральных удобрений на урожайность и качество многолетних трав (среднее за 2 года)

| Вариант                  | Урожайность, т сухого вещества/га |      |      |      |      |      |      |         | Сухое вещество, % |      |      |      |      |      |      |         |
|--------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|---------|-------------------|------|------|------|------|------|------|---------|
|                          | ротации                           |      |      |      |      |      |      |         | ротации           |      |      |      |      |      |      |         |
|                          | 1-я                               | 2-я  | 3-я  | 4-я  | 5-я  | 6-я  | 7-я  | среднее | 1-я               | 2-я  | 3-я  | 4-я  | 5-я  | 6-я  | 7-я  | среднее |
| Без удобрений (контроль) | 5.1                               | 2.6  | 2.6  | 2.7  | 2.8  | 3.9  | 3.4  | 3.3     | 29.2              | 25.2 | 25.2 | 25.0 | 23.1 | 25.3 | 23.2 | 25.2    |
| 1/3 NPK                  | 7.8                               | 7.1  | 4.7  | 3.6  | 3.4  | 4.3  | 3.8  | 4.9     | 29.3              | 29.3 | 23.4 | 22.7 | 20.6 | 22.6 | 20.7 | 24.1    |
| 1/2 NPK                  | 7.8                               | 9.3  | 5.9  | 4.2  | 3.5  | 5.2  | 4.6  | 5.8     | 26.7              | 26.7 | 20.4 | 20.8 | 19.3 | 21.2 | 19.6 | 22.1    |
| 1 NPK                    | 8.2                               | 9.4  | 7.1  | 5.1  | 3.7  | 5.7  | 5.0  | 6.3     | 26.0              | 26.0 | 20.2 | 19.6 | 17.6 | 20.5 | 18.4 | 21.2    |
| ТНК 40 т/га (фон 1)      | 5.8                               | 3.7  | 3.4  | 3.2  | 3.1  | 5.0  | 5.1  | 4.2     | 27.8              | 25.9 | 25.9 | 20.0 | 18.7 | 24.7 | 18.6 | 23.1    |
| Фон 1 + 1/3 NPK          | 8.3                               | 7.9  | 5.4  | 4.4  | 3.5  | 5.7  | 5.3  | 5.8     | 26.7              | 27.8 | 23.8 | 19.6 | 18.9 | 19.4 | 19.2 | 22.2    |
| Фон 1 + 1/2 NPK          | 8.9                               | 10.0 | 6.5  | 4.8  | 4.0  | 6.5  | 5.1  | 6.5     | 26.3              | 28.3 | 20.9 | 20.4 | 18.8 | 20.7 | 20.5 | 22.3    |
| Фон 1 + 1 NPK            | 8.9                               | 10.6 | 7.7  | 5.0  | 4.5  | 7.2  | 5.4  | 7.0     | 25.9              | 27.8 | 20.2 | 20.5 | 19.4 | 20.3 | 20.2 | 22.0    |
| ТНК 80 т/га (фон 2)      | 6.8                               | 4.1  | 3.4  | 3.5  | 3.6  | 5.5  | 5.5  | 4.6     | 28.4              | 28.4 | 24.6 | 21.4 | 19.9 | 19.8 | 19.5 | 23.1    |
| Фон 2 + 1/3 NPK          | 8.7                               | 8.4  | 5.5  | 4.4  | 3.7  | 7.0  | 6.1  | 6.3     | 27.6              | 27.7 | 23.2 | 21.8 | 18.3 | 18.6 | 18.9 | 22.3    |
| Фон 2 + 1/2 NPK          | 9.5                               | 9.3  | 6.9  | 5.0  | 4.1  | 7.2  | 6.3  | 6.9     | 26.6              | 28.3 | 21.0 | 19.8 | 18.3 | 18.4 | 18.5 | 19.3    |
| Фон 2 + 1 NPK            | 9.1                               | 10.8 | 8.5  | 5.2  | 4.6  | 7.6  | 6.5  | 7.5     | 26.2              | 26.2 | 21.5 | 19.0 | 18.9 | 18.2 | 18.3 | 21.2    |
| $HCP_{0.5}$              | 0.88                              | 1.07 | 0.74 | 0.51 | 0.48 | 0.78 | 0.54 | —       | 2.84              | 2.77 | 2.44 | 2.21 | 1.93 | 2.35 | 2.24 | —       |

5.4–5.5 ед. рН. Подобная закономерность отмечена и для величины гидролитической кислотности.

Органические и минеральные удобрения, а также корнепознивные остатки и не полное использование фосфора в холодных почвах Севера [6] способствовало повышению содержания подвижного фосфора в почве. Наиболее значительное количество подвижного фосфора накапливалось при совместном использовании высокой дозы органических удобрений (ТНК 80 т/га) и 3-х доз NPK (302–383 мг/кг), при применении 3-х доз NPK – 230–336 мг/кг. В варианте без удобрений его количество составило 216 мг/кг почвы.

Содержание обменного калия в почве повышалось в меньшей степени, из-за его выноса растениями и вымыванием по профилю почвы. Вместе с тем наибольшее среднее его количество отмечено в вариантах совместного применения органических и минеральных удобрений (163–297 мг/кг), в вариантах с тремя дозами NPK оно было равно 135–248, в варианте без удобрений – 123 мг/кг.

Научные исследования на протяжении 42 лет (7 ротаций севооборота в 1978–2019 гг.) показали

высокую эффективность комплексного применения органических и минеральных удобрений (табл. 2).

Наибольшая средняя урожайность сухого вещества многолетних трав получена при совместном применении органических и минеральных удобрений: ТНК 80 т/га + три дозы NPK – 6.3–7.5 т/га, что на 90.9–127% превышало контроль (3.3 т/га), ТНК 40 т/га + три дозы NPK – 5.8–7.0 т/га (на 75.7–112% больше контроля). Использование 3-х доз NPK увеличивало урожайность трав до 4.9–6.3 т/га (на 48.5–90.9% превышало контроль).

Содержание сухого вещества в продукции многолетних трав при внесении удобрений снижалась на 1–6%, но определенной закономерности не установлено. Наиболее важное значение в кормлении сельскохозяйственных животных является количество сырого протеина в кормах. Его содержание в клеверо-тимофеечном сене было равно 10.3–11.6%, в контроле – 9.0%.

В продукции сена многолетних трав содержание фосфора изменялось от 0.33 до 0.39%, калия – от 2.5 до 3.5% и кальция – от 0.51 до 0.67%, в контроле – 0.28, 2.0 и 0.37% соответственно.

Нитратный азот принимает активное участие в питании растений. В наших исследованиях количество нитратного азота варьировало от 36 до 124 мг/кг сырой массы, но это не представляло опасности, т.к. ПДК составляет 500 мг/кг сырой массы.

## ВЫВОДЫ

1. Длительные исследования по применению органических и минеральных удобрений показали, что наиболее эффективно на свойства дерново-подзолистой почвы воздействовало совместное внесение удобрений, особенно в высоких дозах. Применение ТНК 80 т/га и полной дозы NPK повышало содержание гумуса в почве до 2.5%, снижало количество обменной кислотности до 5.4 ед.  $pH_{KCl}$ , повышало содержание подвижного фосфора до 383 и обменного калия — до 255 мг/кг почвы.

2. Установлена высокая эффективность комплексного длительного применения удобрений. Наибольшие урожаи многолетних трав получены при совместном применении органических и минеральных удобрений — 5.8–7.5 т сухого вещества/га.

3. Наиболее значительно на качество многолетних трав влияло совместное применение удобрений, особенно в высоких дозах. Применение ТНК 80 т/га + 1 NPK снижало содержание сухого вещества до 21.2% (в контроле — 23.2%), повышало количество сырого протеина в продукции до 10.5% (в контроле — 9.0%), увеличивало количество фосфора, калия и кальция в биомассе.

4. Показано, что оптимальным приемом удобрения многолетних трав в кормовом севообороте Республики Коми является внесение ТНК 80 т/га и полной дозы NPK (N40P32K108), что позволяет получать максимальные урожаи трав высокого качества.

5. Энергетические коэффициенты в вариантах опыта составили 1.4–1.6, в контроле — 1.9 ед. Наибольший условный чистый доход при возделывании многолетних трав получен в варианте ТНК 80 т/га + 1 NPK и составил 57 тыс. руб./га.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заболоцкая Т.Г., Юдинцева И.И., Кононеко А.В. Северный подзол и удобрения. Сыктывкар, 1978. С. 94.
2. Войтович Н.В., Лобода Б.П. Оптимизация минерального питания в агроценозах Центрального Нечерноземья. М.: НИИСХ ЦРНЗ, 2005. С. 193.
3. Косолапов В.М. Роль кормопроизводства в обеспечении продовольственной безопасности России // Адаптив. кормопроизвод-во. 2010. № 1. С. 16–19.
4. Мерзлая Г.Е. Эффекты последствия минеральных и органических удобрений на дерново-подзолистой почве // Плодородие. 2019. № 1. С. 15–17.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. С. 315.
6. Журбицкий З.И. Влияние внешних условий на минеральное питание растений // Агрохимия. 1965. № 3. С. 65–75.
7. Шафран С.А., Кирпичников Н.А. Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // Агрохимия. 2019. № 1. С. 3–10.
8. Сычев В.Г., Шафран С.А. Прогноз плодородия почв Нечерноземной зоны в зависимости от уровня применения удобрений // Плодородие. 2019. № 2. С. 22–25.
9. Васильев А.А., Горбунов А.К. Влияние сорта и глубины посадки на получение планируемых урожаев картофеля // Рос. сел.-хоз. наука. 2019. № 4. С. 12–17.
10. Кобякова Т.И., Уфимцева Л.В. Оценка показателей плодородия почв сельскохозяйственных угодий северной лесостепи Зауралья // Агрохим. вестн. 2018. № 5. С. 2–5.
11. Чеботарев Н.Т., Броварова О.В. Эффективность минеральных удобрений и извести при возделывании многолетних трав на дерново-подзолистой почве Республики Коми // Кормопроизводство. 2022. № 2. С. 29–33.
12. Чеботарев Н.Т., Броварова О.В. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на продуктивность агроценозов Европейского Северо-Востока // Аграрн. наука. 2022. № 5. С. 87–92.
13. Золкина Е.И. Влияние длительного применения удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы и продуктивности культур // Плодородие. 2019. № 5. С. 20–23.
14. Анкудович Ю.Н. Эффективность длительного систематического внесения удобрений в зернопаротравяном севообороте на дерново-подзолистых почвах севера Томской области // Земледелие. 2018. № 2. С. 37–40.
15. Ямалтдинова В.Р., Завьялова Н.Е., Субботина М.Г. Влияние длительного применения систем удобрений на агрохимические и биологические показатели дерново-подзолистой почвы среднего Предуралья // Перм. аграрн. вестн. 2019. № 3 (27). С. 95–102.
16. Методические указания по проведению полевых опытов с удобрениями Географической сети. М.: ВИУА, 1985. С. 153.

## **The Effect of Long-Term Use of Organic and Mineral Fertilizers on the Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and the Productivity of Perennial Grasses in Forage Culture in the European North**

**N. T. Chebotarev<sup>a</sup> and O. V. Brovarova<sup>a,#</sup>**

*<sup>a</sup>Institute of Agrobiotechnology named A.V. Zhuravsky of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS  
Rucheynaya ul. 27, Syktyvkar 167023, Russian Federation*

*<sup>#</sup>E-mail: olbrov@mail.ru*

In a long-term stationary field experiment on sod-podzolic soil, the effectiveness of organic and mineral fertilizers and their effect on soil properties, yield and quality of perennial grasses in the feed six-field crop rotation was established. It was determined that the combined use of fertilizers most effectively affected the increase in soil fertility and the productivity of the clover-timothy mixture. The content of humus increased by 0.4–0.6%, mobile phosphorus by 70–150 mg/kg, metabolic and hydrolytic acidity decreased. The complex application of fertilizers, especially in high doses, most significantly increased the yield and quality of perennial grasses.

*Key words:* sod-podzolic soil, organic and mineral fertilizers, fodder crop rotation, humus, productivity, crude protein, dry matter, nitrates, yield.

УДК 633.491:631.445.51:631.671:631.81

## АМИНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ КЛУБНЕЙ ОРОШАЕМОГО КАРТОФЕЛЯ НА КАШТАНОВОЙ ПОЧВЕ ПРИ ВНЕСЕНИИ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ СЕРНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ФОНЕ ПРИМЕНЕНИЯ NPK<sup>1</sup>

© 2023 г. М. Г. Меркушева<sup>1,\*</sup>, Л. Л. Убугунов<sup>1</sup>, Л. Н. Болонева<sup>1</sup>, И. Н. Лаврентьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

\*E-mail: merkusheva48@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 25.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Установлено, что применение серных удобрений в дозах 15 и 30 кг/га (на фоне NPK) под орошаемый картофель на каштановых почвах Западного Забайкалья является наиболее эффективным для создания продукции товарных клубней с максимальной величиной биоэнергетического коэффициента. С возрастанием доз серы, несмотря на незначительное повышение содержания сырого протеина, количество аминокислот и индекс незаменимых кислот значительно увеличились по сравнению с контролем и фоном NPK. Отмечена замена лимитирующих серосодержащих аминокислот (метионин + цистин) на лейцин. Наибольшая биологическая ценность белка картофеля на уровне 72–74% выявлена при дозах 15 и 30 кг S/га (на фоне NPK).

**Ключевые слова:** каштановые почвы, орошение, картофель, минеральные удобрения, сера, продукция, аминокислотный состав, биологическая ценность белка клубней.

DOI: 10.31857/S0002188123080069, EDN: ZDTQGA

### ВВЕДЕНИЕ

Посевы картофеля производят более высокое количество протеина на 1 га, чем зерновые [1], а белок клубней превосходит другие продукты, такие как пшеница, рис или кукуруза, по пищевой ценности, стоимости выращивания и хранения [2, 3]. Картофельный белок имеет большую биологическую и пищевую ценность, сравнимую с яичным белком, а его химическая оценка (аминокислотный скор) меняется от 57 до 69 [4–7]. Предположительно, картофельные белки имеют более высокое качество по аминокислотному составу, что связано с генотипом [8]. Количество белка клубней на основе аминокислотного состава составляет ~70% от белка цельного куриного яйца с хорошим уровнем содержания лизина и низким — серосодержащих аминокислот (метионина и цистина) [9], что может снижать его пищевую ценность [10, 11]. Поэтому требуется регуляция минерального питания по содержанию и усвоению серы.

Сера необходима для деления и роста клеток растения, является незаменимым компонентом белков, входит в состав аминокислот (цистина, цистеина, метионина) и многих органических се-

росодержащих соединений (витаминов, липоевой кислоты, глутатиона и др.), участвует в окислительно-восстановительных процессах, усиливает фотосинтез и накопление хлорофилла в листьях [12–14]. Цистин и цистеин через биохимические реакции связаны с образованием углеводов [15, 16]. Аминокислоты также влияют на синтез и активность некоторых ферментов, экспрессию генов и редокс-гомеостаз [17]. Изменение содержания аминокислот в клубнях картофеля в основном связано с вариациями количества азота [18].

В настоящее время во всем мире сера признана 4-м основным питательным элементом для растений, после N, P и K [19]. Для поддержания роста клубней и получения урожая картофеля от 30 до 35 т/га необходимо использование серных удобрений [20–23]. Хотя картофель относится к группе растений с невысокими требованиями к сере, однако применение серных удобрений способствует улучшению качества клубней [23–27]. Дефицит серы в почвах или недостаточное применение серосодержащих удобрений под картофель являются одними из основных причин вырождения этой культуры [28].

Содержание белка в клубнях и его качество являются важными факторами питания, связанны-

<sup>1</sup> Работа выполнена по теме НИР (Госзадание 121030100228-4).

ми с аминокислотным составом, особенно с достаточным количеством метионина и лизина [29]. Значительное снижение качества белка, измеренного по индексу незаменимых аминокислот, обычно связано с увеличением содержания азота в клубнях и зависит от сортовых особенностей. Нужно учитывать разницу между пищевым и биологическим аспектами, в последнем незаменимые аминокислоты важнее, чем заменимые [7, 30].

Содержание и состав аминокислот и белков клубней картофеля изучали при различных условиях питания растений азотом и фосфором [31]. Клубни разных сортов картофеля существенно различаются по биологической ценности сырого протеина и накоплению в нем аминокислот [32]. Удобрение и почвенные условия являются важным фактором в накоплении белкового и небелкового азота, суммы незаменимых и критических аминокислот в клубнях [33–36]. Небольшие и умеренные дозы удобрений повышают биологическую ценность белка клубней орошаемого картофеля, тогда как повышенные дозы ее снижают [37]. Данные аминокислотного состава клубней картофеля при орошении и внесении серных удобрений в доступной литературе, в т.ч. для условий Западного Забайкалья, отсутствуют. Поэтому цель работы – изучение аминокислотного состава и биологической ценности клубней орошаемого картофеля при применении возрастающих доз серных удобрений на фоне применения NPK.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение влияния возрастающих доз серных удобрений на фоне NPK под картофель сорта Волжанин проводили на орошаемых каштановых супесчаных почвах в Иволгинском р-не Республики Бурятия (с. Иволгинск, N 51°44.6158'0", E 107°16.813'0", h – 544 м н. ур. м.) в 1986–2006 гг. Некоторые характеристики их свойств приведены ранее [38]. Здесь отметим, что валовое (общее) количество серы в каштановых супесчаных почвах невысокое, что связано с малой концентрацией органических веществ (1.5–2.0% гумуса). Распределение серы по профилю – постепенно убывающее на целине и практически нарастающее с глубиной профиля на орошаемой пашне с некоторым снижением в слое 100–120 см. Согласно градации почв по содержанию и запасам подвижной серы [39], каштановые почвы в слое 0–20 см отнесены к низкообеспеченным, хотя при орошении в нижележащих слоях этот показатель возрастает до среднего и высокого уровня. Каштановая почва опытного участка была слабо обеспечена подвижными формами азота, калия и многих микроэлементов.

Система обработки почвы и технология возделывания культуры – общепринятые для региона.

Схема опыта, варианты: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N120P60K120 (фон), 3 – фон + S15, 4 – фон + S30, 5 – фон + S60, 6 – фон + S120. Площадь опытной делянки 12.5 м<sup>2</sup>, повторность четырехкратная.

Посадку картофеля производили во 2-й половине мая по схеме 27 × 70 см, уборку осуществляли в конце первой–начале второй декады сентября. Макроудобрения вносили ежегодно: азотные – в виде N<sub>аа</sub>, фосфорные – P<sub>сд</sub>, калийные – K<sub>х</sub> и серные – сульфата аммония (с обязательным учетом содержащегося в нем азота) под глубокую предпосадочную культивацию. Фоновые дефицитные микроудобрения в виде сульфатов цинка, меди и кобальта также применяли под культивацию, но их вносили однократно в расчете на 3 года. Орошение проводили поливной нормой 300 м<sup>3</sup>/га 5–7 раз за вегетационный период в зависимости от погодных условий сезона.

Все химические анализы клубней картофеля выполнены в высушенных образцах. Это сделано в целях фиксации биохимического состава продукции, т.к. известно, что в извлеченных из почвы клубнях биохимические процессы хотя и замедляются, но все же продолжают идти. Содержание сухого вещества в клубнях определяли весовым методом, азота и сырого протеина – по Кьельдалю (N<sub>общ</sub> × 6.25), серы – весовым методом [40]. Расчет биоэнергетической эффективности серных удобрений при выращивании картофеля выполнен по методике Минеева [41]. Определение количества аминокислот после 22-часового гидролиза 6 M HCl при t = 105°C проводили на аминокислотном анализаторе марки Т-339М. Расчеты сделаны по методике [42]. Понятие биологическая ценность белков (БЦБ) включает в себя количественное содержание, основанное на точных определениях уровней содержания незаменимых аминокислот, сопоставимых с уровнем тех же аминокислот в стандартном полноценном белке куриного яйца. Оценка БЦБ клубней картофеля была произведена по показателю аминокислотного скор, индексу незаменимых аминокислот [43]. Аминокислота, скор которой имеет самый низкий показатель, называется первой лимитирующей аминокислотой. Величина скор этой аминокислоты определяет биологическую ценность и степень усвоения белков.

Статистическая обработка данных проведена в среде электронной таблицы Microsoft Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные урожайности картофеля как по годам исследований, так и в среднем за 3 года (табл. 1) свидетельствовали о весьма высокой эффективности фоновых удобрений, среди которых основ-

**Таблица 1.** Продуктивность товарных клубней орошаемого картофеля в зависимости от возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK), т/га

| Вариант                  | Вегетационный сезон |            |         |         | Прибавка урожайности по отношению к |    |      |   | Выход продукции на 1 кг S, кг клубней | Биоэнергетический КПД, ед. |
|--------------------------|---------------------|------------|---------|---------|-------------------------------------|----|------|---|---------------------------------------|----------------------------|
|                          | увлажненный         | засушливый | влажный | среднее | контролю                            |    | фону |   |                                       |                            |
|                          |                     |            |         |         | т/га                                | %  | т/га | % |                                       |                            |
| Контроль                 | 23.5                | 26.2       | 18.7    | 22.8    | —                                   | —  | —    | — | —                                     | —                          |
| N120P60K120 (фон)        | 28.6                | 35.6       | 32.3    | 32.2    | 9.4                                 | 41 | —    | — | —                                     | —                          |
| Фон + S15                | 29.9                | 38.5       | 32.7    | 33.7    | 10.9                                | 48 | 1.5  | 5 | 100                                   | 3.03                       |
| Фон + S30                | 32.1                | 38.3       | 32.6    | 34.3    | 11.5                                | 50 | 2.1  | 7 | 70                                    | 2.95                       |
| Фон + S60                | 30.8                | 39.2       | 32.5    | 34.2    | 11.4                                | 50 | 2.0  | 6 | 33                                    | 2.55                       |
| Фон + S120               | 29.5                | 40.2       | 34.5    | 34.7    | 11.9                                | 52 | 2.5  | 8 | 21                                    | 2.13                       |
| S <sub>x</sub> , %       | 2.0                 | 2.2        | 1.4     | 2.6     |                                     |    |      |   |                                       |                            |
| HCP <sub>05</sub> , т/га | 1.7                 | 2.4        | 1.3     | 2.7     |                                     |    |      |   |                                       |                            |

ная роль, как установлено ранее, принадлежит азотным и калийным удобрениям. Применение возрастающих доз серы на фоне N120P60K120 очень слабо влияло на продуктивность культуры. Прибавка урожая в среднем за 3 года оказалась практически на уровне ошибки опыта, т.е. следует выделить только тенденцию к повышению выхода товарных клубней при применении серных удобрений.

Величина биоэнергетического коэффициента была максимальной при внесении серы в дозах 15 и 30 кг/га и снижалась с увеличением дозы. Однако, несмотря на это, все же можно считать, что внесение серных удобрений в дозах 15–30 кг/га экономически рентабельно: выход дополнительной продукции на 1 кг внесенной серы был очень высоким — 70–100 кг клубней.

Внесение возрастающих доз серных удобрений под орошаемый картофель незначительно увеличивало содержание сырого протеина, однако существенно повышало количество аминокислот, в том числе незаменимых, в сухом веществе клубней картофеля в 1.35–1.8 раза по сравнению с контролем и в 1.2–1.5 раза — с фоном (табл. 2). Доля незаменимых аминокислот в общей сумме была относительно стабильной — 30–35%. Возрастало и содержание аминокислот в сыром протеине, повышался сбор аминокислот урожаем клубней, но одновременно снижалась оплата аминокислотами 1 кг внесенной серы. Самая высокая оплата была при применении серы 15 и 30 кг/га. Поэтому с учетом содержания и соотношения аминокислот, сбора и оплаты 1 кг внесенной серы аминокислотами доза S30 являлась самой оптимальной при выращивании картофеля на орошаемых каштановых почвах.

Возрастание доз серных удобрений способствовало постепенному увеличению содержания

как незаменимых, так и заменимых аминокислот в клубнях (табл. 3). Тем не менее, интенсивность их накопления снижалась с увеличением количества внесенной серы. Эта тенденция относится также к серосодержащим аминокислотам. Критические аминокислоты — это особо важные вещества, влияющие на реализацию генетического потенциала и способствующие образованию новых молекул белка. В клубнях картофеля критические аминокислоты представлены треонином, метионином, лизином [36].

Аминокислоту, обладающую самым низким скором в белке, называют лимитирующей. Она определяет степень усвоения всего белка, поскольку аминокислоты, поступающие в организм с пищей в избытке относительно лимитирующей, не используются на биосинтез белков и не запасаются впрок. Они быстро распадаются в процессе обмена веществ и выводятся из организма. Все аминокислоты, требуемые для биосинтеза белков, должны присутствовать в клетке одновременно и в доступной форме. В белках с низкой пищевой ценностью лимитирующих аминокислот со скором <100% может быть несколько, в таком случае аминокислота с наименьшим скором считается первой лимитирующей [44].

Использование серных удобрений способствовало увеличению индекса незаменимых кислот и замене лимитирующих аминокислот (метионин + цистин) на лейцин. Возможно, что это было связано с сортовыми особенностями исследованных клубней, хотя известно, что лейцин является аминокислотой, ограничивающей качество белка, содержащегося в сортах картофеля с фиолетовой и красной мякотью, тогда как в сортах с желтой мякотью это в первую очередь, серосодержащие аминокислоты [45].

**Таблица 2.** Содержание аминокислот в сухом веществе и сыром протеине клубней орошаемого картофеля в зависимости от возрастающих доз серных удобрений

| Вариант           | Сырой протеин, % | Аминокислоты, г/кг | Незаменимые аминокислоты |                        | Содержание аминокислот в протеине, % | Сбор аминокислот, кг/га* |                    | Оплата 1 кг серы аминокислотами, кг* |                     |
|-------------------|------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------|
|                   |                  |                    | г/кг                     | % от суммы аминокислот |                                      | общая сумма              | в т.ч. незаменимых | общей суммой                         | в т.ч. незаменимыми |
| Контроль          | 9.51             | 42.5               | 14.4                     | 33.8                   | 44.7                                 | 969                      | 328                | —                                    | —                   |
| N120P60K120 (фон) | 9.96             | 49.5               | 16.4                     | 30.1                   | 49.7                                 | 1590                     | 527                | —                                    | —                   |
| Фон + S15         | 10.14            | 57.4               | 19.1                     | 33.2                   | 56.6                                 | 1940                     | 623                | 22.7                                 | 6.4                 |
| Фон + S30         | 11.12            | 63.6               | 20.9                     | 32.9                   | 57.2                                 | 2180                     | 718                | 19.6                                 | 6.4                 |
| Фон + S60         | 11.38            | 70.6               | 23.7                     | 33.6                   | 62.0                                 | 2410                     | 812                | 13.7                                 | 4.7                 |
| Фон + S120        | 11.06            | 74.7               | 26.4                     | 35.3                   | 67.6                                 | 2590                     | 915                | 8.3                                  | 3.2                 |
| HCP <sub>05</sub> | 0.29             | 1.0                | 0.3                      |                        |                                      |                          |                    |                                      |                     |

\*На натуральную влажность.

**Таблица 3.** Аминокислотный состав клубней орошаемого картофеля в зависимости от возрастающих доз серных удобрений, г/кг сухого вещества

| Аминокислота                   | Контроль | N120P60K120 (фон) | Фон + S15 | Фон + S30* | Фон + S60* | Фон + S120* |
|--------------------------------|----------|-------------------|-----------|------------|------------|-------------|
| Незаменимые                    |          |                   |           |            |            |             |
| Лизин*                         | 1.74     | 2.24              | 2.46      | 2.60       | 2.98       | 3.48        |
| Гистидин                       | 0.76     | 0.96              | 1.17      | 1.28       | 1.76       | 2.12        |
| Треонин*                       | 1.89     | 2.00              | 2.35      | 2.51       | 2.87       | 3.10        |
| Валин                          | 2.34     | 2.51              | 2.79      | 3.10       | 3.46       | 3.89        |
| Метионин*                      | 0.37     | 0.58              | 0.80      | 0.92       | 1.20       | 1.28        |
| Изолейцин                      | 2.08     | 2.42              | 2.82      | 3.20       | 3.36       | 3.84        |
| Лейцин                         | 2.73     | 2.90              | 3.00      | 3.12       | 3.48       | 3.76        |
| Фенилаланин                    | 2.46     | 2.76              | 3.68      | 4.20       | 4.62       | 4.90        |
| *Сумма критических аминокислот | 4.00     | 3.78              | 5.61      | 6.03       | 7.05       | 7.86        |
| Заменимые                      |          |                   |           |            |            |             |
| Аспарагиновая                  | 6.42     | 7.77              | 9.24      | 11.00      | 11.60      | 11.74       |
| Серин                          | 2.36     | 2.78              | 2.99      | 3.24       | 3.70       | 3.78        |
| Глутаминовая                   | 5.24     | 6.66              | 8.10      | 9.00       | 9.84       | 10.00       |
| Пролин                         | 2.10     | 2.45              | 2.74      | 3.00       | 3.50       | 3.62        |
| Глицин                         | 2.56     | 2.70              | 2.97      | 3.24       | 3.48       | 3.68        |
| Аланин                         | 3.20     | 3.50              | 3.85      | 4.10       | 4.64       | 4.82        |
| Цистин                         | 0.37     | 0.63              | 0.81      | 1.00       | 1.17       | 1.46        |
| Тирозин                        | 2.62     | 2.92              | 3.00      | 3.13       | 3.75       | 3.78        |
| Аргинин                        | 3.26     | 3.72              | 4.64      | 5.00       | 5.17       | 5.48        |

\*Критические аминокислоты.

Эффективность влияния серных удобрений также проявилась в повышении биологической ценности белка клубней, особенно при внесении S15 и S30, тогда как высокие дозы серы снижали его ценность до уровня контроля (табл. 4).

## ВЫВОДЫ

1. Применение возрастающих доз серы на фоне N120P60K120 слабо влияло на продуктивность

культуры, но имело тенденцию к повышению выхода товарных клубней при применении серы. При этом величина биоэнергетического коэффициента была максимальной при внесении серы в дозах 15 и 30 кг/га и снижалась с увеличением дозы.

2. Несмотря на незначительное увеличение содержания сырого протеина в клубнях, его качество существенно возрастало за счет повышения количества аминокислот, в т.ч. незаменимых.

**Таблица 4.** Химический скор, индекс незаменимых аминокислот и биологическая ценность белка (БЦБ) клубней картофеля при внесении серных удобрений (на фоне NPK)

| Аминокислота                      | Контроль | N120P60K120<br>(фон) | Фон + S15 | Фон + S30 | Фон + S60 | Фон + S120 |
|-----------------------------------|----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Лизин                             | 48.7     | 67.9                 | 61.9      | 58.2      | 67.1      | 79.4       |
| Треонин                           | 72.7     | 83.3                 | 81.3      | 77.3      | 88.9      | 97.2       |
| Валин                             | 72.0     | 83.7                 | 77.2      | 76.4      | 85.7      | 97.6       |
| Метионин + цистин                 | 32.5*    | 57.6*                | 63.6      | 67.6      | 83.9      | 98.2       |
| Изолейцин                         | 80.0     | 100.8                | 97.5      | 98.5      | 104       | 120        |
| Лейцин                            | 60.0     | 69.0                 | 59.3*     | 54.9*     | 61.6*     | 67.4*      |
| Фенилаланин + тирозин             | 130      | 158                  | 154       | 150       | 173       | 182        |
| Индекс незаменимых<br>аминокислот | 70.9     | 88.6                 | 85.0      | 83.3      | 94.9      | 106        |
| БЦБ, %                            | 61.6     | 69.0                 | 74.3      | 71.6      | 66.7      | 61.4       |

\*Лимитирующие аминокислоты.

3. Использование серных удобрений способствовало увеличению индекса незаменимых кислот и замене лимитирующих аминокислот (метионин + цистин) на лейцин.

4. Эффективность влияния серных удобрений также проявилась в повышении биологической ценности белка клубней, особенно при применении S15 и S30, тогда как высокие дозы серы снижали его ценность до уровня контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FAO, 2009: Statistics Division. [online]. [Cit. 2010-01-02] Available from: FAOSTAT. <https://www.fao.org>
2. Friedman M. Nutritional value of proteins from different food sources. A review // J. Agricult. Food Chem. 1996. V. 44. P. 6–29.
3. Lister C.E., Munro J. Nutrition and health qualities of potatoes – a future focus // Crop Food Res. Confident. Rep. № 143. New Zealand Institute for Crop & Food Research Limited Provate Bag 4704, Christchurch, New Zealand. 2000. P. 1–53.
4. Mitrus J., Stankiewicz C., Steć E., Kamecki M., Starczewski J. The influence of selected cultivation on the content of total protein and amino acids in the potato tubers // Plant Soil Environ. 2003. V. 4 (3). P. 131–134.
5. Pęksa A. Białko ziemniaczane charakterystyka właściwości (Potato protein, the profile of properties) // Postępy Nauk Rolniczych. 2003. V. 5. P. 79–94.
6. Pęksa A., Rytel E., Kita A., Lisińska G., Tajner-Czopek A. The properties of potato protein // Potato: Food, nutrition and health. Japan: Global Sci. Books, 2009. P. 79–87. Food 3, Special Iss. 1.
7. Černá M., Kráčmar S. The effect of storage on the amino acids composition in potato tubers // Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun. 2010. V. 58. Iss. 5. P. 49–56. <https://doi.org/10.11118/actaun201058050049>
8. Galdón B.R., Mesa D.R., Rodríguez E.M., Romero C.D. Amino acid content in traditional potato cultivars from Canary Islands // J. Food Composit. Analys. 2010. V. 23. P. 148–153.
9. Bártoová V., Bárta J., Brabcová A., Zdráhal Z., Horacková V. Amino acid composition and nutritional value of four cultivated South American potato species // J. Food Composit. Analys. 2015 (June). V. 40. P. 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.12.006>
10. Goo Y.M., Kim T.W., Lee M.K., Lee S.W. Accumulation of PrLeg, a perilla legumin protein in potato tuber results in enhanced level of sulphur-containing amino acids // Comptes Rendus Biol. 2013. T. 336. V. 9. P. 433–439.
11. Valcarcel J., Reilly K., Gaffney M., O'Brien N. Total carotenoids and l-ascorbic acid content in 60 varieties of potato grown in Ireland // Potato Res. 2015. № 58. P. 29–41.
12. Blair G.J. Sulfur fertilizers: A global perspective // Inter. Fertil. Soc. 2002. Proceedings No. 498. UK, York, P. 1–36.
13. Blake-Kalff M.M.A., Zhao F.J., McGrath S.P. Sulfur deficiency diagnosis using plant tissue analysis // Inter. Fertil. Soc. 2002. Proceedings No. 503. UK, York, P. 1–22.
14. De Kok L.J., Castro J.A., Durenkamp M., Stuiver C.E., Westerman S., Yang L., Stulen I. Sulfur in plant physiology // Inter. Fertil. Soc. 2002. Proceedings No. 500. UK, York. P. 1–26.
15. Лебедев С.И. Физиология растений. М.: Колос, 1982. 403 с.
16. Плешков Б.П. Биохимия сельскохозяйственных растений. М.: Колос, 1975. 496 с.
17. Rai V.K. Role of amino acids in plant responses to stresses // Biol. Plant. 2002. V. 45. P. 481–487.
18. Eppendorfer W.H., Eggum B.O., Bille S.W. Nutritive value of potato crude protein as influenced by manuring and amino acid composition // J. Sci. Food Agric. 1979. V. 30. P. 361–368.
19. Prasad R., Shivay V.S. Sulphur in soil, plant and human nutrition // Proceedings of the National Academy of Sciences, India – Section B: Biological Sciences. 2016. V. 88 (2). P. 429–434. <https://doi.org/10.1007/s40011-016-0769-0>
20. Westermann D.T., Davis J.R. Potato nutritional management changes and challenges into the next century // Amer. Potato J. 1992. V. 69. P. 753–767.
21. Moinuddin U.S. Influence of combined application of potassium and sulfur on yield, quality, and storage behavior of potato // Commun. Soil Sci. Anal. 2004. V. 35. № 7–8. P. 1047–1060.

22. *Ming Xian Fan, Messick D.L.* Advances in sulfur fertilizer requirement and research for Chinese agriculture: Summary of field trial data from TSI's China project from 1997 to 2003 // *Proceedings of the 1 Sino-German Workshop on Aspects of Sulfur Nutrition of Plants* 23–27 May 2004 in Shenyang, China. Landbauforsch. Volkenrode. 2005. Sonderh. 2836. P. 15–21.
23. *Singh D.P., Seema J.A., Singh S.P., Singh V.* Effect of sulphur on yield, uptake of nutrients and economics of garlic (*Allium sativum*), onion (*Allium cepa*) and potato (*Solanum tuberosum*) in alluvial soil // *Ind. J. Agricult. Sci.* 2016. V. 86. Iss. 5. P. 661–665.
24. *Barczak B., Nowak K.* Effect of sulphur fertilisation on the content of macroelements and their ionic ratios in potato tubers // *J. Element.* 2015. V. 20(1). P. 37–47.
25. *Klikocka H., Kobińska A., Juszczak D., Głowacka A.* The influence of sulphur on phosphorus and potassium content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) // *J. Element.* 2015. T. 20. V. 3. P. 621–629.
26. *Muttucumaru N., Powers S.J., Elmore J.S., Mottram D.S., Halford N.C.* Effects of nitrogen and sulfur fertilization on free amino acids, sugars, and acrylamide-forming potential in potato // *J. Agricult. Food Chem.* 2013. V. 61. Iss. 27. P. 6734–6742.
27. *Klikocka H., Haneklaus S., Bloem E., Schnug E.* Einfluss der Schwefeldüngung auf den Befall von Kartoffelknollen (*Solanum tuberosum* L.) mit *Rhizoctonia solani* und *Streptomyces scabies* // *Jahresbericht. 2003 / Bundesforschungsanst. Landwirt. Braunschweig*, 2003. P. 14.
28. *Аристархов А.Н.* Агрохимия серы. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
29. *Rexen B.* Studies of protein of potatoes // *Potato Res.* 1976. V. 19. P. 189–202.
30. *Murray R.K., Granner D.K., Mayers P.A., Rodwell V.W.* *Harper's Biochemistry*. 24<sup>th</sup> ed. Appleton & Lange, 1998. 848 p.
31. *Тавровская О.Л.* Содержание и состав аминокислот и белков клубней картофеля при различных условиях питания растений азотом и фосфором: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1964. 20 с.
32. *Войцешина Н.И.* Сортные особенности аминокислотного состава клубней картофеля // *Вісн. Аграр. Науки*. 2000. № 9. С. 78–88.
33. *Бутов А.В.* Аминокислотный состав и биологическая ценность белков картофеля в зависимости от удобрений // *Научные исследования и разработки в агропромышленном комплексе Липецкой области: Сб. научн. тр. Вып. 2. Елец, 2007. С. 192–196.*
34. *Орлов А.Н., Володькин А.А.* Аминокислотный состав клубней картофеля в зависимости от применения регуляторов роста // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2008. № 1. С. 32–33.
35. *Фицура Д.Д.* Влияние удобрений, почвенных условий на основные биологические показатели клубней, предназначенных для производства картофель-лепродуктов // *Защита картофеля*. 2011. № 1. С. 26–34.
36. *Сокол С.В., Фицура Д.Д.* Влияние природных удобрений на продуктивность и аминокислотный состав клубней при выращивании картофеля по экологизированной технологии в Беларуси // *Защита картофеля*. 2014. № 1. С. 63–65.
37. *Бутов А.В., Мандрова А.А.* Урожай и качество картофеля при различных дозах удобрений в условиях капельного орошения // *Техника и технол. производств*. 2016. Т. 41. № 2. С. 125–131.
38. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н.* Сера в неорошаемых и орошаемых каштановых почвах и оценка применения возрастающих доз серных удобрений (на фоне НРК) под картофель // *Агрохимия*. 2023. № 3. С. 21–30.
39. *Смирнов Ю.А.* Повышение урожаев и качества сельскохозяйственной продукции при использовании серных удобрений. Обзорн. инфор-я. М., 1985. 61 с.
40. *Практикум по агрохимии. Учеб. пособ.: 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.*
41. *Минеев В.Г.* Агрохимия: уч.-к. М.: Изд-во МГУ, Колос, 2004. 720 с.
42. *Методика физиолого-биохимических исследований картофеля. М.: НИИКХ, 1989. 142 с.*
43. *Нечаев А.П., Траубенберг С.Е., Кочеткова А.А., Колпакова В.В., Витол И.С., Кобелева И.Б.* *Пищевая химия*. СПб.: ГИОРД, 2003. 640 с.
44. *Молчанова Е.Н., Суслияков Г.М.* Оценка качества и значение пищевых белков // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2013. № 1. С. 16–22.
45. *Peksa A., Miedzianka J., Nemš A.* Amino acid composition of flesh-coloured potatoes as affected by storage conditions // *Food Chem.* 2018. V. 266. P. 335–432.

## Amino Acid Composition and Biological Value of Irrigated Potato Tubers on Chestnut Soil at Increasing Doses of Sulfur Fertilizers (with NPK)

M. G. Merkusheva<sup>a, #</sup>, L. L. Ubugunov<sup>a</sup>, L. N. Boloneva<sup>a</sup>, and I. N. Lavrentieva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of General and Experimental Biology SB RAS  
ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: merkusheva48@mail.ru*

Application of sulfur fertilizers at the doses of 15 and 30 kg/ha (with NPK) for irrigated potatoes on chestnut soils of Western Transbaikalia is the most effective for production of marketable tubers with the maximum value of bioenergy coefficient. With increasing the doses of sulfur, in spite of the insignificant increase of crude protein content, the amount of amino acids and the index of essential acids significantly increased in comparison with the control and the background. Replacement of limiting sulfur-containing amino acids (methionine + cystine) with leucine was noted. The highest biological value of potato protein at the level of 72–74% was found at the doses of 15 and 30 S kg/ha (with NPK).

**Key words:** chestnut soils, irrigation, potatoes, mineral fertilizers, sulfur, products, amino acid composition, biological value of tuber protein.

УДК 631.81:631.811.095.337:633.16“321”(470.323)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ С МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ В ПОСЕВАХ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ В УСЛОВИЯХ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. Ж. Н. Минченко<sup>1</sup>, В. И. Лазарев<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Курский федеральный аграрный научный центр  
305021 Курск, ул. Карла Маркса, 70б, Россия

\*E-mail: vla190353@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 03.05.2023 г.

Принята к публикации 14.05.2023 г.

В результате проведенного в 2020–2022 гг. исследования установлена высокая эффективность и экологическая целесообразность применения комплексных удобрений с микроэлементами МикроФид Комплекс, МикроФид Цинк, МикроФид Бор, Реаком-Хелат Цинка и Реаком-Хелат Бора при возделывании ярового ячменя на черноземных почвах Курской обл. Использование комплексных удобрений МикроФид Комплекс, МикроФид Бор и МикроФид Цинк в виде обработки семян и посевов в фазах кущения и выхода в трубку обеспечило прибавку урожайности ярового ячменя 0.29–0.45 т/га (на 7.6–11.7%), рост белка в зерне на 0.7–0.9%, крупности зерна – на 0.9–1.2% относительно контрольного варианта. Применение моно-удобрений Реаком-Хелат Цинка и Реаком-Хелат Бора в сравнении с комплексными микроудобрениями было менее эффективным. Урожайность зерна ярового ячменя от их использования увеличилась на 0.29–0.34 т/га (на 7.6–8.9%), количество белка в зерне – на 0.1–0.2%, крупность зерна – на 0.2–0.4%. Отмечена тенденция к более высокой эффективности микроэлементных удобрений, содержащих бор: урожайность ярового ячменя от применения монохелатного удобрения Реаком-Хелат Бора была на 0.05 т/га больше, чем от удобрения Реаком-Хелат Цинка, комплексного удобрения МикроФид Бор – на 0.03 т/га больше, чем МикроФид Цинк. Применение микроэлементных удобрений в посевах ярового ячменя было экономически выгодно и экологически целесообразно.

**Ключевые слова:** яровой ячмень, микроэлементные удобрения, МикроФид Комплекс, МикроФид Цинк, микроФид Бор, Реаком-Хелат Цинка, Реаком-Хелат Бора, энергия прорастания семян, полевая всхожесть семян, ринхоспориоз, гельминтоспориоз, урожайность, структура урожая, содержание белка, экономическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188123080082, EDN: ZECNGW

### ВВЕДЕНИЕ

Яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L. *annua*) в Курской обл. является основной яровой зерновой культурой, от продуктивности которой во многом зависят валовые сборы зерна. В соответствии с системой земледелия области площади его посева в среднем за последние 10 лет составили 241 тыс. га, или 23.6% от площади посева зерновых культур. Средняя урожайность ярового ячменя за эти годы составила 3.91 т/га и изменялась от 2.62 т/га в 2013 г. до 5.22 т/га в 2022 г. (рис. 1).

Однако получение высоких и стабильных урожаев этой ценной зерновой культуры возможно лишь за счет освоения современных ресурсосберегающих, экологически безопасных технологий возделывания, основанных на широком исполь-

зовании биологических средств защиты растений, регуляторов роста и микроэлементных удобрений [1–4].

Биологической особенностью ярового ячменя является довольно короткий период вегетации (80–95 сут), и как следствие, короткий период потребления элементов минерального питания. Уже к фазе выхода в трубку ячмень потребляет из почвы до 67% калия, до 46% – фосфора и значительное количество азота [5].

С 1 т зерна и побочной продукцией ячмень выносит из почвы: азота – 29, фосфора – 12 и калия – 27.5 кг [6]. Поэтому важным агротехническим приемом возделывания ярового ячменя является грамотно построенная система удобрения, позволяющая обеспечивать растения элементами минерального питания с самого начала его периода

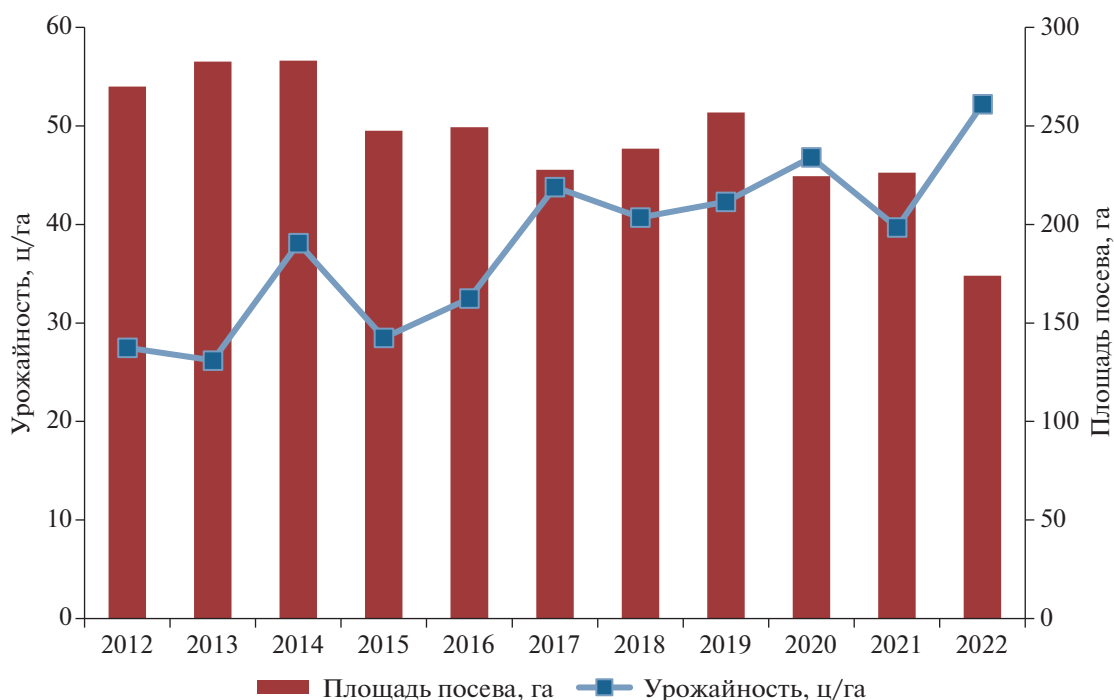


Рис. 1. Площади посева и урожайность ярового ячменя в Курской обл.

вегетации. Компенсировать недостаток питания позже практически невозможно [7, 8].

Основой современных технологий возделывания ярового ячменя, повышения его продуктивности и качества зерна, является научно обоснованная система удобрения, в которой важное значение принадлежит микроэлементным удобрениям (борным, молибденовым, медным, цинковым и др.) [9–11].

Использование таких удобрений при возделывании зерновых культур способствует изменению биохимической направленности обмена веществ в растениях, активизации работы ферментов, повышению сопротивляемости к различному роду заболеваний, в результате способствует увеличению урожайности и качества продукции [12]. Полученные ранее результаты исследований свидетельствуют о высокой отзывчивости ячменя на микроэлементные удобрения в хелатной форме. Например, в результате обработки семян удобрением марки ЖУСС увеличилась продуктивность колоса и крупность зерна, вследствие чего прибавка урожайности зерна составила 0.35–0.63 т/га [13].

В почвах, имеющих низкую обеспеченность микроэлементами, более эффективно внесение микроудобрений непосредственно в почву. В условиях средней обеспеченности почв целесообразнее совмещать обработку семян с некорневыми

подкормками посевов. Цинковые и борные удобрения рекомендуют вносить совместно с протравителем во время обработки семян. Медьсодержащие удобрения лучше вносить в виде некорневых подкормок в период вегетации ячменя [14, 15]. Установлено, что недостаток микроэлементов в почве резко снижает эффективность применения минеральных удобрений, содержащих макроэлементы, приводит к нарушению важнейших биологических процессов в растениях [16, 17].

На территории Курской обл. преобладают почвы, низко обеспеченные подвижными формами цинка, бора, марганца, меди. В большей степени это относится к серым лесным почвам всех подтипов, обладающих легким гранулометрическим составом и низким содержанием гумуса. Агрохимическое обследование почв 1-го агропочвенного района Курской обл. показало, что из общей площади обследованных почв 38% обладают низким содержанием подвижных форм бора, 58% – меди, 87% – марганца и 97% – цинка [18]. Отмечена общая закономерность распределения микроэлементов в почвенном покрове. Установлено, что их содержание повышается в направлении от северо-западных к юго-восточным районам области.

В настоящее время различные фирмы выпускают целый ряд микроэлементных удобрений, в которых микроэлементы находятся в легкоусвоя-

Таблица 1. Схема полевого опыта

| Вариант                   | Обработка семян | Обработка посевов<br>в фазе кущения | Обработка посевов<br>в фазе выхода в трубку |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1. Контроль без обработки |                 | —                                   | —                                           |
| 2. Реаком-Хелат Цинка     | 1.0 л/т         | 1.0 л/га                            | 1.0 л/га                                    |
| 3. Реаком-Хелат Бора      | 1.0 л/т         | 1.0 л/га                            | 1.0 л/га                                    |
| 4. МикроФид Комплекс      | 1.5 л/т         | 1.5 л/га                            | 1.5 л/га                                    |
| 5. МикроФид Цинк          | 1.5 л/т         | 1.5 л/га                            | 1.5 л/га                                    |
| 6. МикроФид Бор           | 1.5 л/т         | 1.5 л/га                            | 1.5 л/га                                    |

емой (хелатной) форме. Эти удобрения широко используют при возделывании сельскохозяйственных культур. Вместе с тем экспериментальные данные оценки эффективности использования различных видов микроудобрений в конкретных почвенно-климатических условиях практически отсутствуют. Поэтому определение эффективности различных видов микроэлементных удобрений при возделывании ярового ячменя, их влияния на урожайность и качество зерна в условиях Курской обл. является актуальной задачей и было целью данного исследования.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку эффективности микроудобрений проводили в 2020–2022 гг. в опытах лаборатории технологий возделывания полевых культур Курского ФАНЦ в зернопаровом севообороте: чистый пар—озимая пшеница—соя—яровой ячмень.

Объектом изучения в посевах ярового ячменя были монохелатные удобрения “Реаком-Хелат Цинка”, “Реаком-Хелат Бора” и комплексные микроудобрения “МикроФид Комплекс”, “МикроФид Цинк” “МикроФид Бор” при обработке семян и посевов в фазах кущения и начала выхода в трубку (табл. 1).

Агрохимическая характеристика почвы опытного участка имела следующие показатели: содержание гумуса в пахотном слое — 5.4% (по Тюрину), щелочногидролизуемого азота — 70 мг/кг, подвижного фосфора и обменного калия — 8.9 и 12.6 мг/100 г почвы (по Чирикову), реакция почвенной среды — pH 5.3. По содержанию подвижных форм бора (0.34 мг/кг) и меди (0.30 мг/кг), почва относится к среднеобеспеченной, а по содержанию цинка (0.32 мг/кг) и магния (4.50 мг-экв/100 г) — к низкообеспеченной.

Метеорологические условия в годы проведения исследования сложились удовлетворительно для роста и развития ярового ячменя, характеризовались теплой и влажной погодой и были ти-

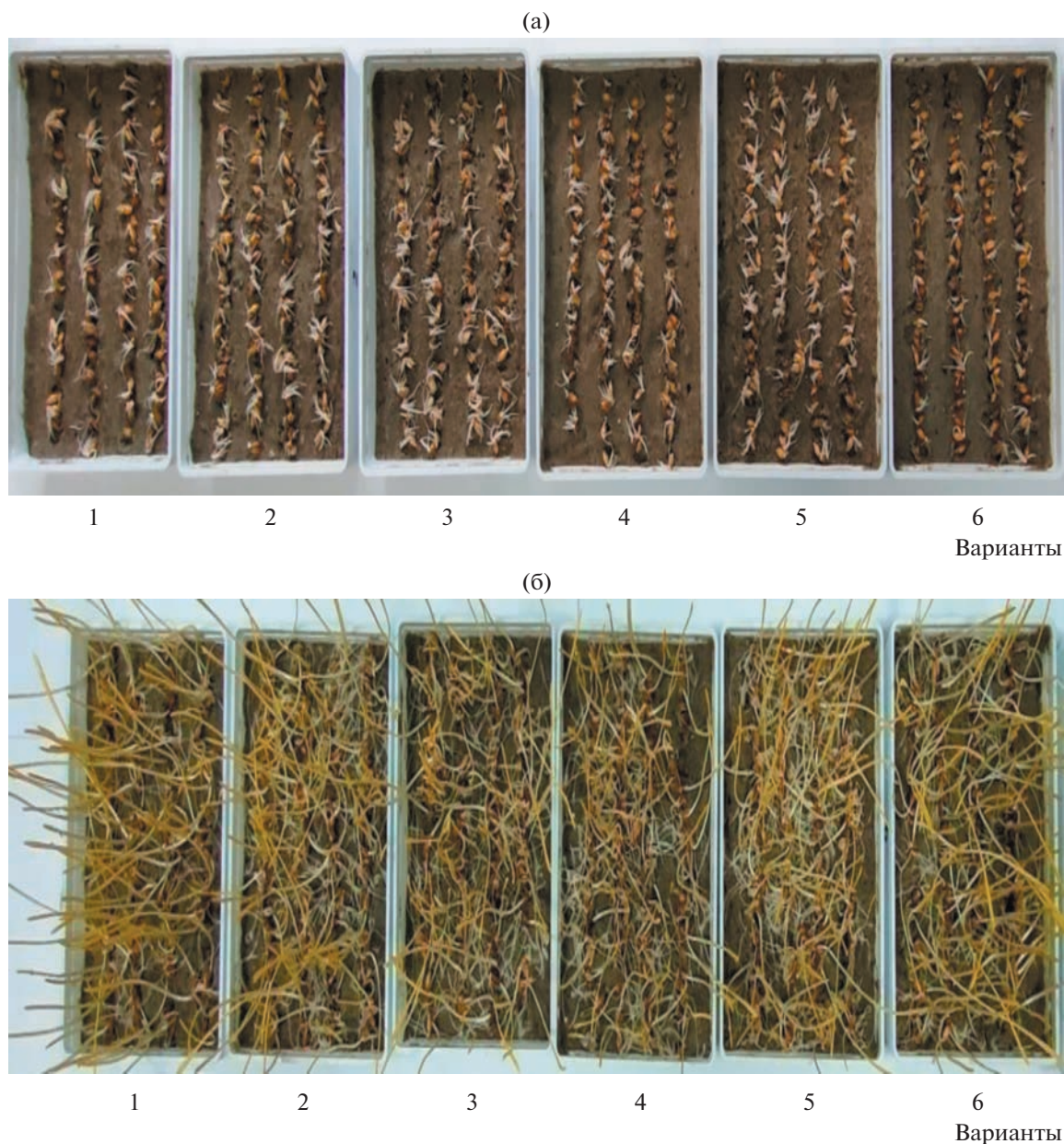
пичными для условий Курской обл. Среднесуточная температура вегетационного периода (май—июль) в 2020 г. составила 14.9°C, в 2021 г. — 15.7°C, в 2022 г. — 14.8°C, т.е. была соответственно на 0.7, 1.5 и 0.6°C выше среднемноголетней температуры этого периода (14.2°C). Сумма осадков за апрель—июль 2020 г. составила 213.6 мм, или 99.3% от нормы, в 2021 г. — 250.2 мм, или 116.4%, в 2022 г. — 254.6 мм, или 118.4% от среднемноголетнего их количества (215.0 мм).

Повторность в опыте трехкратная, варианты располагались систематически в один ярус. Делянки имели форму вытянутого прямоугольника, размер посевной делянки —  $5.4 \times 50 = 270 \text{ м}^2$ , учетной —  $200 \text{ м}^2$  ( $4 \times 50 \text{ м}$ ). В лабораторных условиях определяли влияние удобрений на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян ярового ячменя по ГОСТ 12038-84.

Полевые работы на опытном участке проводили в оптимальные агротехнические сроки с использованием районированного в области сорта ярового ячменя Прометей. Для посева использовали семена, отвечающие требованиям ГОСТа с поштучной нормой посева 4 млн шт. всхожих семян/га. Способ посева — рядовой (ширина междурядий 15 см). Глубина заделки семян — 4–5 см. Фон минерального питания — N30P30K30.

Обработку посевов ярового ячменя микроэлементными удобрениями проводили ранцевым опрыскивателем в соответствии со схемой опыта.

Уборка и учет урожая проводили самоходным комбайном “Сампо”, прямым комбайнированием. Пересчет урожая вели на 100%-ную чистоту и 14%-ную влажность зерна. Структуру урожая определяли по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (1985 г.). В образцах зерна определяли: содержание белка и крахмала на приборе-анализаторе зерна “Infra-tes™1241”, крупность зерна — по ГОСТ-10846-76, натуру зерна — по ГОСТ-10840-76. Статистическую обработку полученных экспериментальных данных проводили методом дисперсионного ана-



**Рис. 2.** Семена ячменя, обработанные микроэlementными удобрениями: (а) – на 3-и сут проращивания (энергия проращивания), (б) – на 7-е сут (лабораторная всхожесть). Варианты: 1 – контроль, 2 – “Реаком-Хелат Цинка”, 3 – “Реаком-Хелат Бора”, 4 – “МикроФид Комплекс”, 5 – “МикроФид Цинк”, 6 – “МикроФид Бор”.

лиза с использованием программ Microsoft Excel, Statistica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В лабораторных условиях проводили определение влияния микроэlementных удобрений на энергию проращивания и лабораторную всхожесть семян ярового ячменя. Результаты проращивания семян ярового ячменя показали, что микроэlementные удобрения увеличивали количество

проросших зерен на 3-и сут проращивания на 3–10% (энергия проращивания), и на 1–4% на 7-е сут (лабораторная всхожесть) в сравнении с вариантом, где семена микроэlementными удобрениями не обрабатывали (рис. 2).

Наиболее высокими стимулирующими свойствами обладали комплексные микроэlementные удобрения “МикроФид Комплекс” (1.5 л/т), “МикроФид Цинк” (1.5 л/т) и “МикроФид Бор” (1.5 л/т), обработка семян которыми повышала

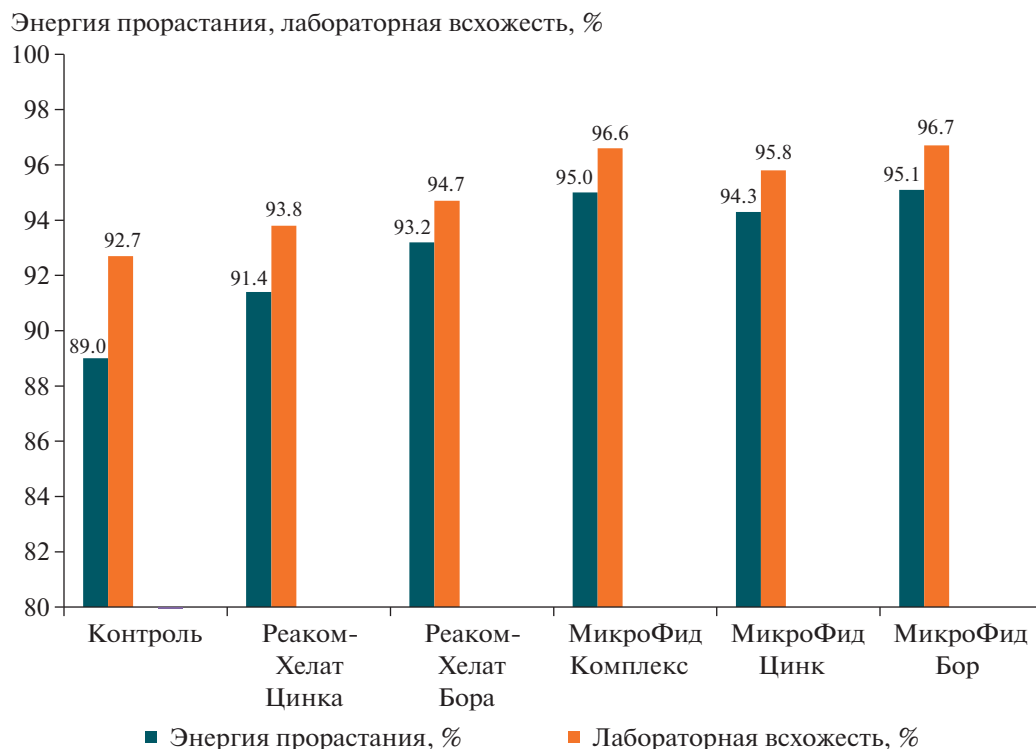


Рис. 3. Влияние микроэлементных удобрений на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян (2020–2022 гг.).

энергию прорастания на 5.3–6.1%, лабораторную всхожесть — на 3.1–4.0%. (рис. 3).

Использование монохелатных удобрений “Реаком-Хелат Цинка” (1.0 л/т) и “Реаком-Хелат Бора” (1.0 л/т) для браковки семян ярового ячменя было менее эффективно — энергия прорастания повышалась на 2.4–4.2%, а лабораторная всхожесть — на 1.1–2.0%.

Наиболее высокими стимулирующими свойствами обладали микроэлементные удобрения, содержащие бор. В вариантах с использованием микроэлементных удобрений “МикроФид Бор” (1.5 л/т) и “Реаком-Хелат Бора” (1.5 л/т) энергия прорастания повышалась на 4.2–6.1%, лабораторная всхожесть — на 2.0–4.0% в сравнении с контролем.

Проведенные полевые исследования показали высокую эффективность различных видов микроэлементных удобрений при возделывании ярового ячменя, их положительное влияние на рост и развитие растений, фитосанитарное состояние посевов, урожайность и качество зерна.

В годы проведения эксперимента в посевах ярового ячменя наблюдали поражение растений ринхоспориозом (*Rhynchosporium secalis*) и гельминтоспориозом (*Pyrenophorateres Drechsler*). Определение степени поражения растений ли-

стостебельными заболеваниями проводили в фазе начала колошения. В результате обследования установлено, что микроэлементные удобрения оказывали сдерживающее влияние на распространение листостебельных заболеваний: ринхоспориоза на — 2.9–4.5, гельминтоспориоза — на 2.7–3.4%, при развитии этих заболеваний в контрольном варианте равном 15.1 и 17.4% соответственно. Биологическая эффективность микроэлементных удобрений была примерно равной и составила: ринхоспориоз — 19.2–29.8%, гельминтоспориоз — 15.5–19.5% (рис. 4).

Микроэлементные удобрения, использованные при возделывании сои в качестве обработки семян и двукратной внекорневой подкормки, увеличили продуктивность ярового ячменя на 0.29–0.45 т/га (на 7.6–11.7%) по отношению к контролю. При анализе урожайных данных лучшие результаты были получены в вариантах с использованием комплексных микроэлементных удобрений “МикроФид Комплекс”, “МикроФид Бор” и “МикроФид Цинк”, использование которых способствовало получению урожайности ячменя 4.25–4.28 т/га (табл. 2).

Прибавки урожайности ярового ячменя от использования этих удобрений по сравнению с контролем составили 0.42–0.45 т/га или 10.9–11.7%.

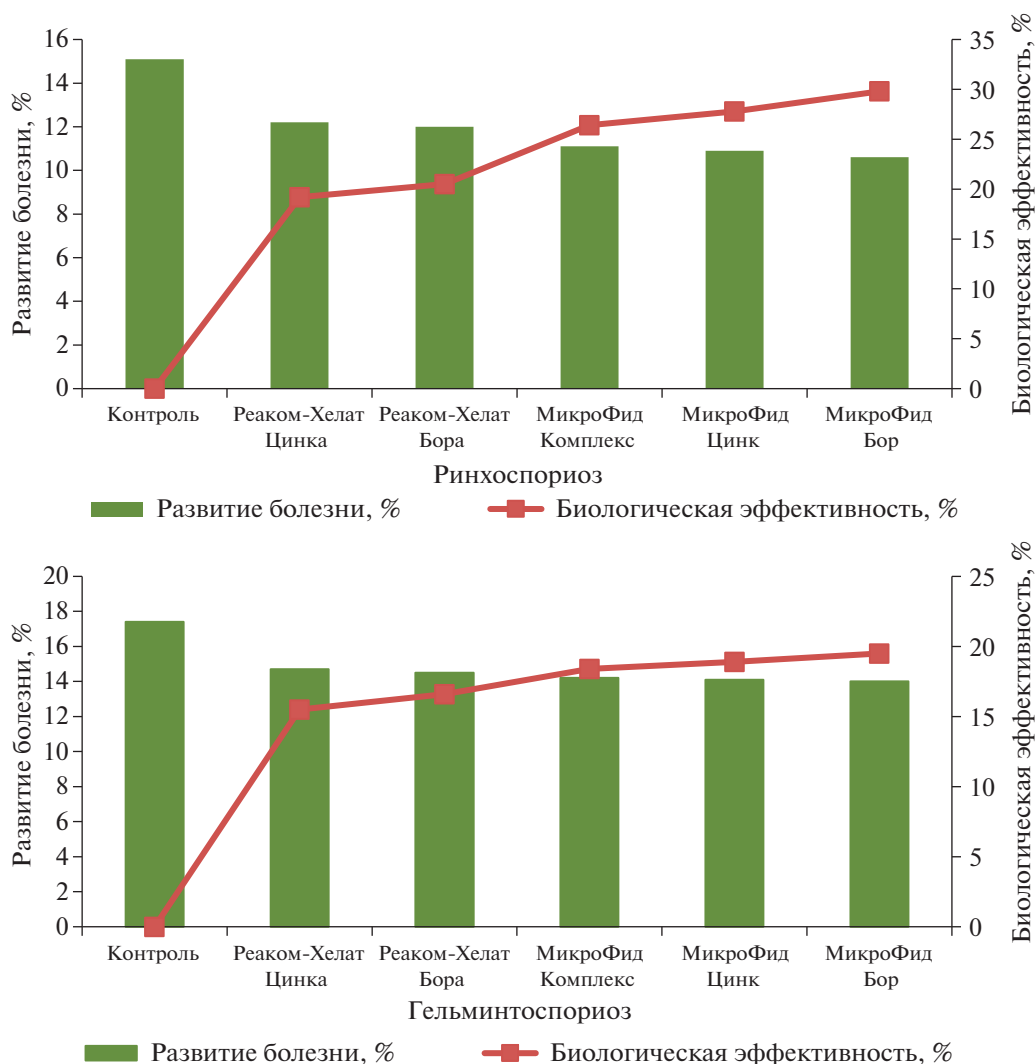


Рис. 4. Влияние микроэлементных удобрений на развитие листостебельных заболеваний ярового ячменя (2020–2022 гг.).

Эффективность обработки семян и двукратной обработки посевов монохелатными удобрениями марки “Реаком” (Реаком-Хелат Бора и Реаком-Хелат Цинка) была несколько меньше, прибавки урожайности ярового ячменя от их использования составили 0.29–0.34 т/га или 7.6–8.9% в сравнении с контролем (3.83 т/га). Наблюдали тенденцию к более высокой эффективности микроэлементных удобрений, содержащих бор: урожайность ярового ячменя от применения монохелатного удобрения “Реаком-Хелат Бора” была на 0.05 т/га больше, чем от удобрения “Реаком-Хелат Цинка”, а комплексного удобрения “МикроФид Бор” – на 0.03 т/га больше, чем удобрения “МикроФид Цинк”.

Внекорневая подкормка посевов ячменя в фазах кушения и выхода в трубку в сочетании с обработкой семян перед посевом способствовала ро-

сту количества продуктивных стеблей ячменя на 3–4 шт./м<sup>2</sup>, числа зерен в колосе – на 1.0–2.0 шт., массы 1000 зерен – на 0.7–1.0 г, натуры зерна – на 1.9–7.5 г/л (табл. 3).

Более высокие показатели структуры урожая обеспечивало применение комплексных микроэлементных удобрений марки МикроФид: количество продуктивных стеблей ярового ячменя в этих вариантах увеличивалось на 3–4 шт./м<sup>2</sup>, количество зерен в колосе – на 1–2 шт., масса 1000 зерен – на 0.8–1.0 г, натура зерна – на 6.9–7.5 г/л. Монохелатные удобрения повышали количество продуктивных стеблей на 3 шт./м<sup>2</sup>, число зерен в колосе – на 1 шт., массу 1000 зерен – на 0.7–0.8 г, натуру зерна – на 1.9–2.6 г/л.

При обработке семян и двукратной обработке посевов микроэлементными удобрениями в фазах кушения и выхода в трубку крупность зерна

**Таблица 2.** Урожайность ярового ячменя в зависимости от внесения микроэлементных удобрений (2020–2022 гг.)

| Вариант                                                                                         | Урожайность, т/га | Прибавка |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------|------|
|                                                                                                 |                   | т/га     | %    |
| 1. Контроль, без обработок                                                                      | 3.83              | —        | —    |
| 2. Реаком-Хелат Цинка: обработка семян (1.0 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.0 л/га) | 4.12              | 0.29     | 7.6  |
| 3. Реаком-Хелат Бора: обработка семян (1.0 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.0 л/га)  | 4.17              | 0.34     | 8.9  |
| 4. МикроФид Комплекс: обработка семян (1.5 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.5 л/га)  | 4.26              | 0.43     | 11.2 |
| 5. МикроФид Цинк: обработка семян (1.5 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.5 л/га)      | 4.25              | 0.42     | 10.9 |
| 6. МикроФид Бор: обработка семян (1.5 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.5 л/га)       | 4.28              | 0.45     | 11.7 |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub>                                                                        | 0.11              |          |      |

**Таблица 3.** Структура урожая ярового ячменя в зависимости от внесения микроэлементных удобрений (2020–2022 гг.)

| Вариант                                                                                         | Продуктивные<br>стебли, шт./м <sup>2</sup> | Зерна<br>в колосе, шт. | Масса<br>1000 зерен, г | Натура<br>зерна, г/л |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 1. Контроль, без обработок                                                                      | 431                                        | 23                     | 39.6                   | 627                  |
| 2. Реаком-Хелат Цинка: обработка семян (1.0 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.0 л/га) | 434                                        | 24                     | 40.3                   | 629                  |
| 3. Реаком-Хелат Бора: обработка семян (1.0 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.0 л/га)  | 434                                        | 24                     | 40.4                   | 629                  |
| 4. МикроФид Комплекс: обработка семян (1.5 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.5 л/га)  | 435                                        | 24                     | 40.6                   | 634                  |
| 5. МикроФид Цинк: обработка семян (1.5 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.5 л/га)      | 434                                        | 25                     | 40.4                   | 634                  |
| 6. МикроФид Бор: обработка семян (1.5 л/т) +<br>+ двукратная обработка посевов (1.5 л/га)       | 435                                        | 25                     | 40.5                   | 634                  |

повышалась на 0.2–1.2%, содержание белка в зерне — на 0.1–0.4%, крахмала — на 0.4–0.9%. Наблюдала тенденцию к более сильному влиянию комплексных микроэлементных удобрений марки МикроФид (МикроФид Комплекс, МикроФид Цинк и МикроФид Бор) на качество зерна ярового ячменя в сравнении с монохелатными микроэлементными удобрениями “Реаком-Хелат Цинка” и “Реаком-Хелат Бора”. Однако влияние различных видов микроэлементных удобрений при сравнении их между собой на показатели качества зерна ярового ячменя было практически равным и находилось в пределах наименьшей существенной разницы (табл. 4).

При расчете экономической эффективности использования микроэлементных удобрений в посевах ярового ячменя за основу были приняты следующие показатели. Стоимость микроэлементных удобрений: “МикроФид Комплекс” — 260 руб./л. “МикроФид Бор” — 320 руб./л, “Мик-

роФид Цинк” — 280 руб./л, “Реаком-Хелат Цинка” — 189 руб./л, “Реаком-Хелат Бора” — 202 руб./л, средняя закупочная цена зерна ярового ячменя — 12000 руб./т. При возделывании ярового ячменя в контрольном варианте (без применения микроэлементных удобрений) стоимость валовой продукции с 1 га составила 45960 руб., чистый доход — 24154 руб./га при уровне рентабельности равном 111%. В результате двукратной обработки посевов ярового ячменя в сочетании с обработкой семян микроэлементными удобрениями стоимость валовой продукции с 1 га увеличилась на 3480–5400 руб., сумма условно чистого дохода — на 2664–3976 руб./га, уровень рентабельности вырос на 7.8–11.2%, в сравнении с показателями, полученными в контрольном варианте.

Наиболее экономически эффективными в посевах ярового ячменя были комплексные микроэлементные удобрения “МикроФид Комплекс”,

**Таблица 4.** Влияние микроэлементных удобрений на качество зерна ярового ячменя (2020–2022 гг.)

| Вариант                                                                                    | Белок | Крахмал | Крупность зерна |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------|-----------------|
|                                                                                            | %     |         |                 |
| 1. Контроль, без обработок                                                                 | 11.4  | 51.5    | 95.4            |
| 2. Реаком-Хелат Цинка: обработка семян (1.0 л/т) + двукратная обработка посевов (1.0 л/га) | 11.5  | 51.9    | 95.6            |
| 3. Реаком-Хелат Бора: обработка семян (1.0 л/т) + двукратная обработка посевов (1.0 л/га)  | 11.6  | 52.0    | 95.8            |
| 4. МикроФид Комплекс: обработка семян (1.5 л/т) + двукратная обработка посевов (1.5 л/га)  | 11.8  | 52.3    | 96.5            |
| 5. МикроФид Цинк: обработка семян (1.5 л/т) + двукратная обработка посевов (1.5 л/га)      | 11.6  | 52.2    | 96.6            |
| 6. МикроФид Бор: обработка семян (1.5 л/т) + двукратная обработка посевов (1.5 л/га)       | 11.7  | 52.4    | 96.3            |
| <i>НСР<sub>05</sub></i>                                                                    | 0.2   | 0.5     | –0.6            |

“МикроФид Бор” и “МикроФид Цинк”. Двукратная некорневая обработка посевов в фазах кушения и выхода в трубку в сочетании с обработкой семян этими удобрениями обеспечивала получение 27 898–28 130 руб./га условно чистого дохода при уровне рентабельности 121–121%. Экономическая эффективность монохелатных удобрений “Реаком-Хелат Цинка” и “Реаком-Хелат Бора” была меньше: величина условно чистого дохода от использования этих удобрений составила 26 818–27 394 руб./га, уровень рентабельности – 119–121%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлена высокая эффективность использования различных видов микроэлементных удобрений в посевах ярового ячменя в почвенно-климатических условиях Курской обл. Обработка семян и двукратная обработка комплексными удобрениями с микроэлементами “МикроФид Комплекс”, “МикроФид Цинк” и “МикроФид Бор” посевов ярового ячменя сорта Прометей в фазах кушения и выхода в трубку повышала урожайность на 0.29–0.45 т/га или на 7.6–11.7%, крупность зерна – на 0.9–1.2%, содержание белка в зерне – на 0.7–0.9% в сравнении с вариантом, где микроэлементные удобрения не вносили. Использование моноудобрений “Реаком-Хелат Цинк” и “Реаком-Хелат Бор” в сравнении с комплексными микроудобрениями было менее эффективным. Рост урожайности ярового ячменя от их использования составил 0.29–0.34 т/га (на 7.6–8.9%), крупность зерна увеличилась на 0.2–0.4%, количество белка в зерне – на 0.1–0.2%. Отмечена тенденция к более высокой эф-

фективности микроэлементных удобрений, содержащих бор: урожайность ярового ячменя от применения монохелатного удобрения “Реаком-Хелат Бора” была на 0.05 т/га больше, чем от удобрения “Реаком-Хелат Цинка”, а комплексного удобрения “МикроФид Бор” – на 0.03 т/га больше, чем удобрения “МикроФид Цинк”.

Возделывание ярового ячменя с использованием микроудобрений марки МикроФид повышало стоимость валовой продукции на 5040–5400 руб./га, условно чистый доход – на 3744–3976 руб./га, уровень рентабельности – на 10.0–11.2%. Эффективность монохелатных микроэлементных удобрений марки Реаком при аналогичных способах внесения была меньше: стоимость валовой продукции от их использования повышалась на 3480–4080 руб./га, чистый доход – на 2664–3240 руб./га, уровень рентабельности – на 7.8–10.2%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюшин В.И. Минеральные удобрения как ключевой фактор развития сельского хозяйства и оптимизации природопользования // Достиж. науки и техн. АПК. 2016. Т. 30. № 3. С. 19–25.
2. Милащенко Н.З., Трушкин С.В. К проблеме освоения инновационных технологий // Плодородие. 2011. № 3. С. 50–52.
3. Аллахвердиев С.Р., Ерошенко В.И. Современные технологии в органическом земледелии // Международ. журн. фундамент. и прикл. исслед. 2017. № 1. С. 76–79.
4. Сычев В. Г. Перспективы использования новых агрохимикатов в современных агротехнологиях // Мат-лы докл. участников 10-й научн.-практ. конф. “Анапа-2018”. М., 2018. С. 3–7.

5. *Ториков В.Е.* Влияние условий возделывания на урожайность ярового ячменя // Вестн. Брянск. ГСХА. 2009. № 3. С. 38–43.
6. *Алметов Н.С.* Урожайность ячменя на дерново-слабоподзолистых почвах в зависимости от доз и соотношений минеральных удобрений // Агрохимия. 1996. № 1. С. 41–52.
7. *Барбасов Н.В.* Эффективность применения новых форм комплексных микроудобрений и регуляторов роста при возделывании среднепозднего сорта ячменя на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Вестн. Белорус. ГСХА. 2017. № 3. С. 85–89.
8. *Абашев В.Д.* Влияние минеральных удобрений на урожайность зерна ячменя // Пермс. аграрн. вестн. 2015. № 4 (12). С. 4–8.
9. *Федотова Е.Н.* Действие микроэлементов и биоудобрений на вынос питательных веществ растениями ярового ячменя из почвы и минеральных удобрений // Владимир. земледелец. 2016. № 4 (78). С. 23–25.
10. *Александрова Н.А.* Влияние микроэлементов на посевные качества семян ячменя сорта Раушан // Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы: мат-лы III нац. научн.-практ. конф. Кузбасс. ГСХА. 2019. С. 191–197.
11. *Бэлл Р.В., Дэлл Б.* Роль микроэлементов в устойчивом производстве продовольствия, кормов, волокон и биоэнергии. М.: Международ. ин-т питания раст., 2017. 244 с.
12. *Ксенз А.Я., Камбулов С.И., Дёмина Е.Б.* Влияние микроэлементных удобрений на продуктивность озимой пшеницы // Вестн. аграрн. науки Дона. 2016. № 4. С. 69–77.
13. *Гейгер Е.Ю., Варламова Л.Д., Семенов В.В.* Микроудобрения на хелатной основе: опыт и перспективы использования ПАВ // Агрохим. вестн. 2017. № 2. С. 29–32.
14. *Ягодин Б.Я., Вильямс М.В., Тимощук Н.В., Демьянова Т.А.* Определение оптимального соотношения N : P : K в удобрении при возделывании ячменя // Изв. ТСХА. 1989. Вып. 6. С. 35–41.
15. *Аристархов А.Н., Волков А.В., Яковлева Т.А.* Эффективность применения цинковых микроудобрений под яровую пшеницу на дерново-подзолистых почвах Центрального Нечерноземья // Плодородие. 2014. № 2. С. 9–12.
16. *Матяш И.С., Рыбина В.Н.* Влияние гуминовых и микроудобрений на урожайность зерна ярового ячменя. Мат-лы XXII Международ. научн.-производ. Конф. “Органическое сельское хозяйство: проблемы и перспективы” (28–29 мая 2018 г.). в 2-х т. Майский: Белгород. ГАУ, 2018. Т. 1. С. 133.
17. *Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Кизинек С.В.* Агрохимические основы применения удобрений. Май-коп: Полиграф-Юг, 2013. 572 с.
18. *Лазарев В.И., Минченко Ж.Н.* Эффективность микроэлементных удобрений марки МикроФид при обработке семян и посевах яровой пшеницы в условиях черноземных почв Курской области // Земледелие. 2020. № 3. С. 20–23.

## Effectiveness of the Use of Fertilizers with Trace Elements on Spring Barley Crops in the Conditions of the Kursk Region

Zh. N. Minchenko<sup>a</sup> and V. I. Lazarev<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>Kursk Federal Agrarian Scientific Center, ul. Karla Marxa 70b, Kursk 305021, Russia

<sup>#</sup>E-mail: vla190353@yandex.ru

As a result of the research conducted in 2020–2022, the high efficiency and environmental feasibility of using complex fertilizers with microelements MicroFid Complex, MicroFid Zinc, microFid Boron with Zinc Chelate Reagent and Boron Chelate reagent in the cultivation of spring barley on chernozem soils of the Kursk region was established. The use of complex fertilizers MicroFid Complex, MicroFid Boron and MicroFid Zinc in the form of seed treatment and sowing in the phases “tillering” and “exit into the tube” provided an increase in the yield of spring barley – 0.29–0.45 t/ha (on 7.6–11.7%), protein growth in grain by 0.7–0.9%, grain size by 0.9–1.2%, relative to the control variant. The use of mono-fertilizers Zinc Chelate Reagent and Boron Chelate Reagent in comparison with complex micronutrients was less effective. The increase in the yield of spring barley from their use increased by 0.29–0.34 t/ha (7.6–8.9%), the amount of protein in the grain – by 0.1–0.2%, grain size – by 0.2–0.4%. There was a tendency of higher efficiency of microelement fertilizers containing boron: the yield of spring barley from the use of monoselate fertilizer Reakom-Boron Chelate was 0.05 t/ha higher than from fertilizer Reakom-Zinc Chelate, and complex fertilizer MicroFid Boron – 0.03 t/ha higher than MicroFid Zinc. The use of trace element fertilizers on spring barley crops was economically profitable and environmentally sound.

**Key words:** spring barley, microelement fertilizers, MicroFid Complex, MicroFid Zinc, microFid Boron Zinc Chelate Reagent, Boron Chelate reagent, seed germination energy, field germination of seeds, rhizosporiosis, helminthosporiosis, yield, crop structure, protein content, economic efficiency.

УДК 631.811.98:633.11“324”(470.345)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО БИОПРЕПАРАТА НА ПОСЕВАХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

© 2023 г. А. С. Пронин<sup>1</sup>, Т. С. Колмыкова<sup>2</sup>, А. С. Лукаткин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева  
430005 Саранск, ул. Большевистская, 68, Россия

<sup>2</sup> Лицей № 31 г. Саранска  
430034 Саранск, ул. Металлургов, 2, Россия

\*E-mail: aslukatkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.02.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

В полевых условиях Республики Мордовия изучали влияние обработки семян и растений озимой пшеницы сортов Мироновская 808 и Скипетр комплексным биопрепаратом на основе совместно культивируемых штаммов PGPB *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* и PGPF *Saccharomyces cerevisiae* на рост растений и их продуктивность. Использовали обработку семян биопрепаратом в разведении водой в соотношении 1 : 100 и обработку растений в период вегетации в разведении 1 : 200. Комплексный биопрепарат повышал чистую продуктивность фотосинтеза и прирост листовой поверхности, увеличивал массу и объем корневой системы, но не влиял на высоту растений. Препарат обеспечивал рост зерновой продуктивности на 25–36% по сравнению с контролем. Стимулирующий эффект биопрепарата был сортоспецифичным.

**Ключевые слова:** озимая пшеница, сорт, комплексный биопрепарат, *Pseudomonas chlororaphis*, *Saccharomyces cerevisiae*, рост, масса, урожайность зерна.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080094, **EDN:** ZENTQT

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения питания человека во все эпохи остается актуальной [1], и для ее решения в сельском хозяйстве применяют различные технологии возделывания и культивирования растений с разным вегетационным периодом [2]. Озимые культуры — форма однолетних сельскохозяйственных зерновых (обычно злаковых), жизненный цикл которой требует перезимовки (от одного до нескольких месяцев) в условиях пониженных температур [3]. Данные культуры являются очень требовательными к плодородию почв и вносимым удобрениям; также на урожайность озимых культур влияют температура, адаптация сорта, наличие и величина снежного покрова, влажность, и ряд других факторов [4, 5].

Озимая пшеница по сравнению с яровой имеет ряд преимуществ, поскольку успевает до зимы раскуститься и укорениться, весной рано возобновляет рост и продуктивно использует весеннюю влагу, следовательно, меньше страдает от весенней засухи, превосходит в росте сорную растительность и хорошо глушит всходы многих

сорняков, раньше подходит к уборке и освобождает поля для обработок, предупреждает развитие ветровой и водной эрозии почвы, осенний посев и более ранняя уборка способствуют уменьшению нагрузки весенне-полевых и уборочных работ [6–8].

Одним из эффективных способов увеличения урожайности озимых культур наряду с внесением удобрений и подкормок является обработка семян и вегетирующих растений биопрепаратами на основе ростстимулирующих микроорганизмов [9]. Помимо повышения урожайности культур биопрепараты способствуют переходу к экологическому земледелию и получению экологических пищевых продуктов [10]. Однако вопрос подбора биопрепаратов и соответствующих штаммов бактерий для разных культур и сортов остается актуальным [11]. Биопрепараты должны обладать рядом свойств, в числе которых — антистрессовое действие, стимуляция роста вегетативной массы и корневой системы растений, наличие фитогормонов, бактерицидов для защиты от фитопатогенов, и т.п. [12–14]. Особо актуально совокупное

использование агроприемов и биологических препаратов, которые могут гарантировать высокую урожайность и защиту растений в условиях стресса.

На современном этапе активно изучают и оптимизируют технологии производства биопрепаратов. Для обеспечения высокой эффективности биопрепаратов при их создании используют стимулирующие рост растений штаммы бактерий (Plant Growth Promoting Bacteria, **PGPB**) и грибов (Plant Growth Promoting Fungi, **PGPF**) [15–17]. Микробиологические препараты представляют собой живые клетки микроорганизмов, отобраных на полезные свойства, которые находятся в культуральной жидкости (**КЖ**) либо адсорбированы на нейтральном носителе [17].

Ранее нами был создан комплексный биопрепарат (**КБП**) на основе **КЖ** совместно культивируемых штаммов микроорганизмов: бактерии *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* B-5326 и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-4317, способ получения биопрепарата подробно описан в работе [18]. Предварительный анализ показал рост-стимулирующую активность полученного **КБП**, который в лабораторных опытах повышал энергию прорастания и всхожесть ячменя, пшеницы и кукурузы [18].

Цель работы — изучить эффективность применения **КБП** на основе **КЖ** *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* B-5326 и *Saccharomyces cerevisiae* Y-4317 в посевах озимой пшеницы в полевых условиях Республики Мордовия. Для выполнения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить действие **КБП** на развитие и параметры роста растений 2-х сортов озимой пшеницы в полевых условиях Республики Мордовия.
2. Определить сравнительную эффективность использования биопрепарата на сортах озимой пшеницы в полевых условиях.
3. Выяснить влияние биопрепарата на продуктивность и структуру зерновой продуктивности озимой пшеницы.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые опыты с озимой пшеницей проводили в течение 2-х сезонов (2020/2021 и 2021/2022 гг.) на территории Республики Мордовия (Старошайговский р-н, ООО “Новотроицкое”) по общепринятой методике [19].

В работе использовали коммерчески приобретенные семена озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сортов Мироновская 808 и Скипетр. Обработку семян и растений проводили **КБП**, со-

зданным на основе *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* B-5326 + *Saccharomyces cerevisiae* Y-4317 [18]. Штамм бактерий *Pseudomonas chlororaphis* B-5326 впервые был выделен из нефтеносных слоев почвы (г. Дрогобыч, Украина) и получен в виде лиофилизата из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ “Курчатовский институт”—ГосНИИгенетика. Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-4317, первоначально выделенный из ягод винограда (Россия, Дагестан, с. Ерс), получен из той же коллекции. Размножение бактерий проводили на среде DMEM/F12 Merck (Sigma-Aldrich), штамма дрожжей — на среде Malt extract agar (Granu-Cult®).

Обработку проводили путем замачивания семян за 14 сут перед посевом в **КБП** на основе **КЖ** *Pseudomonas chlororaphis* B-5326 ( $10^7$  КОЕ/мл) + *Saccharomyces cerevisiae* Y-4317 ( $10^5$  КОЕ/мл) в разведении 1 : 100. Посев проведен 18.08.2020 г. и 15.08.2021 г. Почва участка — серая лесная, содержит ~3% гумуса, реакция среды слабокислая (pH 5.2–5.3). Расположение делянок систематическое, с севера на юг, площадь одной делянки 2 м<sup>2</sup> (120 × 167 см), повторность четырехкратная. По достижении растениями фазы кущения проводили 2-ю обработку путем опрыскивания растений **КЖ** в разведении 1 : 200. В качестве контроля использовали результаты, полученные на обработанных водой растениях озимой пшеницы.

Во время вегетации осуществляли уход за растениями, принятый в производственных условиях: поддерживали почву в свободном от сорняков состоянии, проводили дробную подкормку азотными удобрениями, осуществляли систему защитных мероприятий с использованием пестицидов Актара и Амистар-Экстра. Наблюдения за растениями начинали с появлением всходов, отмечали сроки наступления основных фенологических фаз (всходов, кущения, колошения, молочной спелости, восковой спелости, полной спелости).

По достижении растениями стадий кущения и колошения определяли площадь листовой поверхности ( $S_n$ ) одного растения и чистую продуктивность фотосинтеза (**ЧПФ**). При достижении большинством растений (не менее 70%) фазы молочной спелости зерна определяли сухую массу и объем корневой системы, высоту растений. В конце периода вегетации, при достижении растениями полной спелости зерна, проводили учет урожая: массу семян с одной делянки и массу 1000 семян [20], а также общую и продуктивную кустистость.

**Таблица 1.** Наступление фенологических фаз озимой пшеницы в 2020/2021 и 2021/2022 гг.

| Фенологическая фаза развития | 2020/2021 гг. |                           | 2021/2022 гг. |                           |
|------------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|
|                              | Дата          | Межфазный промежуток, сут | Дата          | Межфазный промежуток, сут |
| Всходы                       | 29.08.2020 г. | 11                        | 28.08.2021 г. | 13                        |
| Кушение                      | 10.09.2020 г. | 12                        | 11.09.2021 г. | 14                        |
| Колошение                    | 20.06.2021 г. | 263                       | 27.06.2022 г. | 269                       |
| Молочная спелость            | 5.07.2021 г.  | 15                        | 10.07.2021 г. | 13                        |
| Восковая спелость            | 14.07.2021 г. | 9                         | 19.07.2021    | 9                         |
| Полная спелость              | 20.07.2021 г. | 6                         | 26.07.2021 г. | 7                         |

Объем корневой системы растений пшеницы определяли методом Сабина—Колосова [21]. ЧПФ растений рассчитывали по формуле Веста—Бригса:

$$\text{ЧПФ} = (B_2 - B_1) / 0.5(S_{л1} + S_{л2}) \cdot n,$$

где ЧПФ — чистая продуктивность фотосинтеза, г/м<sup>2</sup>/сут,  $B_1$  и  $B_2$  — сухая масса растений в начале и в конце учетного периода, г;  $S_{л1}$  и  $S_{л2}$  — площадь зеленых листьев в начале и в конце учетного периода, м<sup>2</sup>;  $n$  — время между двумя определениями, сут [21].

Все определения проведены не менее чем в 10 биологических повторностях (растений одного варианта опыта). Статистическую обработку полученных данных проводили стандартными биометрическими методами с помощью пакета прикладных программ Microsoft Excel. Экспериментальные данные, характеризующие рост и продуктивность растений, представлены в таблицах в виде средних арифметических ( $M$ ) с ошибками среднего квадратичного отклонения ( $SE$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При выращивании растений озимой пшеницы была проведена фиксация сроков наступления фенологических фаз развития (табл. 1). Из представленных данных видно несколько замедленное развитие растений в сезоне 2021/2022 гг. При этом различий в прохождении фенологических фаз между контрольными и обработанными КБП растениями не выявлено, как и между изученными сортами.

В основе продукционного процесса, ведущего к созданию урожая, лежит фотосинтетическая деятельность растений — ассимиляция  $\text{CO}_2$ , образование органического вещества. При рассмотрении посева как фотосинтезирующей системы очевидно, что величина сухой массы, создаваемой за вегетационный период, или ее прирост за определенный период, зависят от величины сред-

ней площади листьев, продолжительности периода и чистой продуктивности фотосинтеза за этот период [22]. В работе изучили формирование листовой поверхности пшеницы в фазах кушения и колошения (табл. 2). Анализ результатов показал, что у растений сорта Мироновская 808 величина  $S_{л1}$  варьировала от 38.4 до 53.9 см<sup>2</sup>/растение в фазе кушения и от 139 до 161 см<sup>2</sup>/растение в фазе колошения. Закономерно, что площадь листовой поверхности растений была больше в фазе колошения за счет увеличения количества листьев на растении. Также были заметны различия  $S_{л1}$  по годам. И в 2020/2021, и в 2021/2022 гг. отметили общую закономерность: у растений, обработанных биопрепаратом, площадь листовой поверхности увеличивалась, особенно значительно в стадии кушения, когда прирост  $S_{л1}$  относительно контроля составил 29 и 32% (для 2020 и 2021 гг. соответственно). В стадии колошения также отметили увеличение листовой поверхности по сравнению с контролем, но в меньшей степени: на 16% в 2022 г. и недостоверное различие с контролем в 2021 г. На основании полученных данных можно сделать заключение, что предпосевная обработка семян озимой пшеницы КЖ на базе *Pseudomonas chlororaphis* и *Saccharomyces cerevisiae* оказала стимулирующее действие на рост листьев.

Увеличение листовой поверхности влияет на фотосинтетическую активность растений [22]. Однако ЧПФ зависит не только от площади листьев, но и от совокупности факторов и условий произрастания растений. Величины ЧПФ растений сорта Мироновская 808 в стадии кушения были меньше, чем в последующей стадии колошения. Обработка биопрепаратом значительно повлияла на величину ЧПФ: в 2020/2021 г. ЧПФ на стадии кушения обработанных биопрепаратом растений увеличилась в среднем на 46% по сравнению с контролем, в то время как площадь листовой поверхности возросла на 29%. В этом же году на стадии колошения ЧПФ повысилась на

**Таблица 2.** Влияние обработки биопрепаратом на параметры фотосинтетической активности растений озимой пшеницы

| Показатель                                          | Контроль (без обработки) |              | Обработка КБП |              |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|--------------|---------------|--------------|
|                                                     | 2020/2021 г.             | 2021/2022 г. | 2020/2021 г.  | 2021/2022 г. |
| Сорт Мироновская 808                                |                          |              |               |              |
| $S_d$ в стадии кушения, см <sup>2</sup> /растение   | 38.4 ± 1.6               | 40.9 ± 1.9   | 49.5 ± 2.4    | 53.9 ± 2.5   |
| $S_d$ в стадии колошения, см <sup>2</sup> /растение | 146 ± 7                  | 139 ± 7      | 160 ± 8       | 161 ± 8      |
| ЧПФ в стадии кушения, г/м <sup>2</sup> /сут         | 3.53 ± 0.18              | 4.28 ± 0.22  | 5.17 ± 0.24   | 6.67 ± 0.30  |
| ЧПФ в стадии колошения, г/м <sup>2</sup> /сут       | 4.63 ± 0.22              | 5.25 ± 0.26  | 6.20 ± 0.33   | 6.78 ± 0.34  |
| Сорт Скипетр                                        |                          |              |               |              |
| $S_d$ в стадии кушения, см <sup>2</sup> /растение   | 46.7 ± 2.2               | 49.0 ± 2.3   | 58.0 ± 2.8    | 59.5 ± 2.7   |
| $S_d$ в стадии колошения, см <sup>2</sup> /растение | 165 ± 7                  | 164 ± 7      | 176 ± 7       | 172 ± 9      |
| ЧПФ в стадии кушения, г/м <sup>2</sup> /сут         | 3.86 ± 0.22              | 4.15 ± 0.29  | 4.87 ± 0.23   | 6.15 ± 0.26  |
| ЧПФ в стадии колошения, г/м <sup>2</sup> /сут       | 5.10 ± 0.21              | 5.35 ± 0.26  | 6.65 ± 0.22   | 6.96 ± 0.29  |

34% по сравнению с необработанными растениями, хотя  $S_d$  — всего на 10%. Применение КБП в 2021/2022 г. показало сходные результаты: оно способствовало увеличению ЧПФ на 56% в фазе кушения и на 29% в фазе колошения по сравнению с контрольными растениями. Отсюда можно предположить, что стимулирующий эффект созданного КБП в отношении активности фотосинтеза обусловлен не только увеличением площади поверхности листьев.

У растений озимой пшеницы сорта Скипетр отметили несколько отличающиеся результаты (табл. 2). Так же, как и у предыдущего сорта, КБП стимулировал развитие ассимиляционной поверхности растений в фазе кушения: в 2021 г. — на 24% к контролю, в 2022 г. — на 21%, т.е. выявлен ростстимулирующий эффект. Однако на стадии колошения обнаружена лишь тенденция к увеличению  $S_d$  при обработке биопрепаратом, поскольку различия с контролем были недостоверными.

В более значительной степени обработка биопрепаратом увеличила показатели продуктивности фотосинтеза растений пшеницы сорта Скипетр: в 2021 г. ЧПФ превысила контроль на 26 и 30% в фазах кушения и колошения соответственно; в 2022 г. это превышение составило 48 и 30%.

Анализируя данные, полученные на 2-х сортах озимой пшеницы, можно сделать вывод о том, что КБП на основе *Pseudomonas chlororaphis* и *Saccharomyces cerevisiae* в большей степени стимулировал фотосинтетическую активность по сравнению с приростом листовой поверхности. Это дает право предположить, что биопрепарат на основе 2-х групп микроорганизмов способствовал уве-

личению притока веществ к растению, в том числе и за счет минерализации органических веществ почвы [23, 24].

Возможно также, что КБП стимулировал развитие корневой системы, поэтому на следующем этапе работы определяли массу и объем корневой системы, а также высоту надземной части в фазе молочной спелости зерна (табл. 3). У растений сорта Мироновская 808 обработка семян и растений КЖ *Pseudomonas chlororaphis* и *Saccharomyces cerevisiae* стимулировала более интенсивный рост корневой системы, масса корней по сравнению с контролем увеличилась на 20% в 2021 г. и на 17% в 2022 г. Важным показателем, определяющим поглотительную способность растений, является объем корневой системы. Он возрос по сравнению с контролем на 24% в 2022 г. (в 2021 г. обнаружена лишь тенденция к увеличению, поскольку различия с контролем недостоверны). Различия высоты стебля между контрольными и обработанными биопрепаратом растениями были в пределах ошибки.

У растений пшеницы сорта Скипетр выявлены сходные результаты: КБП стимулировал рост корневой системы, но не оказал влияния на высоту стебля. В результате действия КЖ микроорганизмов масса корней увеличилась по сравнению с контролем на 20–22% в оба года наблюдения. Однако объем корневой системы показал лишь тенденцию к увеличению по сравнению с контролем (различия недостоверны при  $P = 0.05$ ).

Таким образом, КБП в полевом опыте с растениями озимой пшеницы стимулировал развитие листовой поверхности, корневой системы (причем это стимулирующее действие имело сорто-

**Таблица 3.** Влияние обработки биопрепаратом на параметры роста растений озимой пшеницы в фазе молочной спелости зерна

| Показатель                              | Контроль (без обработки) |                  | Обработка биопрепаратом |                  |
|-----------------------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
|                                         | 2020/2021 г.             | 2021/2022 г.     | 2020/2021 г.            | 2021/2022 г.     |
| Сорт Мироновская 808                    |                          |                  |                         |                  |
| Масса корней, г                         | $38.5 \pm 1.7$           | $37.4 \pm 1.8$   | $46.3 \pm 1.8$          | $43.8 \pm 1.5$   |
| Объем корневой системы, см <sup>3</sup> | $0.61 \pm 0.029$         | $0.54 \pm 0.025$ | $0.69 \pm 0.031$        | $0.67 \pm 0.033$ |
| Высота растений, см                     | $82.6 \pm 3.7$           | $84.5 \pm 3.5$   | $84.2 \pm 4.4$          | $85.6 \pm 3.7$   |
| Сорт Скипетр                            |                          |                  |                         |                  |
| Масса корней, г                         | $36.8 \pm 1.8$           | $35.4 \pm 1.7$   | $44.3 \pm 2.1$          | $42.9 \pm 2.1$   |
| Объем корневой системы, см <sup>3</sup> | $0.53 \pm 0.025$         | $0.49 \pm 0.023$ | $0.57 \pm 0.025$        | $0.53 \pm 0.025$ |
| Высота растений, см                     | $81.5 \pm 4.0$           | $83.2 \pm 3.9$   | $82.0 \pm 4.1$          | $83.5 \pm 3.8$   |

**Таблица 4.** Влияние обработки комплексным биопрепаратом на продуктивность растений озимой пшеницы

| Показатель                    | Контроль (без обработки) |                | Обработка биопрепаратом |                |
|-------------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
|                               | 2020/2021 гг.            | 2021/2022 гг.  | 2020/2021 гг.           | 2021/2022 гг.  |
| Сорт Мироновская 808          |                          |                |                         |                |
| Масса зерна, г/м <sup>2</sup> | $135 \pm 5$              | $145 \pm 7$    | $184 \pm 7$             | $190 \pm 8$    |
| Масса 1000 семян, г           | $43.8 \pm 1.7$           | $40.3 \pm 1.5$ | $49.3 \pm 3.2$          | $44.8 \pm 3.8$ |
| Сорт Скипетр                  |                          |                |                         |                |
| Масса зерна, г/м <sup>2</sup> | $143 \pm 7$              | $136 \pm 6$    | $181 \pm 8$             | $173 \pm 6$    |
| Масса 1000 семян, г           | $48.7 \pm 1.6$           | $43.5 \pm 1.4$ | $50.1 \pm 3.5$          | $47.1 \pm 1.7$ |

вую специфичность), но не оказал влияния на рост побега. Это можно рассматривать как положительное свойство биопрепарата, позволяющее избегать загущения и полегания посева.

При определении урожая озимой пшеницы подсчитывали общую и продуктивную кустистость растений. У сортов Мироновская 808 и Скипетр предпосевная обработка семян и опрыскивание биопрепаратом растений в фазе кушения практически не повлияла на продуктивную кустистость злака во все годы наблюдения, в среднем общая кустистость изученного объекта составила 3.2–3.4 (различия с контролем не достоверны при  $P = 0.05$ ). Продуктивная кустистость при этом составила ~3 стебля на растение. Загущение посевов привело бы к снижению биологической урожайности и как следствие — к снижению массы 1000 зерен.

Урожай зерна в контрольных вариантах сорта Мироновская 808 составил (по годам) от 135 до 144 г/м<sup>2</sup> (табл. 4). Использование КБП в форме предпосевной обработки и опрыскивания в фазе кушения увеличило урожай зерна на 36% в 2021 г. и на 32% в 2022 г. Семена как контрольных, так и обработанных биопрепаратом растений соответствовали ГОСТу [20]. Анализ полученных резуль-

татов показал, что масса 1000 зерен у контрольных растений находилась в пределах от 40 до 44 г, у обработанных препаратом растений — от 45 до 49 г. Таким образом, обработка КБП семян и растений проявила тенденцию к увеличению размеров зерна у сорта Мироновская 808 (различия с контролем были недостоверными).

Растения сорта Скипетр показали сходную продуктивность с сортом Мироновская 808. Величина массы зерна менялась от 138 до 143 г/м<sup>2</sup> в контроле, и вследствие обработки КБП урожайность увеличилась на 27 и 25% в 2021 и в 2022 гг. соответственно. Таким образом, эффективность обработки биопрепаратом (по массе зерна с единицы площади) была меньше у сорта Скипетр по сравнению с сортом Мироновская 808, т.е. четко проявилась сортовая специфичность действия КБП. Масса 1000 семян варьировала в пределах от 43 до 50 г, различия между вариантами обработки биопрепаратом и контролем были недостоверными.

Известно, что влияние биопрепаратов на продуктивность сельскохозяйственных культур определяется погодными условиями вегетационного периода и уровнем плодородия почвы; при недостатке атмосферных осадков в период веге-

тации урожайность не изменяется при инокуляции микроорганизмами. Однако при количестве осадков, близком к среднемноголетней норме, использование ассоциативных биопрепаратов эквивалентно внесению азотного удобрения под озимые пшеницу, рожь и тритикале, а также ячмень и овес в дозе 30 кг/га, под яровую пшеницу — 30–45, под кукурузу — 45–60 и под картофель — 40–45 кг/га [25]. В литературе имеются данные, что стимулирующее действие биопрепаратов в растениеводстве обусловлено не только повышением плодородия почв. Так, обработка семян и посевов озимой пшеницы биопрепаратом Трихофт способствовала повышению фотосинтетического потенциала растений и ЧПФ, что обеспечило и повышение урожайности культуры на 8.2–21.2% [26].

Таким образом, использование КЖ *P. chlororaphis* и *S. cerevisiae* в форме предпосевной обработки с разведением 1 : 100 и последующего опрыскивания в фазе кущения с разведением 1 : 200 способствовало оптимизации продуктивной кустистости растений, увеличило урожай зерна и показало тенденцию к увеличению абсолютной массы семян. При этом выявлена сортоспецифичность действия КБП на различные параметры продуктивности озимой пшеницы.

Использование биопрепаратов на основе *PGPB* и *PGPF* в последнее время находит все большее применение в посевах сельскохозяйственных культур. В практику аграрного использования входят все новые и новые линии и штаммы ростстимулирующих микроорганизмов [23–27]. Созданный комплексный биопрепарат на основе *Pseudomonas chlororaphis* и *Saccharomyces cerevisiae* проявил выраженное ростстимулирующее действие и способствовал повышению продуктивности сортов озимой пшеницы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные данные по применению КБП на 2-х сортах озимой пшеницы, можно сделать заключение, что двукратная обработка биопрепаратом (предпосевная обработка семян с разведением 1 : 100 и опрыскивание в фазе кущения с разведением 1 : 200) индуцировала увеличение листовой поверхности и усиленный рост корневой системы, но не оказала влияния на рост побега. КБП в большей степени стимулировал фотосинтетическую активность по сравнению с приростом листовой поверхности. Это способствовало оптимизации продуктивной кустистости растений, приводило к увеличению урожайности и показало тенденцию к увеличению абсолютной массы семян.

Сравнение эффектов обработки комплексным биопрепаратом 2-х сортов озимой пшеницы показало явную сортовую специфичность. При этом направленность действия КБП была сходной для сортов, но в количественном выражении эффективность была больше у сорта Мироновская 808, нежели у сорта Скипетр. Очевидно, этот аспект действия КБП необходимо принимать во внимание при использовании различных доз препарата на разных сортах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеенко М.С., Мукатова М.Д. Пищевые продукты питания функциональной направленности и их назначение // Вестн. Астрахан. ГТУ. 2019. № 1. С. 145–152.
2. Романенков В.А., Павлова В.Н., Беличенко М.В. Агротехнические возможности управления климатическими рисками при возделывании зерновых культур // Агрохимия. 2022. № 12. С. 19–30. <https://doi.org/10.31857/S0002188122120110>
3. Qiu R., Li L., Liu C., Wang Z., Zhang B., Liu Z. Evapotranspiration estimation using a modified crop coefficient model in a rotated rice-winter wheat system // Agricult. Water Manag. 2022. V. 264. Art. 107501. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107501>
4. Грабовец А.И., Фоменко М.А. Роль новых сортов озимой пшеницы в интенсификации сельского хозяйства на Дону // АгроФорум. 2022. № 1. С. 54–57.
5. Привалов Ф.И., Булавин Л.А., Небышинцев С.С., Симченков Д.Г., Сушевич И.А. Зависимость урожая зерна озимой пшеницы от способов основной обработки почвы // Земледелие и защита раст. 2015. № 3. С. 3–5.
6. Лощинина А.Э. Пары как предшественники озимых культур при различных системах обработки почвы // Аграрн. Россия. 2022. № 5. С. 10–14.
7. Морозов Н.А., Хрипунов А.И. Весенне-летние засухи и урожайность озимой пшеницы в сухостепной полосе Ставрополя // Изв. Оренбург. ГАУ. 2022. № 4 (96). С. 30–36.
8. Шабаетов А.И. Ресурсосберегающие технологии возделывания озимой пшеницы в агроландшафтах Поволжья // Земледелие. 2009. № 4. С. 13–15.
9. Кошпаева Т.В., Кириллова Н.И., Дегтярева И.А. Комплексные биопрепараты на основе автохтонных почвенных микроорганизмов // Уч. зап. Казан. гос. акад. вет. мед. им. Н.Э. Баумана. 2022. Т. 250. № 2. С. 104–108.
10. Монастырский О.А., Кузнецова Е.В., Есипенко Л.П. Органическое земледелие и получение экологических пищевых продуктов в России // Агрохимия. 2019. № 1. С. 3–4. <https://doi.org/10.1134/S000218811901006X>
11. Iakimova E.T., Sobiczewski P. Bacteria as biocontrol agents of infectious diseases on horticultural crops // Bulg. J. Agric. Sci. 2022. V. 28. № 5. P. 866–875.
12. Afzali-Goroh E., Saberi-Riseh R., Hosseini A., Vatankhah M. Application of some plant growth-pro-

- moting rhizobacteria to enhance plant growth and protection against *Cucumber mosaic virus* in cucumber // *J. Crop Protect.* 2022. V. 11. № 1. P. 133–144.
13. Yadav A.N., Verma P., Singh B., Chauhan V.S., Suman A., Saxena A.K. Plant growth promoting bacteria: Biodiversity and multifunctional attributes for sustainable agriculture // *Adv. Biotechnol. Microbiol.* 2017. V. 5. № 5. Art. 555671.  
<https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.05.555671>
  14. Разина А.А. Эффективность биологического стимулятора роста растений Стимунол ЕФ на яровой пшенице // *Агрохимия.* 2018. № 7. С. 50–56.  
<https://doi.org/10.1134/S0002188118070104>
  15. Анохина Т.О., Сиунова Т.В., Сизова О.И., Захарченко Н.С., Кочетков В.В. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробиотехнологиях // *Агрохимия.* 2018. № 10. С. 54–66.  
<https://doi.org/10.1134/S0002188118100034>
  16. El-Maraghy S.S., Tohamy A.T., Hussein K.A. Plant protection properties of the plant growth-promoting fungi (PGPF): Mechanisms and potentiality // *Curr. Res. Environ. Appl. Mycol. (J. Fungal Biol.).* 2021. V. 11. P. 391–415.  
<https://doi.org/10.5943/cream/11/1/29>
  17. Kumar A., Singh S., Gaurav A.K., Srivastava S., Verma J.P. Plant growth-promoting bacteria: Biological tools for the mitigation of salinity stress in plants // *Front. Microbiol.* 2020. V. 11. Art. 1216.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01216>
  18. Пронин А.С., Колмыкова Т.С., Лукаткин А.С. Особенности совместного культивирования *Pseudomonas chlororaphis* и *Saccharomyces cerevisiae* для создания комплексного биопрепарата // *Сел.-хоз. биол.* 2022. Т. 57. № 1. С. 171–182.  
<https://doi.org/10.15389/agrobiologia.2022.1.171rus>
  19. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
  20. ГОСТ 12042-80. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения массы 1000 семян. М.: Стандартинформ, 2011. 4 с.
  21. Викторов Д.П. Малый практикум по физиологии растений. М.: Высш. шк., 1983. 135 с.
  22. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высш. шк., 2006. 742 с.
  23. Hsu S.-H., Shen M.-W., Chen J.-C., Lur H.-S., Liu C.-T. The photosynthetic bacterium *Rhodospseudomonas palustris* strain PS<sub>3</sub> exerts plant growth-promoting effects by stimulating nitrogen uptake and elevating auxin levels in expanding leaves // *Front. Plant Sci.* 2021. V. 12. Art. 573634.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.573634>
  24. Chandra P., Khobra R., Sundha P., Sharma R.K., Jasrotia P., Chandra A., Singh D.P., Singh G.P. Plant growth promoting *Bacillus*-based bio formulations improve wheat rhizosphere biological activity, nutrient uptake and growth of the plant // *Acta Physiol. Plant.* 2021. V. 43. Art. 139.  
<https://doi.org/10.1007/s11738-021-03310-5>
  25. Завалин А.А. Применение биопрепаратов при возделывании полевых культур // *Достиж. науки и техн. АПК.* 2011. № 8. С. 9–11.
  26. Пигорев И.Я., Тарасов С.А. Влияние биопрепаратов на фотосинтетическую деятельность и урожайность озимой пшеницы // *Вестн. Курск. ГСХА.* 2014. № 8. С. 47–50.
  27. Olanrewaju O.S., Glick B.R., Babalola O.O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria // *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2017. V. 33. № 11. Art. 197.  
<https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>

## Efficiency of Complex Biopreparation Use on Winter Wheat Crops in Mordovia

A. S. Pronin<sup>a</sup>, T. S. Kolmykova<sup>b</sup>, and A. S. Lukatkin<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>Department of General Biology and Ecology, N.P. Ogarev Mordovia State University  
ul. Bolshevistskaya 68, 430005 Saransk, Russia

<sup>b</sup>Lyceum № 31 of Saransk  
430034 Saransk, ul. Metallurgov 2, Russia

<sup>#</sup>E-mail: aslukatkin@yandex.ru

Under field conditions in the Republic of Mordovia, we studied the effect of treatment of seeds and plants of winter wheat varieties Mironovskaya 808 and Skipetr with a complex biological preparation based on jointly cultivated strains PGPB *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* and PGPF *Saccharomyces cerevisiae* on plant growth and productivity. We used seed treatment with the biological preparation diluted with water at a ratio of 1 : 100, and plant treatment during vegetation at a dilution of 1 : 200. The complex biological preparation stimulated an increase in net productivity of photosynthesis and leaf surface, an increase in root dry weight and volume, but not plant height, and an increase in grain productivity by 25–36% compared with control. The stimulating effect of the biopreparation was variety-specific.

**Key words:** winter wheat, cultivars, complex biopreparation, *Pseudomonas chlororaphis*, *Saccharomyces cerevisiae*, growth, weight, yield.

УДК 632

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ РОССИИ

© 2023 г. В. А. Захаренко

*Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”*

*143026 р.п. Новоивановское, Московская обл., ул. Агрохимиков, 6, Россия*

*E-mail: zva@mosniish.ru*

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

Представлены результаты исследований, характеризующие развитие технологий защиты растений в агроэкосистемах в условиях рыночной экономики России при выращивании сортов стратегических зерновых и технических культур отечественной селекции с высоким генетическим потенциалом. Потенциал реализуется с применением техники защиты растений с элементами информационных технологий и точного земледелия, минеральных удобрений и пестицидов по научно обоснованным нормам. При этом успехи достигаются в группе сельскохозяйственных предприятий и крестьянских (фермерских) хозяйств с посевными площадями зерновых и технических культур  $\geq 2500$  га, оптимальными для рационального использования техники, с высокой культурой земледелия, обеспеченными материально-техническими и финансовыми ресурсами и ведущих рентабельное производство. В 2016–2020 гг. проанализированная группа высокопродуктивных сортов зерновых и технических культур охватывала  $\sim 20\%$  площадей агроэкосистем при существующем уровне развития селекции, семеноводства и генетики, использования минеральных удобрений и пестицидов, а также техники с элементами информационных технологий и точного земледелия. Определены перспективы расширения группы культур в связи с дальнейшим совершенствованием организации селекции и семеноводства, поставок удобрений и пестицидов на основе развития не только прогрессивных препаратов, но и создаваемых молекул отечественных действующих веществ, в новых условиях в связи с задачами продовольственной безопасности страны.

**Ключевые слова:** агроэкосистема, защита растений, зерновые и технические культуры, крестьянские (фермерские) хозяйства, пестициды, селекция, семеноводство, сельскохозяйственные предприятия, удобрения.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080112, **EDN:** ZEMOEO

### ВВЕДЕНИЕ

В истории современного мира наступил этап, когда задачи цивилизационного уровня должны решаться во взаимной увязке науки и техники, в более широком аспекте, охватывающем наряду с отраслями промышленности сельское хозяйство, связь, медицину, военную отрасль, образование и быт [1, 2]. Прогресс одновременно с решением новых более сложных практических задач требует для их реализации и в целом для общественного развития новых уровней развития научных теоретических и экспериментальных решений, более тесной связи с производственными отраслями. Развитие современного мирового сельского хозяйства происходит во взаимосвязанной системе отраслей агропромышленного комплекса (АПК) в составе 3-х сфер: 1 — технического прогресса во

взаимодействии с наукой, имеющего отношение к защите растений как обязательного звена в системе земледелия при применении новых технологий выращивания культурных растений для получения продукции растениеводства и животноводства, 2 — сельскохозяйственного производства в части обеспечения его материально-техническими ресурсами (пестицидами, удобрениями, техникой, горюче-смазочными материалами и др.), производимыми в промышленной сфере, 3 — сельскохозяйственная продукция из сферы 2 поступает для переработки и обеспечения потребностей питания населения, на корм скоту, для легкой промышленности и экспорта.

Текущий период развития АПК России связан с особенностями перехода страны к рыночной экономике, с частной собственностью на землю,

многоукладным производством, с общим экономическим законом получения максимальной прибыли. В сложившихся экономических условиях после 3-х десятилетий функционирования АПК России вступил в новый этап мирового научно-технического прогресса, обусловленного развитием науки и техники, создания новых основ функционирования промышленных и сельскохозяйственных отраслей [1–3]. Сельское хозяйство РФ в настоящий момент охватывает научные разработки новых средств и предметов труда, теоретические и прикладные научные исследования, изготовление опытных образцов технических средств, методы выведения новых сортов растений и пород сельскохозяйственных животных, повышения плодородия почв, улучшения имеющих и освоения новых технологий, качественного изменения трудовых ресурсов в части квалификации работников, совершенствовании организации и повышения производительности труда. Совершенствование и развитие научно-технического прогресса (НТП) в связи со спецификой сельского хозяйства, определяемого естественными биологическими законами в силу сложного формирования фундаментальных аграрных наук и прикладных решений, получают более поздние возможности для практической реализации, чем промышленность. Возможности проникновения НТП в сельское хозяйство с его продукцией отсрочены по сравнению с продукцией, создаваемой индустрией и достижениями в области электроники, телемеханики, новых источников энергии, новых материалов и технических средств. Такая научно-революционная форма НТП в аграрном секторе отражает позже, чем в промышленном секторе, новый этап развития науки с автоматизацией производства, при котором в техническом процессе функции рабочего начинают уступать место автоматизированному производству, предметы труда обрабатывают всецело техническими системами, действующими без прямого участия рабочего. В развитых формах автоматизированных систем и автоматических линий включается кибернетическая аппаратура, осуществляющая счетно-решающие, контролируемые, управляющие функции, в системе звеньев “наука—производство” и перехода от частной к общей механизации технических процессов. Социальная сущность НТП проявляется в принципиальном изменении места и роли человека в производстве: освобождения его от механических и технических функций, дает возможность посвящать себя творческому труду. Однако в высокоразвитом капиталистическом мире (США, Западной Европе) может создаться, как

это имеет место в настоящее время, опасность развития безработицы и ее социальных последствий, включая войны.

Цель работы — определение условий, направлений и объемов освоения элементов информационных технологий (ИТ) и точного земледелия в отраслях растениеводства и в агроэкосистемах, в которых рассмотрены занимающие центральное место культурные растения на уровне сортов, и условия, которые определяют реализацию их генетического продуктивного потенциала, химической составляющей технологий реализации питания культурных растений на основе удобрений и питательных веществ почв; защиту растений от вредных организмов, в частности, на основе химической защиты стратегически важных культур при использовании пестицидов. При этом решаются задачи эффективного и экологически минимально опасного использования удобрений и пестицидов в прогрессивных технологиях с элементами информационных технологий и точного земледелия. Это необходимо осуществить на этапе реализации новой Доктрины продовольственной безопасности (Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 “Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации” [www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/doc/73338425/](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/doc/73338425/)), когда нужна ориентация на достижение новых параметров самообеспечения страны продукцией стратегически важных культур, количественных и высококачественных характеристик сельскохозяйственной продукции для внутреннего потребления населения и реализации экспортного потенциала.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве источников информации при выполнении исследования агроэкосистем на уровне РФ, сортового аспекта продуктивности стратегически важных зерновых и технических культур учитывали мировые достижения НТП на современном этапе в селекции, генетике, биотехнологии, которые обеспечивают максимально высокий генетический потенциал сортов зерновых и технических культур, полученный на основе рационального питания растений и сдерживания потенциала фитосанитарного риска потерь урожая от вредных организмов. При этом обеспечено сохранение высокоэффективной и минимально опасной для человека полезной фауны и флоры, окружающей среды при использовании химических средств, прогрессивной техники с комплексуемыми элементами информационных технологий и точного земледелия. В качестве основных

методов анализа использовали методы описательной статистики [4]. Обработку исходной информации реализовали на основе методов группировок, определения показателей среднего арифметического, нелинейных уравнений зависимостей опасности потерь урожайности культур от вредных организмов и сохраняемого урожая в результате применения химических средств защиты растений в натуральных показателях (продукции, оцениваемой в т), и в стоимостных показателях (в руб.). Оценку эффективности проведения защитных мероприятий проводили с использованием национального ГОСТа [5], расчеты – в системе “Excel”. Агроэкосистемы характеризовали на сортовом уровне продуктивности стратегически важных зерновых и технических культур с учетом генетического потенциала сортов, который проявляется при использовании удобрений и средств защиты в сортовых технологиях с элементами ИТ и точного земледелия.

### СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО – ЦЕНТРАЛЬНОЕ ЗВЕНО НТП В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Основным источником производства продукции растениеводства являются агроэкосистемы с фитоценозами, контролируемые в процессе сельскохозяйственной деятельности. Потенциал продуктивности агроэкосистем характеризуется уровнем производства продукции растениеводства сортами, созданными в результате селекции и обладающими определенными, передаваемыми по наследству морфологическими, физиологическими, хозяйственными признаками. Сорт – низшая классификационная единица для культурных растений [6, 7]. Характеристики сортов оценивали по итогам сортоиспытания. В процессе сортоиспытаний давали объективные оценки селекции сортов с целью выявления наиболее урожайных и ценных по качеству. Сортоиспытание проводили на сортоучастках по единой методике для культур. В практике различных стран используют разные по организационным формам испытания и регулирование процесса возделывания сортов.

В мировой практике зарубежных стран (ЕС, США, Канаде и других) приняты испытания и государственное регулирование возделывания сортов (национальные реестры), которые защищают права разработчиков. Правовое регулирование развития селекции и семеноводства зарубежных стран не используется в российской законодательной практике в части организационно-экономического механизма, который бы стимулировал

развитие отечественного конкурентоспособного семенного рынка, включал в себя воздействие на его участников – селекционеров, генетиков, сортоиспытателей, семеноводов и сельхозпроизводителей, Доктриной продовольственной безопасности определен общий показатель обеспечения аграрного сектора России семенами в связи с импортозависимостью страны в этой области. Импортозамещение в семеноводстве определяется в первую очередь объемами собственного производства семян суперэлиты и элиты, отвечающих требованиям районирования (устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам и пр.). Настоящие объемы производства семян предполагается покрывать с учетом потребностей сельхозтоваропроизводителей при решении проблемы импортозамещения при реализации Указа Президента России от 21 января 2020 г. № 20 “Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации”, которым введен новый показатель продовольственной безопасности в отношении семян основных сельскохозяйственных культур отечественной селекции. Их доля должна быть не менее 75%. В 2019 г. этот показатель в России был равен 62.7% (табл. 1).

Ассортимент возделываемых сортов составляют на основе сортового районирования, отбора высокопродуктивных и ценных по качеству продукции в хозяйствах определенных природных зон. Обобщенные среднегодовые показатели площадей, засеваемых семенами сортов культур, и уровня урожайности в РФ представлены в табл. 2.

Селекционерами России выведены сорта с количественными и качественными показателями, не уступающие сортам зарубежной селекции, с потенциалом продуктивности 6–8 т/га, обладающие высоким качеством зерна и высокой устойчивостью растений к вредным организмам. Однако эти результаты в цепи “генетика–селекция–семеноводство–сельхозтоваропроизводитель” для новых сортов и гибридов, зарегистрированным Госсортомиссией, с трудом доходят до потребителей. При этом отечественная селекция отстает в выведении сортов технических культур (сахарной свеклы, подсолнечника, рапса, сои, кукурузы, картофеля и овощных культур).

По сравнению с государственными институтами и частными отечественными компаниями России зарубежные производители семян имеют существенные преимущества как в генетике, селекции и семеноводстве, так и в маркетинге. В развитых странах инвестиции частных селекционных компаний направляются на оснащение новейшим оборудованием и техникой, научные исследования в области биотехнологий, марке-

**Таблица 1.** Доля семян отечественной селекции в объеме высеянных семян (2019 г.) [6, 8]\*

| Культура         | Объем высеянных семян, тыс. т | Доля семян отечественной селекции в объеме высеянных семян, % | Пороговая величина доли семян отечественной селекции в объеме, % |
|------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Пшеница озимая   | 3330.4                        | 90.5                                                          | 92                                                               |
| Пшеница яровая   | 2454.4                        | 82.2                                                          | 90                                                               |
| Ячмень яровой    | 1702.9                        | 63.2                                                          | 75                                                               |
| Сахарная свекла  | 3.9                           | 0.6                                                           | 20                                                               |
| Овощные культуры | 5.3                           | 43.0                                                          | 60                                                               |
| Подсолнечник     | 37.2                          | 26.5                                                          | 50.0                                                             |
| Картофель        | 777.3                         | 9.7                                                           | 50                                                               |
| Кукуруза         | 77.7                          | 45.8                                                          | 65                                                               |
| Рапс яровой      | 9.3                           | 31.7                                                          | 50                                                               |
| Соя              | 346.2                         | 41.8                                                          | 70                                                               |

\*Данные Минсельхоза РФ.

**Таблица 2.** Общие показатели увеличения площадей и урожайности сельскохозяйственных культур в период реформирования агропромышленного комплекса России с 1986–1990 по 2016–2018 гг.

| Культура        | Площадь, тыс. га | Урожайность, т/га | Площадь, тыс. га | Урожайность, т/га | Площадь, тыс. га | Урожайность, т/га |
|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Годы            | 1986–1990 гг.    |                   | 2011–2015 гг.    |                   | 2016–2018 гг.    |                   |
| Зерновые*       | 65644            | 1.59              | 45340            | 2.05              | 45685            | 2.70              |
| Сахарная свекла | 1475             | 22.5              | 1056             | 38.5              | 1114             | 43.5              |
| Подсолнечник    | 3668             | 1.11              | 7065             | 1.25              | 7499             | 1.52              |
| Соя             |                  |                   |                  |                   | 2067             | 1.74              |
| Рапс            |                  |                   |                  |                   | 925              | 1.62              |

\*Зерновые культуры, включая зернобобовые.

тинговые программы и др. Селекционно-семеноводческие компании работают под государственным контролем, обеспечивающим защиту авторских прав на сорт и выплату селекционного вознаграждения для финансирования деятельности селекционеров. В России крупные отечественные сельхозтоваропроизводители, в частности агрохолдинги, занимаются совместно с зарубежными фирмами селекционно-семеноводческой деятельностью на территории России. Отечественная селекция и семеноводство в постсоветский период утратили централизованность, и в условиях кризиса семенной рынок захватывают иностранные компании. Большинство отечественных семеноводческих станций в период реформирования аграрного рынка приватизированы и проданы по цене земли и недвижимости. Организационно-экономический механизм в сфере селекции и се-

меноводства сорта изменился: сорт, по сути, стал брэндом [9, 10]. Отмеченные недостатки селекции и семеноводства следует учитывать, принимая во внимание государственный подход к селекции и семеноводству зарубежных стран, их элементы необходимо использовать в отечественной практике.

В производстве продукции растениеводства важно, наряду с организационными мероприятиями государственного подхода к селекции и семеноводству, обеспечивать сортовые особенности ассортимента культурных растений к требованиям зональных условий, использованию прогрессивных сортовых технологий, применению техники с элементами ИТ и точного земледелия, научно обоснованное внесение удобрений и защиту растений для реализации генетического потенциала продуктивности сортов отечественной селекции.

**Таблица 3.** Мировые показатели использования удобрений, баланса удобрений в действующем веществе (среднее ежегодно за 2016–2020 гг.), тыс. т [11]

| Показатель                        | Азот   | Фосфор                        | Калий            | Всего                                                |
|-----------------------------------|--------|-------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|
|                                   | N      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O |
| Мощность производства             | 187897 | 61810                         | 60457            | 310164                                               |
| Возможные поставки                | 166885 | 50916                         | 46666            | 264467                                               |
| Другие виды использования         | 36066  | 6474                          | 5674             | 48214                                                |
| Материалы доступные для удобрений | 130871 | 44462                         | 40993            | 216326                                               |
| Спрос на удобрения                | 95287  | 44026                         | 35022            | 174335                                               |
| Потенциальный баланс              | 15586  | 40379                         | 17970            | 73935                                                |

### ХИМИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ АГРОЭКОСИСТЕМ – ВАЖНЕЙШИЙ ЭЛЕМЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРОДУКТИВНОСТИ СОРТОВ

Химизация земледелия в агроэкосистемах рассматривается на основании производства и использования 2-х групп химических средств – удобрений (источника питательных веществ для растений) и химических средств защиты растений от вредных организмов (пестицидов). Российская Федерация располагает большими резервами и возможностями реализации сортового потенциала продуктивности за счет химизации агроэкосистем и управления ими на основе рационального использования отечественных ресурсов (табл. 3).

Центром развития становится рынок минеральных удобрений [12]. Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” представил показатели доли мощностей и производства минеральных удобрений в Российской Федерации в мировом объеме этого производства. Отмечено, что Россия в перечне 10-ти передовых стран занимала 2-е место в мире после Китая (табл. 4). Мировые показатели объемов использования минеральных удобрений в 2017 г. составляли 190.1 млн т д.в. при общих объемах мощностей 305.0 млн т (62.3%), в 2018 г. – соответственно 188.8 млн т и 310.4 млн т (60.9%).

Прогноз роста рынка минеральных удобрений рассматривается с перспективой возможных благоприятных погодных условий и с увеличением посевов культур, прежде всего зерновых. К 2023 г. прогнозируется спрос на минеральные удобрения на уровне до 203 млн т. Максимальный прогнозный показатель объема мирового рынка минеральных удобрений, с учетом развития промышленных предприятий, определяется 268 млн т д.в. Почти 80% прироста потребления может при

этом приходиться на страны Латинской Америки, Южной Азии, Африки и Восточной Европы.

По данным IFA, за 2018–2023 гг. объемы инвестиций в мировое производство минеральных удобрений может достичь 110 млрд долл. США, при авансировании строительства 70-ти новых установок с суммарной мощностью 65 млн т. Ввод новых мощностей в физическом весе предусмотрен в 2019–2023 гг. Он вызовет изменения мировых мощностей по производству минеральных удобрений [12].

При высоких показателях роста мощностей производства минеральных удобрений в Российской Федерации проявляется крайне низкий рост использования минеральных удобрений в отечественном аграрном секторе. Это связано с переходом страны к новой рыночной экономической формации, с отставанием по показателям ис-

**Таблица 4.** Объемы мощностей по производству удобрений (NPK) в мире (2017 и 2018 гг.), млн т

| Страна    | 2017 г. | 2018 г. |
|-----------|---------|---------|
| Китай     | 87.8    | 87.2    |
| РФ        | 28.7    | 31.2    |
| Канада    | 27.1    | 28      |
| США       | 23      | 23.5    |
| Индия     | 15      | 15      |
| Беларусь  | 8.8     | 8.9     |
| КСА       | 7.36    | 7.2     |
| Марокко   | 6.48    | 7.3     |
| Индонезия | 6.2     | 7.3     |
| Германия  | 6.2     | 6.2     |
| Прочие    | 88.6    | 88.5    |
|           | 305     | 310.4   |

**Таблица 5.** Объем мирового использования минеральных удобрений, млн т

| Элемент                       | 2016 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| N                             | 107.1   | 106.4   | 106.5   | 107.1   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 45.4    | 46.3    | 45.3    | 46.0    |
| K <sub>2</sub> O              | 35.9    | 37.4    | 37      | 37.4    |
| Итого                         | 188.5   | 190.1   | 188.8   | 190.5   |

пользования минеральных удобрений от высокоразвитых стран первой десятки мира (табл. 5, 6).

Продажа удобрений для использования на внутреннем рынке (включая весь аграрный сектор) в среднем за 10-летний период составила в 2010 г. – 5092, в 2020 г. – 5794, при производстве 17889 и 24913 тыс. т соответственно. Однако из общего производства в 2010 г. использовано в стране в аграрном секторе 5992 тыс. т (33.3%), в 2020 г. – 5794 тыс. т (23.0%). Экспорт удобрений, более чем в 2 раза, превышал продажу на внутреннем рынке.

В сельскохозяйственных предприятиях использование удобрений увеличилось в период 2010–2020 гг. с 1.9 до 3.0 млн т, на 1 га посевной площади – с 38 до 68 кг д.в./га; к объемам производства эти показатели составили в 2010 г. – 17879 тыс. т (10.6%) и в 2020 г. – 25232 тыс. т (11.8%).

Динамика внесения произведенных минеральных удобрений по группам питательных веществ в сельскохозяйственных организациях отражает рост потребления в тоннаже и применения удобрений на посевной площади сельскохозяйственных организаций (табл. 7).

Структура вносимых удобрений при низком уровне их использования в стране достаточно стабильная: на азот приходится 61, фосфор – 24 и калий – 15%. Самым востребованным минеральным удобрением остается аммиачная селитра, на которую приходится более 50% закупок. Это объясняется ее дешевизной. Растет доля удобрений с

содержанием 3-х основных элементов (NPK), жидких и фосфорных комплексных. Наибольшее количество калия в долевом соотношении питательных веществ вносят под картофель и сахарную свеклу, под остальные культуры – азот [13].

При сложившихся объемах использования удобрений при относительно низких дозах внесения на 1 га посевной площади в стране возникла проблема снижения уровня плодородия Краснодарского края – зоны высокоплодородных почв. Четверть века назад средневзвешенное содержание гумуса в кубанских почвах составляло 4.0–4.4%. В настоящее время в последних агрохимических исследованиях выявлено снижение содержания гумуса до 3.4–3.6%. При ежегодных потерях в среднем 0.1% гумуса и продолжительном разрушительном процессе снижения содержания гумуса этот показатель может уменьшиться до 2.5–2.7% (достигнута точка невозврата плодородия черноземов, при которой нельзя будет восстановить его прежний уровень).

В советские годы вносили порядка 13 т подстильного навоза/га. Для сдерживания потерь плодородия приняли закон о плодородии почв, обязывающий сельхозтоваропроизводителей разных форм собственности вносить ежегодно не менее 9 т подстильного навоза/га. Если такой возможности нет, землепользователи должны иметь в структуре посевных площадей не менее 20% многолетних бобовых трав, выращивание которых способствует накоплению гумуса в почве. Следует учитывать, что проблема Краснодарского края возникла в одном из регионов – лидеров по применению минеральных удобрений: на 1 га кубанской пашни вносят 130 кг минеральных удобрений, а в среднем в РФ – 50–55 кг/га. Для сохранения плодородия почв требуется применение органических удобрений и внедрение в севообороты многолетних трав (по материалам выставки “ЮГАГРО-2021”). Поэтому при применении минеральных удобрений важно использовать существующие и стратегические возможности рынка

**Таблица 6.** Динамика использования минеральных удобрений (100% д.в.) в России, тыс. т [13]

| Показатель                  | 2010 г. | 2016 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ресурсы                     | 17648   | 20502   | 22906   | 22035   | 19443   | 25382   |
| в т.ч. производство         | 17889   | 29539   | 22567   | 22962   | 23703   | 24913   |
| Импорт                      | 34      | 88      | 213     | 218     | 206     | 183     |
| Имеется запасов             | 275     | 127     | –126    | 1145    | 4467    | –287    |
| Использование               | 17648   | 20502   | 22906   | 22035   | 194443  | 25232   |
| Продажа на внутреннем рынке | 5092    | 4998    | 6345    | 5253    | 2925    | 5794    |
| Экспорт                     | 12557   | 15504   | 16561   | 16782   | 16518   | 16588   |

**Таблица 7.** Динамика использования минеральных удобрений в сельскохозяйственных организациях, млн т [13]

| Показатель                                              | 2010 г. | 2016 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. |
|---------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Внесено минеральных удобрений в АПК, млн. т (100% д.в.) |         |         |         |         |         |         |
| Всего                                                   | 1.9     | 2.3     | 2.5     | 2.5     | 2.7     | 3.9     |
| азотные                                                 | 1.2     | 1.4     | 1.5     | 1.5     | 1.7     | 1.9     |
| фосфорные (включая фосфоритную муку)                    | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.6     | 0.6     | 0.7     |
| калийные                                                | 0.3     | 0.4     | 0.4     | 0.4     | 0.4     | 0.4     |
| Внесено удобрений, кг/га                                | 38      | 49      | 55      | 56      | 51      | 60      |
| Внесено на всей посевной площади, %                     | 42      | 53      | 58      | 59      | 61      | 67      |

**Таблица 8.** Предприятия, поставляющие минеральные удобрения на внутренний рынок РФ

|                                                                                          |                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сегмент азотных удобрений                                                                | Крупные предприятия: МХК “ЕвроХим”, ОХК “Уралхим”, ГК “Акрон”, ПАО “Фосагро”, СДС “Азот”,<br>Мелкие предприятия: “Куйбышевазот”, АО “Аммоний”, “Минудобрения” (Россошь), “Газпром нефтехим Салават” и др. |
| Сегмент фосфорсодержащих удобрений                                                       | Крупные предприятия: “ФосАгро” (выпуск более 50%), МКХ “Евро”, “Уралхим”                                                                                                                                  |
| Сегмент выпуска удобрений с тремя питательными элементами с оценкой производства на д.в. | Предприятия группы “Фосагро” (~38%), “Акрон” (<30%), “Минудобрения” (Россошь), “Еврохим”, Уралхим”, и др.                                                                                                 |

предприятий, производящих и обеспечивающих сельскохозяйственные предприятия и хозяйства удобрениями (табл. 8).

В число приоритетных культур, при выращивании которых предусматривают использование удобрений, включены зерновые и зернобобовые, масличные, овощи открытого грунта, виноград, плодово-ягодные насаждения [13].

Если учесть возможность и целесообразность использования удобрений для выращивания отечественных сортов зерновых культур с высоким генетическим сортовым потенциалом (6–10 т/га) и отзывчивых на удобрения технических культур, то при недостаточном обеспечении сельских товаропроизводителей удобрениями могут быть трудности для восстановления и сохранения почвенного плодородия при реализации продовольственной программы. Поэтому важно отметить своевременное положительное решение Министерства сельского хозяйства в отношении сдерживания опасности потерь плодородия почвы в южных регионах страны: в 2022 г. на поддержку производства зерна в Ставрополье было выделено более 270 млн руб., и важно не снижать объемы внесения минеральных удобрений, обеспечивать российских аграриев качественными семенами и средствами защиты растений.

Для выращивания сахарной свеклы и других культур предусмотрен рост применения мелиора-

ционных технологий — строительство оросительных систем, позволяющих увеличивать урожайность различных культур на 40–44%. До 2024 г. поставлена задача превысить отметку 100 тыс. га орошаемой площади (в настоящее время охвачено мелиорацией 70 тыс. га).

### ХИМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Подобно минеральным удобрениям в России проявляются тренды роста объемов производства химических средств защиты растений (ХСЗР), причем в темпах, превышающих мировые. Развитие мирового рынка ХСЗР, по оценке компании Kynetec (млрд USD, по объемам продаж в номинальных ценах EXW), при настоящих темпах прироста ~1% в год за последнюю пятилетку (2016–2020 гг. в стоимостной оценке) выросло с 53.1 до 56.7 млрд \$ (в 1.06 раза). Рост глобальных ХСЗР-рынков в большей степени обеспечен растущими рынками Азии и Латинской Америки, а также и России, при продолжающейся стагнации европейского рынка.

За 25-летний период в условиях развития рыночной экономики после распада СССР в РФ удалось восстановить в значительной степени разрушенное отечественное производство пестицидов на основе действующих веществ крупных зарубежных фирм и отечественной техники с за-

рубежными комплектуемыми. Производство пестицидов в России за тот же период достигло 131 тыс. т, выросло в 1.8 раза. При этом доля рынка гербицидов на конец пятилетки в 2020 г. составила 68.3, фунгицидов — 16.9, родентицидов и аналогичных продуктов — 16.8, инсектицидов — 14.5, средств против прорастания и регуляторов роста растений — 0.4% [14].

Объем продаж препаратов, обеспеченный Союзом производителей ХСЗР (РСП ХСЗР), составил в 2020 г. 97.9 тыс. т, ввезенных импортных — 60.6 тыс. т, объем продукции, выпущенной иностранными компаниями на российских предприятиях по схеме толлинга — 28.4 тыс. т. На долю отечественных препаратов в 2020 г. пришлось 52%. РСП ХСЗР определил оптимальную долю ввозимой продукции, не превышающую 30%, подобную в АПК, в военно-промышленном и топливно-энергетическом комплексах России, характеризующую допустимый уровень зависимости от импорта. В РСП это достигнуто созданием перечня препаративных форм, при этом в стране отстает синтез действующих веществ, поэтому 85% их общего объема закупают в Китае.

Чтобы не зависеть от импорта, важно развитие импортозамещения. Россия строит 2 крупных завода для выпуска пестицидов. Это обеспечит также дополнительные рабочие места и рост налоговых поступлений, увеличатся возможности экспорта средств защиты растений. Этому также способствует совершенствование законодательной базы. С 21 июня 2021 г. вступил в силу Федеральный закон № 522-ФЗ, в котором внесены изменения в главный нормативный акт, регулирующий рынок агрохимии, — ФЗ от 19.07.1997 г. № 109-ФЗ “О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами”. Закон наделяет Россельхознадзор функциями контроля за оборотом и применением пестицидов и агрохимикатов, а также за соблюдением требований к пестицидам и агрохимикатам при ввозе на территорию РФ. Импортная продукция будет проходить необходимый контроль по утвержденному списку из 14-ти пунктов пропуска, утвержденного Правительством РФ. Благодаря наделенным функциям не попадут на российский рынок контрафактные и фальсифицированные пестициды, эта ниша будет занята отечественными качественными препаратами. Оптимальным продуктом предложено рассматривать не только продукт с оптимальным соотношением д.в., но и инновационную препаративную форму, например, как разработанная в РФ форма ХСЗР в виде формуляций, повышающих эффективность д.в. В фирме “Август” для потребителей осуществляется технологическое

сопровождение специалистами компании, организуется связь получения земледельцами-клиентами информации о наиболее перспективной и экологической продукции [15].

Продолжается работа Ассоциации европейского бизнеса — компании “ЭКОПОЛЕ” в развитии системы сбора и утилизации тары из-под ХСЗР. В 2021 г. собрано и утилизировано 1700 т тары в 4-х федеральных округах (Центральном, Южном, Северо-Кавказском, Приволжском).

Производство пестицидов существенно расширилось на предприятиях, входящих в Союз РСП ХСЗР. В этот союз входят “Август”, “Щелково Агрохим”, “Агро Эксперт Групп”, “Агрорус и Ко”, Кирово-Чепецкий завод, “Агрохимикат”, ФМРус, “ТПК Техноэкспорт”, “Листерра”, “Бисолби-Интер”, “АгрусхимАлабуга”, “Агентство Плодородия”, “Шанс Энтерпрайз” и “Август-Алабуга”. По прогнозам BusinesStat, в ближайшие годы производители продолжают наращивать мощности, и к 2025 г. объем выпуска химических средств защиты растений в России достигнет 208 тыс. т, что больше показателя 2020 г. на 58.5%.

Россия является самым крупным и наиболее динамично развивающимся рынком ХСЗР в Европе, в то время как традиционно крупные рынки Старого Света, такие как Франция и Германия, сокращают производство. Основной причиной данной тенденции является “зеленая” политика Европейского Союза, которая направлена на снижение объемов применения агрохимических средств.

Среди основных драйверов роста российского рынка ХСЗР можно выделить продолжающийся процесс интенсификации производства, увеличение посевных площадей под такими культурами как сахарная свекла, рапс и взрывной рост площадей под подсолнечником, который достиг в 2021 г. практически 10 млн га.

Инсектициды — наиболее динамично растущий сегмент российского рынка ХСЗР в 2021 г., при этом их доля по сравнению с другими типами продуктов не превышает 10%. В 2021 г. увеличилось применение фунгицидов на сахарной свекле, сое и подсолнечнике, объемы их применения на последнем возросли более чем в 2 раза.

За 20 последних лет использование ХСЗР в России увеличилось с 20 до 192 тыс. т, в том числе отечественных препаратов — с 4 до 92 тыс. т, и в настоящее время страна входит в пятерку лидеров стран-производителей. В сложившихся условиях это не благоприятные процессы для аграрного сектора России, поскольку связаны с ростом цен на д.в.: в период с 01.09.2020 г. до 29.02.2022 г. уве-

личились цены на глифосат — на 379% (с 3.2 тыс. до 12 тыс. долл.), С-метолахлора — на 294, пропиконазола — на 254, диквата — на 204, клетодима — на 184, азоксистробина — на 158%. В связи с упреждением роста цен на химические средства важно создавать отечественное производство молекул д.в. и на их основе — препаратов в России. В перспективе прогноз объема рынка предусматривает в ценах поставщиков достичь 3 млрд долл., в настоящее время — 1.6 млрд долл. Важно отметить, что выпускаемые отечественные препараты имеют преимущества перед зарубежными по видам препаративных форм (микроэмульсии, масляные дисперсии, концентраты коллоидных растворов). Производителей химических средств защиты растений представляет 10 компаний с 11-ю заводами в разных районах страны. Мощность производства ХСЗР превышает 300 тыс., потребление — 190 тыс. т. Российские компании могут производить 500 наименований препаратов и на 100% обеспечивать потребности России. В настоящее время более 100 компонентов для отечественного производства поступает из Китая, свыше 30 — из Европы. Внутренние потребности рынка отечественными ХСЗР удовлетворяются на 60%. При сокращении поставок в зарубежные страны страна могла бы удовлетворить потребности на 80%. Такая возможность достижения 80% обеспечения потребности возникает при налаживании отечественного синтеза 22-х молекул. Рыночная экономика не обеспечивает ожидаемых результатов без перехода на “мобилизационную” экономику при возрастающей роли государства в обеспечении производства с участием Минпромторга, Минобрнауки и РАН [16]. При решении этих вопросов следует учитывать особенности увеличения объемов производства и использования пестицидов с учетом регламентов документов зарубежных стран. В соответствии с Директивой 2009/128/ЕС об экологической устойчивости применения пестицидов Дания за 2011–2015 гг. предусматривала сокращение использования пестицидов на 40, Франция за 2008–2018 гг. — на 50, Германия к 2023 г. — на 30%. Фирмы США, Западной Европы планируют увеличение производства для удовлетворения спроса на биологические средства, покупают компании, специализирующиеся на производстве препаратов для биологической защиты растений. В Китае Госсоветом КНР принята программа, направленная на развитие биологической отрасли промышленности Китая, ее перехода в ведущую отрасль национальной экономики.

### ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ НА АРОЭКОСИСТЕМЫ РОССИИ

Новые направления реализации потенциала высокопродуктивных сортов культур представлены в сортовых технологиях техникой с элементами ИТ (информационных технологий) и точного земледелия на основе глобальных позиционных систем (GPS) в комплексах с оборудованием для **РТК** (терминал, автопилот и антенна), а также бортовыми компьютерами и программным обеспечением, которыми оснащены тракторные и самоходные опрыскивающие агрегаты.

Система GPS создает возможности мониторинга состояния развития растений и вредных организмов с использованием глобальных навигационных спутниковых систем и устанавливаемого навигационно-связанного оборудования на опрыскивающей технике с внешними приемниками GPS. Оборудование помогает механизаторам в управлении самоходными и тракторными агрегатами с прицепными или навесными опрыскивателями, перемещающимися на поле, следуя параллельными и равноудаленными линиями прямолинейного или криволинейного маршрутов. Кроме этого, технические средства осуществляют контроль подачи жидкости (рабочего раствора) из баков опрыскивателей в штанги (контроль расхода, дозирование распределения) и индивидуальной подачи раствора в разбрызгиватели на штангах опрыскивающих агрегатов.

Автоматизированное выполнение указанных функций позволяет в автоматическом режиме (без трудовых затрат механизатора) обеспечивать равномерное распределение пестицидов по обрабатываемой площади, уменьшая до минимума (на 10–20%) расход пестицидов и снижая опасность загрязнения агроэкосистем и всей окружающей среды. При этом решается в целом задача улучшения условий работы и облегчения труда, повышается механическая, техническая и химическая безопасность механизаторов, что характеризует социальную безопасность прогрессивных технологий.

Реализация современной техникой параметров прогрессивных технологий в защите растений с использованием элементов ИТ и точного земледелия в сортовых технологиях связана с автоматической поддержкой заданной нормы расхода препарата в зависимости от скорости агрегата, определяет включенный перечень форсунок, например, различающихся по окраске, которые включают поток рабочего раствора (сначала — синие, после набора скорости — красные, еще быст-

рее — обе группы форсунок). Опрыскивающий агрегат может замерять участок площади, на котором внесен рабочий раствор с включением форсунок поштангово или поштучно в нужных местах; автоматически менять нормы расхода жидкости без изменения размера капель в зависимости от суммарной площади листьев вместо показателя обрабатываемой площади. При этом общая экономия пестицидов и других затрат достигает 10%. Кроме этого достигается экономичность в использовании инструментов цифровизации, спутникового анализа полей, применения информации агрохимической и фитосанитарной служб. Использование модулей ИТ и точного земледелия в опрыскивающей технике для защиты растений зарубежного производства типа “Амазоне” и отечественного, начавшего выпускать технику с комплектующими ИТ и точного земледелия, которая интегрируется в любой GPS тракер (Автограф и другое оборудование, обеспечивающее видимость) позволяет контролировать норму внесения, давление на форсунках, скорость движения, возможность корректирования, при необходимости анализа — сохранять информацию за любой период времени (день, месяц, год). Общий экономический эффект работы элементов оценивается в 5 тыс. руб./га [18]. Техника различается по выполняемым функциям ИТ, а также ценой. Например, оборудование техники системой GPS на предприятии “Казаньсельхозмаш” позволяет выполнять защиту растений в сельскохозяйственных предприятиях и крестьянских (фермерских) хозяйствах, начиная от приборов для мониторинга состояния развития растений до глобальных навигационных спутниковых систем.

Особенностью предприятия “Казаньсельхозмаш” является его специализация на выпуске крупногабаритной техники для выполнения защитных мероприятий в крупных сельскохозяйственных предприятиях, с товарным производством зерновых и других культур. Техника представлена самоходными опрыскивателями ОС-3000 Барс со штангой 24 м, емкостью бака 3000 л, производительностью 35–45 га/ч. Кроме ОС-3000-М Барс предприятие выпускает прицепные ОП-3000 Барс и ОП-4000 Барс, ОП-2000 Руслан и ОП-2000 Агро. Выпускаемая отечественная техника по заказам пользователей может оснащаться бортовыми компьютерами, обеспечивающими контроль основных параметров работы опрыскивателей, GPS-навигатором Commander — для параллельного вождения и автоматического отключения секций опрыскивателя в зонах перекрытия, может выполнять ночной

режим работ с целью продления длительности работы и повышения качества опрыскивания [18].

Определен экономический эффект использования инструментов цифровизации, спутникового анализа полей и поставки информации в модулях зарубежной техники (серия “Амазоне”) и в отечественной технике на примере серии “Гварта-5” [19], интегрирующейся в любой GPS-трекере (Автограф и др.). Примерные цены прогрессивной техники с комплектующими ИТ и точного земледелия для защиты растений более высокие, изменяются в интервале 1295–2235 тыс. руб. [5]. При меньшей площади земельных угодий, чем 3000 га и посевной площади 2500 га сельскохозяйственные организации и крестьянские (фермерские) хозяйства используют традиционную опрыскивающую технику с емкостью баков 2000–2500 л и с шириной захвата штанг 6–12–18–24 м, цены на которую изменяются в интервале 525–1150 тыс. руб. [19].

В новых условиях рыночной многоукладной экономики рассматривается выгодное применение прогрессивных технологий, сдерживающих риски снижения потерь урожая высокопродуктивных сортов от вредных организмов в зерновом производстве и производстве технических культур. Использование прогрессивной техники с элементами ИТ и точного земледелия (с комплектующими деталями, приборами и программным обеспечением) при применении химических средств защиты растений от вредных организмов в крупных по площади землепользователей обеспечивает окупаемость затрат на приобретение и эксплуатацию относительно дорогой техники. В перечне землепользователей, представленных в многоукладном производстве в РФ по величине площадей, имеют возможности окупать затраты сельскохозяйственные предприятия и крестьянские (фермерские) хозяйства, представленные в табл. 9. Согласно представленным данным, наиболее эффективно и рентабельно мероприятия защиты растений проходят в сельских предприятиях и крестьянских (фермерских) хозяйствах, реализующих возможности техники на площади земель >3000 га, посевной площади >2500 га, в которых имеются возможности для выполнения больших объемов работ при применении высокопроизводительной техники, что обеспечивает высокий уровень защиты растений с эффективностью >90% и условия выращивания высокого урожая зерновых культур 4–6 т/га. Дополнительно землепользователи должны также иметь: высокий уровень общей культуры земледелия, семеноводства и использования сортов с высоким потенциалом продуктивности, эффективно ис-

**Таблица 9.** Характеристика сельских хозяйств различных экономических укладов по величине площади земельных ресурсов в РФ (2017–2018 гг.)

| Земельные ресурсы организаций         | Сельскохозяйственные предприятия | Крестьянские (фермерские) хозяйства | Личные хозяйства населения | Итого |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-------|
| Количество организаций, имеющих землю | 32054                            | 140046                              |                            |       |
| Общая площадь пашни, тыс. га          | 290781                           | 43312                               |                            |       |
| Посевная площадь, тыс. га             | 54437                            | 23108                               | 2505                       | 80048 |
| из них под зерновые культуры*         | 31618                            | 15632                               | 455                        | 47705 |

\*Включая зернобобовые культуры.

пользовать удобрения и средства защиты растений на всей площади распространения вредных организмов (выше экономических порогов вредоносности), безубыточное рентабельное производство, быть финансово обеспеченными и кредитоспособными.

В совокупности в РФ из группы 32054 сельскохозяйственных предприятий с посевной площадью 54.4 млн га и зерновых культур – 31.6 млн га, а также из группы 140046 крестьянских (фермерских) хозяйств (соответственно 23.1 и 15.6 млн га) имеют допустимые агротехнические и производственные параметры ~20% землепользователей (площадь 9137 тыс. га). Среди них – большинство предприятий и хозяйств с высокой культурой земледелия, обеспеченностью материально-техническими ресурсами (высокопродуктивные сорта, удобрения, пестициды, ГСМ и др.), с материальной помощью государства, со средней урожайностью 4–6 т/га (в среднем 4.46 т/га) [20].

Новые возможности использования прогрессивной техники для защиты растений имеют при меньших площадях предприятия и хозяйства при использовании беспилотных летательных аппаратов для обработки агроэкосистем удобрениями и пестицидами со следующими функциями и параметрами отечественной техники [21]:

1. Емкость бака – 32 л, время полета – 10–15 мин, аккумулятор – 2 шт., 16S 16000 мАч, ширина распыления – 10 м.
2. Производительность распыления – ~14–16 га/ч, форсунка – 4 центробежных форсунки
3. Алюминиевый транспортировочный ящик – 1 шт., комплект инструмента для ремонта и обслуживания дрона – 1 шт.
4. Пульт управления с интегрированной телеметрией – FPV-камера ночного видения + 5-дюймовый экран.
5. 2-позиционное зарядное устройство 220 Вт;
6. Программное обеспечение.

7. Радар для предупреждения столкновения с препятствиями – 2 шт.

8. Радар слежения за местностью – 1 шт.

Пример экономической эффективности использования прогрессивной техники с элементами ИТ и точного земледелия в сортовых технологиях пшеницы представлен на основе данных, полученных при оптимальной площади культур 2400 га [22] (табл. 10).

Обобщенные показатели экономической эффективности систем комплексной защиты растений при применении пестицидов 3-х групп (инсектицидов, фунгицидов, гербицидов) и опрыскивающих агрегатов, оснащенных ИТ-комплектующими, в технологиях выращивания сортов с высоким генетическим потенциалом, при научно обоснованном использовании средств химизации, на фоне высокого общего уровня земледелия представлены в табл. 11. Показано, что рентабельность выращивания зерновых культур достигала 102%, технических культур – увеличивалась до 134%. При этом учитывали показатели сохраненного урожая (20%) и повышения производительности труда в результате рационального использования площади и качественной технологии выращивания культур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологий защиты растений в агроэкосистемах в условиях рыночной экономики России основано на выращивании сортов стратегических зерновых и технических культур отечественной селекции с высоким генетическим потенциалом. Потенциал реализуется с применением техники защиты растений с элементами информационных технологий и точного земледелия, минеральных удобрений и пестицидов по научно обоснованным нормам. При этом успехи достигаются в группе сельскохозяйственных предприятий и крестьянских (фермерских) хозяйств с посевными площадями зерновых и тех-



- ный и зарубежный опыт: аналит. обзор. М.: Росинформагротех, 2020. 124 с.
7. Сельскохозяйственный энциклопедический словарь / Под ред. Месяца В.К. М.: Сов. энциклопедия, 1980. С. 515.
  8. Главное агрономическое совещание [Электр. ресурс]. URL: [www.nsss-russia.ru/2020/02/01/главное-агрономическое-совещание/#more9088](http://www.nsss-russia.ru/2020/02/01/главное-агрономическое-совещание/#more9088) (дата обращения: 17.02.2020).
  9. Развитие селекции и семеноводства в Российской Федерации // Аналитическое управление аппарата Совета Федерации [Электр. ресурс]. URL: [razvitye-selektsii-y-semenovodstva-v-rf.-sf-14.03.2019.pdf](http://razvitye-selektsii-y-semenovodstva-v-rf.-sf-14.03.2019.pdf) (дата обращения: 15.03.2020).
  10. Доля российских семян на рынке составляет менее 63% [Электр. ресурс]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/markets/news/33208-dolya-rossiyskikh-semyan-na-rynke-sostavlyayet-menee-63/> (дата обращения: 14.02.2020).
  11. Mineral fertilizer use and environment // World fertilizer trends and outlook to 2020. IFA Production fertilizer in 2020. 27 p.
  12. Волкова А.В. Рынок минеральных удобрений. М.: Нац. исслед. ун-т «ВШЭ», Центр развития, 2019. 52 с.
  13. Хорева Р.А., Селезнева Е.А., Карпова Г.Ю. Сельское хозяйство в России. 2021. М.: Федерал. служба гос. статистики, 2021. 52 с.
  14. СКФО-АГРО Газета. № 6. 11.05.2022. С. 2.
  15. Аналитика. Отечественные ХСЗР лидируют // Поле Августа АП. 2021. № 9.
  16. Власова Я. Весна-2022 // Betarenagro. 2022. № 3. С. 2–4.
  17. Пенегин В. Цифра начинает работать // Поле Августа АП. 2020. С. 4.
  18. Казаньсельхозмаш. Техника для защиты растений. 18 с. <https://www.rosagroleasing.ru/catalog/176/?ysclid=lgtx4bpeuz206934889>
  19. Группы компаний “Агротех-Гарант”, прайс-лист. ООО “Агротех Инвест”, [www.gvarta.com](http://www.gvarta.com). 8 с.
  20. Российский статистический ежегодник. М.: Федерал. служба гос. статистики, 2018. 693 с.
  21. Дроны применяются для посева и обработки полей удобрениями, пестицидами (JT32L-606QC, JT20L-606, JT16L-606QC, JT15L-606, JT10L-606QC + туманообразователь, JT10L-606QC, JT10L-66, туманообразователь JT).
  22. Внедрение инновационных технологий. Agro-Softintegratidsystemtwwagrosoft.ru. Комплексная информатизация предприятий НПО “Центр земледелия и современных технологий” М. Красносельский 1-й, 18 с.
  23. Захаренко В.А. Экономическая эффективность пестицидов в агро-экосистемах стратегически важных культур при использовании техники с элементами информационных технологий и точного земледелия // Достиж. науки и техн. 2022. Т. 36. № 2. С. 4–7. [https://doi.org/10.53859/02352451\\_2022\\_36\\_2\\_4](https://doi.org/10.53859/02352451_2022_36_2_4)

## Features of the Development of Plant Protection Technologies in Agroecosystems in the Conditions of the Russian Market Economy

V. A. Zakharenko

*Federal Research Center “Nemchinovka”  
ul. Agrochimikov 6, Moscow region, r.p. Novoivanovskoye 143026, Russia  
E-mail: zva@mosniish.ru*

The results of research characterizing the development of plant protection technologies in agroecosystems in the conditions of the market economy of Russia in the cultivation of varieties of strategic grain and industrial crops of domestic breeding with high genetic potential are presented. The potential is realized with the use of plant protection equipment with elements of information technology and precision farming, mineral fertilizers and pesticides according to scientifically sound standards. At the same time, success is achieved in a group of agricultural enterprises and peasant (farmer) farms with sown areas of grain and industrial crops >2500 hectares, optimal for the rational use of machinery, with a high culture of agriculture, provided with material, technical and financial resources and leading profitable production. In 2016–2020, the analyzed group of highly productive varieties of cereals and industrial crops covered ~20% of the areas of agroecosystems at the current level of development of breeding, seed production and genetics, the use of mineral fertilizers and pesticides, as well as equipment with elements of information technology and precision agriculture. The prospects of expanding the group of crops in connection with the further improvement of the organization of breeding and seed production, the supply of fertilizers and pesticides based on the development of not only progressive drugs, but also created molecules of domestic active substances, in new conditions in connection with the tasks of food security of the country.

**Key words:** agroecosystem, plant protection, grain and industrial crops, peasant (farmer) farms, pesticides, breeding, seed production, agricultural enterprises, fertilizers.

УДК 631.432.24: 631.445.41:631.559:633.63(470.32)

## РЕЖИМ ВЛАЖНОСТИ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО, УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ РАЗНЫХ ПОГОДНЫХ И АГРОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ В ЦЧР

© 2023 г. О. К. Боронтов<sup>1</sup>, П. А. Косякин<sup>1,\*</sup>, Е. Н. Манаенкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова  
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, п. ВНИИСС, 86, Россия

\*E-mail: kosyakinp@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.

После доработки 03.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Эффективность использования влаги и урожайность сахарной свеклы увеличивались при применении удобрений, комбинированной обработки почвы и увеличении коэффициента увлажнения (по Иванову) за 2 мес. до уборки. Более благоприятный режим влажности почвы и меньшая плотность сложения в посевах сахарной свеклы складывались в условиях высокого увлажнения при комбинированной обработке почвы. Лучшие технологические качества корнеплодов определены при среднем увлажнении и комбинированной обработке. Доля влияния погодных условий на урожайность культуры составила 51, удобрений — 30, обработки почвы — 3%. Наибольшая урожайность сахарной свеклы (48.3–48.5 т/га), энергетическая эффективность (4.6) и рентабельность производства (95%) установлены при разноглубинной отвальной и комбинированной обработках почвы в севообороте, внесении удобрений и высоком увлажнении почвы.

**Ключевые слова:** сахарная свекла, обработки почвы, удобрения, метеорологические условия, влажность, плотность сложения, чернозем выщелоченный, урожайность, технологические качества, энергетическая эффективность.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080033, **EDN:** ZDLAZB

### ВВЕДЕНИЕ

При обсуждении результатов исследования часто делают выводы, не учитывая влияние погодных условий [1–6]. Однако известно, что их влияние на продуктивность культур высоко, о чем свидетельствуют изменения урожайности сельскохозяйственных культур по годам [7–10].

О влиянии способа обработки почвы, удобрений и осадков вегетационного периода на водный режим чернозема уже сообщали [11]. Однако величины прямого влияния отдельных факторов и их сочетаний на качество и продуктивность сахарной свеклы в Центрально-Черноземном регионе в разных погодных условиях подвержены не только влиянию количества осадков, но и влажности воздуха, температурного режима, агрохимических и агрофизических свойств почвы.

Цель работы — изучение влияния систем обработки почвы и удобрений на режим влажности чернозема выщелоченного, урожайность и качество сахарной свеклы в различных погодных условиях.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в стационарном опыте “Система обработки почвы в сочетании с удобрением и другими средствами химизации культур в зерносвекловичном севообороте”, который проводит Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова с 1987 по 2020 г. в 9-польном плодосменном севообороте со следующим чередованием культур: черный пар—озимая пшеница—сахарная свекла—ячмень с подсевом клевера—клевер на 1 укос—озимая пшеница—сахарная свекла—однолетние травы—кукуруза на зеленый корм.

Изучены 3 системы основной обработки почвы: А — разноглубинная отвальная обработка под все культуры в севообороте: под кукурузу и черный пар на глубину 25–27 см, под ячмень, озимую пшеницу после клевера, однолетние травы — на глубину 20–22 см, под сахарную свеклу — обработка по схеме улучшенной зяби (дисковое лушение на 6–8 см, плоскорезное рыхление на 12–14 см,

затем вспашка на 30–32 см); Г — безотвальная (плоскорезная) обработка под все культуры в севообороте: под кукурузу и черный пар — на глубину 25–27 см, под озимую пшеницу после клевера, ячмень, однолетние травы — на глубину 20–22 см, под сахарную свеклу — обработка по схеме улучшенной зяби (дисковое лушение на 6–8 см, плоскорезное рыхление на 12–14 см, затем глубокая плоскорезная обработка на глубину 30–32 см); Д — комбинированная (отвально-безотвальная) обработка в севообороте: отвальная обработка под кукурузу и черный пар на глубину 25–27 см, плоскорезная обработка под озимую пшеницу, высеваемую после клевера, однолетние травы, ячмень — на глубину 20–22 см, под сахарную свеклу — улучшенная отвальная зябь (дисковое лушение на 6–8 см, плоскорезное рыхление на 12–14 см, затем вспашка на 30–32 см).

Влияние основной обработки почвы изучали на удобренном (контроль) и удобренном фоне, где вносили: навоз 50 т/га в черном пару и навоз 50 т/га под сахарную свеклу в звене с клевером. Минеральные удобрения применяли под озимую пшеницу, высеваемую после клевера (N60P60K60), под ячмень — N40P40K40, под однолетние травы — N20P20K20, подкормка клевера — N20P20K20, под кукурузу — N80P80K80, под сахарную свеклу в звене с черным паром — N160P160K160, в звене с клевером — N150P150K150. Всего вносили N59P59K59 + навоз 11 т/га севооборотной площади. Площадь делянки 110 м<sup>2</sup>, учетной — 13.5 м<sup>2</sup>, повторность трехкратная.

Для основной обработки почвы использовали плуг ПН-4-35, плоскорез КПП-250, лушильники ЛДГ-10 и БДТ-3. В качестве минерального удобрения применяли нитроаммофоску (16 : 16 : 16), вносили РУМ-500. Агротехника возделывания — общепринятая для ЦЧЗ, при которой сорные растения уничтожали почвенными гербицидами. Посев сахарной свеклы проводили районированными гибридами и сортами в 1-й декаде мая, уборку — в 3-й декаде сентября.

В течение вегетационного периода в посевах сахарной свеклы отбирали образцы почвы и определяли: влажность — весовым методом (ГОСТ 26268-89); плотность сложения — методом цилиндров по Качинскому [12], урожайность сахарной свеклы — по методике ВНИС [13], технологические качества сахарной свеклы — по Силину [14], энергетическую оценку — по методике ВАСХНИЛ [15], экономическую эффективность — по методике РАСХН [16], статистическую обработку — по [17].

Почва стационарного опыта — чернозем выщелоченный малогумусный среднесильноглинистый. Содержание гумуса в пахотном слое составляло 5.4–5.7%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольший коэффициент корреляции — 0.73 установлен между урожайностью и коэффициентом увлажнения в августе–сентябре. Корреляция между урожайностью сахарной свеклы и другими погодными факторами (осадки вегетационного периода, суммарное водопотребление, ГТК за вегетационный период и за август–сентябрь) составили 0.26–0.64. Это происходило за счет перераспределения количества осадков на 2-ю половину вегетации, особенно на август, что является наиболее критическим периодом по потребности сахарной свеклы во влаге [18].

Установлены 3 группы лет: первая группа (низкое увлажнение) имела следующие показатели благоприятного влияния на урожайность сахарной свеклы: коэффициент увлажнения за 2 мес до уборки культуры составил 0.4, количество осадков за год — 578 мм, за вегетацию — 276 мм, варьирование урожайности сахарной свеклы в контроле — от 10.9 до 26.2 т/га, в удобренном варианте — от 19.3 до 34.5 т/га. Средняя прибавка от применения удобрений составила 50%. В группе оказалось 11 лет (1988, 1991, 1994, 1998, 1999, 2004, 2009, 2010, 2014, 2015, 2019) или 34%, которая характеризовалась низкой температурой мая — 15.5°C, высокой температурой июля и августа — 21–22°C. Количество осадков в мае составило 72, в июне — 80, в июле — 52 мм в августе — 48, в сентябре — 30 мм, что составило 167, 115, 70, 89 и 52% от среднегодовых показателей соответственно.

Вторая результативная группа лет (среднее увлажнение) сформирована при коэффициенте увлажнения 0.9. Количество осадков за вегетационный период — 320 мм, за год — 641 мм. Варьирование урожайности составило: без удобрений — 18.5–30.3 т/га, при их применении — 31.0–39.8 т/га. В группе 12 лет (1987, 1990, 1993, 1995, 1996, 1997, 2000, 2001, 2005, 2006, 2011, 2016, 2020) или 38%. За первую и вторую половину вегетации выпало примерно равное количество осадков — в мае — 52, в июне — 79, в июле — 53, в августе — 60, в сентябре — 79 мм, что составило 121, 113, 71, 111 и 136% от среднегодовых показателей соответственно. Температурный режим характеризовался более умеренными показателями — 19–21°C.

Третья группа лет исследования (высокое увлажнение) характеризовалась следующими показателями (9 лет исследований — 1989, 1992,

**Таблица 1.** Динамика общих запасов почвенной влаги в посевах сахарной свеклы, мм (послойно, см)

| K <sub>y</sub>    | Система   |           | Период вегетации |      |       |          |      |       |        |      |       |
|-------------------|-----------|-----------|------------------|------|-------|----------|------|-------|--------|------|-------|
|                   | обработки | удобрения | посев            |      |       | середина |      |       | уборка |      |       |
|                   |           |           | 0—30             | 0—50 | 0—100 | 0—30     | 0—50 | 0—100 | 0—30   | 0—50 | 0—100 |
| 0.4               | А         | 0         | 75.6             | 142  | 297   | —        | —    | —     | 71.3   | 122  | 252   |
|                   |           | NPK       | 89.8             | 156  | 322   | 65.4     | 116  | 270   | 72.8   | 122  | 246   |
|                   | Г         | 0         | 72.6             | 145  | 304   | —        | —    | —     | 76.1   | 134  | 266   |
|                   |           | NPK       | 86.9             | 158  | 328   | 67.2     | 128  | 280   | 72.1   | 129  | 266   |
|                   | Д         | 0         | 79.9             | 147  | 301   | —        | —    | —     | 72.7   | 127  | 258   |
|                   |           | NPK       | 85.2             | 151  | 306   | 61.8     | 107  | 238   | 70.5   | 121  | 243   |
| 0.9               | А         | 0         | 66.4             | 147  | 301   | 51.7     | 110  | 239   | 69.1   | 133  | 274   |
|                   |           | NPK       | 83.4             | 148  | 309   | 59.3     | 105  | 233   | 76.1   | 145  | 253   |
|                   | Г         | 0         | 81.7             | 159  | 317   | 64.7     | 102  | 257   | 65.4   | 146  | 296   |
|                   |           | NPK       | 85.4             | 153  | 311   | 60.5     | 115  | 248   | 66.3   | 142  | 273   |
|                   | Д         | 0         | 77.4             | 140  | 301   | 60.4     | 103  | 210   | 66.4   | 139  | 271   |
|                   |           | NPK       | 82.0             | 149  | 307   | 57.2     | 96.8 | 214   | 77.8   | 134  | 264   |
| 1.5               | А         | 0         | 76.3             | 139  | 295   | 59.4     | 108  | 244   | 70.4   | 132  | 288   |
|                   |           | NPK       | 72.8             | 139  | 300   | 60.3     | 110  | 259   | 77.7   | 138  | 279   |
|                   | Г         | 0         | 76.6             | 141  | 301   | 63.7     | 115  | 263   | 70.7   | 134  | 294   |
|                   |           | NPK       | 80.2             | 150  | 302   | 68.3     | 115  | 274   | 77.8   | 144  | 296   |
|                   | Д         | 0         | 78.0             | 142  | 295   | 62.1     | 110  | 247   | 69.3   | 131  | 280   |
|                   |           | NPK       | 78.3             | 137  | 290   | 57.7     | 106  | 249   | 75.9   | 134  | 279   |
| HCP <sub>05</sub> |           |           |                  | 7    | 22    |          | 5    | 18    |        | 9    | 20    |

2002, 2003, 2007, 2008, 2012, 2013, 2017, 2018, что составило 28%): коэффициент увлажнения — 1.5, количество осадков за год — 683 мм, вегетационного периода — 360 мм. Урожайность контроля по годам составляла 24.9–46.7 т/га, с применением удобрений — 38.7–54.8 т/га. В третьей группе температурный режим соответствовал первой группе: в мае температура составила 17°C, в июне — 20°C, в июле — 22°C, в августе — 21°C, в сентябре — 15°C. Количество осадков за май–июнь было равно 30 мм, или 70% от среднееголетних показателей, в августе увеличилось до 82 мм, или до 152%, за сентябрь — до 92 мм, или 159% соответственно.

Изучение влажности почвы в весенний период показало, что в слое 0–30 см содержалось влаги 66.4–89.8 мм, в слое 0–50 см — 130–159 мм, в слое 0–100 см — 290–328 мм (табл. 1). В этот срок определения не обнаружено влияние обработки почвы и условий увлажнения на запас влаги. В слое почвы 0–100 см при низком и среднем коэффициенте увлажнения отмечена тенденция к увеличению запасов влаги при безотвальной обработке почвы на 5–6%.

При оценке запасов влаги в середине вегетации сахарной свеклы установлено, что значительные показатели в 1-метровом слое почвы были

при безотвальной обработке почвы: при низком увлажнении — 280 мм, при среднем — 257 мм, при высоком — 274 мм. Более низкие запасы влаги в почве оказались при комбинированной обработке почвы — 210–214 мм при среднем увлажнении, 238 мм — при низком увлажнении и 247–249 мм — при высоком коэффициенте увлажнения.

Таким образом, за первую половину вегетационного периода уже наблюдали различия в режиме влажности почвы. Это подтвердили расчеты водопотребления сахарной свеклы за счет запасов почвенной влаги. Наибольший расход почвенной влаги из слоя 0–100 см составил 90.5–92.4 мм при комбинированной обработке почвы и среднем увлажнении, наименьший — 28.1–36.9 мм — при безотвальной обработке почвы и высоким увлажнении. Расход влаги почвы из слоя 0–50 см варьировал от 25.9 до 52.1 мм. В среднем он составил в удобренных вариантах 38.4 мм при низком увлажнении, 44.5 мм — при среднем, и 31.4 мм — при высоком. При среднем увлажнении водопотребление за счет запасов почвенной влаги в удобренных вариантах повышалось, а при высоком — уменьшалось на 20–25%.

При уборке сахарной свеклы условия увлажнения за август–сентябрь значительно повлияли на

Таблица 2. Водопотребление сахарной свеклы

| $K_y$ | Система   |           | Водопотребление     |                                                   |       |                   | Коэффициент, мм/т    |                   |
|-------|-----------|-----------|---------------------|---------------------------------------------------|-------|-------------------|----------------------|-------------------|
|       | обработки | удобрения | суммарное,<br>мм/га | в т.ч. за счет почвенных запасов,<br>послойно, см |       |                   | водопотреб-<br>ления | транспира-<br>ции |
|       |           |           |                     | 0–50                                              | 0–100 | % к<br>суммарному |                      |                   |
| 0.4   | А         | 0         | 295                 | 21                                                | 45    | 15                | 14.2                 | 37.5              |
|       |           | NPK       | 330                 | 33                                                | 80    | 24                | 10.1                 | 28.7              |
|       | Г         | 0         | 288                 | 11                                                | 38    | 13                | 15.5                 | 40.7              |
|       |           | NPK       | 302                 | 30                                                | 52    | 17                | 11.1                 | 31.6              |
|       | Д         | 0         | 292                 | 20                                                | 42    | 14                | 14.9                 | 37.5              |
|       |           | NPK       | 314                 | 30                                                | 64    | 20                | 10.1                 | 26.4              |
| 0.9   | А         | 0         | 347                 | 0                                                 | 27    | 8                 | 12.7                 | 38.5              |
|       |           | NPK       | 377                 | 2                                                 | 57    | 15                | 10.4                 | 26.6              |
|       | Г         | 0         | 341                 | 10                                                | 21    | 6                 | 13.8                 | 40.0              |
|       |           | NPK       | 358                 | 12                                                | 38    | 11                | 10.2                 | 27.9              |
|       | Д         | 0         | 349                 | 1                                                 | 29    | 8                 | 13.6                 | 40.0              |
|       |           | NPK       | 364                 | 14                                                | 44    | 12                | 10.1                 | 27.0              |
| 1.5   | А         | 0         | 366                 | 6                                                 | 6     | 2                 | 9.7                  | 36.5              |
|       |           | NPK       | 367                 | 1                                                 | 7     | 2                 | 7.6                  | 21.3              |
|       | Г         | 0         | 366                 | 6                                                 | 6     | 2                 | 10.5                 | 32.3              |
|       |           | NPK       | 369                 | 6                                                 | 9     | 2                 | 8.5                  | 23.5              |
|       | Д         | 0         | 375                 | 11                                                | 15    | 4                 | 10.1                 | 29.0              |
|       |           | NPK       | 372                 | 3                                                 | 12    | 3                 | 7.7                  | 20.5              |

запас влаги в почве. При низком увлажнении запасы влаги в слое почвы 0–100 см составили 243–276 мм, при среднем – 264–296 мм, или увеличились на 6%, при высоком – 279–294 мм, или на 12% соответственно. Больше всего запасов влаги в почве оказалось при безотвальной обработке почвы – 266–296 мм. Корреляция между коэффициентом увлажнения ( $K_y$ ) в августе–сентябре и показателями водопотребления сахарной свеклы была сильной (0.88–0.99).

Большое влияние условия увлажнения оказали на суммарное водопотребление сахарной свеклы – оно изменялось под влиянием погодных условий и агротехнических приемов возделывания. При  $K_y$ , равном 0.4, оно составляло без удобрений 314–321 мм, при  $K_y$ , равном 0.9, – 360–397 мм (табл. 2).

Системы обработки почвы влияли на суммарное водопотребление при низком и среднем увлажнении, а при высоком не изменяли водопотребление сахарной свеклы. При низком и среднем увлажнении и безотвальной обработке почвы с применением удобрений суммарное водопотребление составило 302 и 358 мм соответствен-

но, что на 6% меньше, чем при разноглубинной отвальной обработке.

Различия в водопотреблении объясняются способностью растений использовать запасы почвенной влаги. При низком увлажнении они использовали влагу почвенных слоев в количестве 38–80 мм, или 13–24% от суммарного водопотребления, при среднем увлажнении – 21–57 мм, или 6–15%, при высоком увлажнении – 6–15 мм, или 2–4% соответственно. Следовательно, чем засушливее погодные условия, тем большее количество запасов почвенной влаги используется.

При низком и среднем увлажнении большее водопотребление, в том числе за счет почвенной влаги, наблюдали при разноглубинной отвальной обработке почвы. Наименьшее использование влаги почвенных слоев приходилось на безотвальную обработку почвы. При разноглубинной отвальной обработке без удобрений при низком увлажнении из 1-метрового слоя почвы было использовано 45 мм влаги, при безотвальной обработке – 38 мм, или на 16% меньше. При высоком увлажнении водопотребление не изменялось под влиянием обработки и удобрений. Установлено, что при низком и среднем увлажнении приме-

ненные удобрения на 5–12% увеличивали водопотребление сахарной свеклы.

Коэффициент водопотребления при увлажнении 0.4 составил без удобрений 14.2–15.1 мм/т, а с их использованием – 10.1–11.1 мм/т, или снижался на 29–32%. При среднем увлажнении (0.9) коэффициент водопотребления составил в контроле 12.7–13.8 мм/т, при использовании удобрений снизился на 18–26%. При высоком увлажнении (1.5) коэффициент водопотребления составил 9.7–11.5 мм/т в контроле, и 7.6–8.5 мм/т – при применении удобрений (снижение на 22–26%). Самый низкий коэффициент водопотребления отмечен при применении удобрений, комбинированной и разноглубинной отвальной обработках почвы при любых условиях увлажнения.

Коэффициент транспирации составил 20.5–40.7 мм/т. В среднем, при коэффициенте увлажнения 0.4 он был равен 33.7 мм/т, при 0.9–33.3 мм/т, при 1.5–27.2 мм/т. Изменения в величине коэффициента транспирации были такими же, как и коэффициента водопотребления. Самый большой коэффициент транспирации 40.0–40.7 мм/т был при безотвальной обработке почвы в контроле при низком и среднем увлажнении. При высоком увлажнении коэффициент транспирации снижался на 20% по сравнению с низким увлажнением.

Корреляция между коэффициентом увлажнения и показателями водопотребления сахарной свеклы была сильная и составила: для суммарного водопотребления – 0.88, для коэффициентов водопотребления, транспирации, использования запасов почвенной влаги – 0.95–0.99.

Плотность сложения пахотного слоя почвы является важным показателем физического состояния чернозема. Требования растений к плотности сложения почвы изучены многими исследователями и различны для типов почв и видов растений. Показатели оптимального сложения пахотного слоя почвы варьируют от 0.88 до 1.40 г/см<sup>3</sup> [19–22].

Изучение плотности сложения почвы в период вегетации сахарной свеклы выявило, что при посеве плотность сложения зависела от систем обработки почвы и увлажнения. Например, в слое почвы 0–10 см при разноглубинной отвальной обработке плотность сложения составила при низком увлажнении – 1.09, при среднем – 1.03, при высоком – 0.98 г/см<sup>3</sup> (табл. 3). Плотность сложения слоя почвы 10–20 см увеличивалась и составляла при разноглубинной отвальной обработке 1.16–1.18, при безотвальной – 1.18–1.27, при комбинированной – 1.13–1.25 г/см<sup>3</sup>. Отмечено, что наименьшая плотность сложения была при высоком увлажнении.

Подпахотный слой почвы (30–40 см) был самым плотным, его плотность сложения составляла при низком и среднем увлажнении при разноглубинной отвальной обработке 1.25–1.26, при высоком увлажнении – 1.36 г/см<sup>3</sup>, при безотвальной обработке – 1.29–1.31 и 1.40 г/см<sup>3</sup> и при комбинированной – 1.28–1.30 и 1.35 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Плотность сложения 0–30 см слоя почвы при низком увлажнении составила 1.18–1.20, при среднем – 1.15–1.20, при высоком – 1.09–1.13 г/см<sup>3</sup>. Следовательно, погодные условия влияли на плотность сложения почвы при посеве сахарной свеклы.

К уборке плотность сложения слоя почвы 0–10 см увеличивалась. Например, при разноглубинной отвальной обработке увеличение составило 1–5%, при безотвальной – 11–17%. Больше уплотнение происходило при высоком увлажнении.

Динамика плотности сложения показала, что в период вегетации сахарной свеклы при разноглубинной отвальной и безотвальной обработках почвы в слоях почвы происходило увеличение показателя, а при комбинированной обработке – снижение, т.е. улучшение строения пахотного слоя чернозема выщелоченного.

Средняя за вегетацию плотность сложения пахотного и подпахотного слоев почвы не изменялась при различных обработках почвы и составила 1.19–1.20 г/см<sup>3</sup> – для слоя 0–30 см и 1.27–1.29 г/см<sup>3</sup> – для слоя 30–40 см при низком увлажнении. При среднем увлажнении плотность сложения пахотного слоя увеличивалась при безотвальной обработке на 3% по сравнению с комбинированной и разноглубинной отвальной.

При высоком увлажнении средняя плотность сложения пахотного слоя снижалась до 1.13 г/см<sup>3</sup> или в среднем на 4% по сравнению с плотностью при низком увлажнении. Самая низкая плотность сложения была при комбинированной обработке, а безотвальная обработка почвы существенно (на 0.05 г/см<sup>3</sup>) увеличивала показатель.

При высоком увлажнении плотность сложения подпахотного слоя почвы увеличилась, и составила при разноглубинной отвальной обработке 1.35, при безотвальной – 1.36, при комбинированной – 1.32 г/см<sup>3</sup>.

Более благоприятный режим влажности почвы складывался в условиях высокого увлажнения при комбинированной обработке почвы за счет меньшей плотности сложения, лучшего строения пахотного слоя почвы и большей степени доступности влаги растениям.

Урожайность сахарной свеклы варьировала в широких пределах. Средняя урожайность состав-

**Таблица 3.** Плотность сложения почвы, г/см<sup>3</sup> (вариант с удобрениями), послойно

| Система обработки                         | Слой почвы, см | Коэффициент увлажнения в период вегетации |      |      |        |      |      |
|-------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|------|------|--------|------|------|
|                                           |                | посев                                     |      |      | уборка |      |      |
|                                           |                | 0.4                                       | 0.9  | 1.5  | 0.4    | 0.9  | 1.5  |
| А                                         | 0–10           | 1.09                                      | 1.03 | 0.98 | 1.14   | 1.04 | 1.03 |
|                                           | 10–20          | 1.18                                      | 1.19 | 1.16 | 1.21   | 1.25 | 1.27 |
|                                           | 20–30          | 1.27                                      | 1.26 | 1.18 | 1.32   | 1.36 | 1.33 |
|                                           | 0–30           | 1.18                                      | 1.16 | 1.10 | 1.22   | 1.22 | 1.21 |
|                                           | 30–40          | 1.25                                      | 1.26 | 1.36 | 1.32   | 1.27 | 1.33 |
| Г                                         | 0–10           | 1.00                                      | 1.06 | 0.98 | 1.11   | 1.15 | 1.15 |
|                                           | 10–20          | 1.27                                      | 1.24 | 1.18 | 1.24   | 1.21 | 1.22 |
|                                           | 20–30          | 1.27                                      | 1.28 | 1.24 | 1.30   | 1.31 | 1.31 |
|                                           | 0–30           | 1.18                                      | 1.19 | 1.13 | 1.22   | 1.22 | 1.23 |
|                                           | 30–40          | 1.29                                      | 1.31 | 1.40 | 1.28   | 1.27 | 1.32 |
| Д                                         | 0–10           | 1.02                                      | 1.02 | 0.91 | 1.06   | 1.07 | 1.09 |
|                                           | 10–20          | 1.25                                      | 1.25 | 1.13 | 1.20   | 1.13 | 1.14 |
|                                           | 20–30          | 1.35                                      | 1.34 | 1.22 | 1.25   | 1.24 | 1.26 |
|                                           | 0–30           | 1.20                                      | 1.20 | 1.08 | 1.17   | 1.15 | 1.16 |
|                                           | 30–40          | 1.28                                      | 1.30 | 1.35 | 1.26   | 1.28 | 1.28 |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub> для слоя 0–30 см |                | 0.04                                      | 0.03 | 0.04 | 0.03   | 0.03 | 0.04 |

ляла от 18.6 т/га в контроле при безотвальной обработке почвы при низком увлажнении до 48.5 т/га при внесении удобрений, разноглубинной отвальной обработке и высоком увлажнении (табл. 4).

Установлено, что при коэффициенте увлажнения за 2 мес до уборки, равном 0.4, средняя урожайность составила 24.9 т/га, при коэффициенте увлажнения 0.9–31.8 т/га, или увеличилась на 28%, при коэффициенте увлажнения 1.5–41.2 т/га, или увеличилась на 65%. При внесении удобрений урожайность сахарной свеклы достоверно увеличивалась в среднем до 37.6 т/га, или на 39%. Безотвальная обработка почвы достоверно на 11% снижала урожайность культуры по сравнению с разноглубинной отвальной и комбинированной обработками, где урожайность составила 33.0–33.8 т/га.

Улучшение условий питания растений сахарной свеклы не только повышало урожайность, но и нивелировало отрицательное влияние недостатка влаги. При разноглубинной отвальной обработке без удобрений при коэффициенте увлажнения 0.4 урожайность составила 20.7 т/га, при коэффициенте 0.9–27.3 т/га, или увеличивалась на 31%, при коэффициенте 1.5–37.6 т/га, или увеличение составило 81%, при внесении удобрений увеличение составляло 11 и 49% соответственно.

Изменения в урожайности корнеплодов на 51% были обусловлены воздействием сложившихся погодных условий (по результатам дисперсионного анализа), на 3% – с обработкой почвы и на 30% были связаны с применением удобрений. Взаимодействие изученных факторов было несущественным. Доля влияния погоды на урожайность сахарной свеклы, полученная в других исследованиях, проведенных в ЦЧР, составляла 40–47% [9, 23, 24], а доля влияния погодных условий на продуктивность культур изменялась от 19% для ячменя до 88% для льна [8]. Следовательно, хорошая обеспеченность растений влагой во 2-й период вегетации является гарантией существенного увеличения урожайности сахарной свеклы и других сельскохозяйственных культур.

Сахаристость сахарной свеклы за годы исследования изменялась от 14.8 до 20.2%, что свидетельствовало о влиянии изученных факторов на данный показатель. Установлено, что наибольшая сахаристость сахарной свеклы была при коэффициенте увлажнения 0.4–17.7–18.3% (средняя – 18.0%). При увеличении увлажнения сахаристость снижалась: при коэффициенте увлажнения 0.9 она составляла 16.9–17.5% (средняя – 17.2%), при коэффициенте увлажнения 1.5–15.9–16.6% (средняя – 16.2%). Наибольшая сахаристость сахарной свеклы при всех условиях увлажнения была при

**Таблица 4.** Урожайность (над чертой, т/га) и сахаристость (под чертой, %) сахарной свеклы

| Система                                           |           | Коэффициент увлажнения |             |             | Среднее обработок<br>$HCP_{05} = \frac{1.4}{0.3}$ | Среднее удобрения<br>$HCP_{05} = \frac{1.4}{0.3}$ |
|---------------------------------------------------|-----------|------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| обработки почвы                                   | удобрения | 0.4                    | 0.9         | 1.5         |                                                   |                                                   |
| А                                                 | Контроль  | <u>20.7</u>            | <u>27.3</u> | <u>37.6</u> | <u>33.8</u>                                       | <u>27.0</u>                                       |
|                                                   |           | 18.3                   | 17.4        | 16.3        | 17.1                                              | 17.3                                              |
|                                                   | NPK       | <u>32.5</u>            | <u>36.1</u> | <u>48.5</u> |                                                   | <u>37.6</u>                                       |
|                                                   |           | 18.0                   | 17.0        | 16.0        |                                                   | 16.8                                              |
| Г                                                 | Контроль  | <u>18.6</u>            | <u>24.8</u> | <u>31.9</u> | <u>31.2</u>                                       |                                                   |
|                                                   |           | 17.9                   | 17.2        | 16.2        | 17.0                                              |                                                   |
|                                                   | NPK       | <u>27.1</u>            | <u>35.0</u> | <u>43.5</u> |                                                   |                                                   |
|                                                   |           | 17.7                   | 16.9        | 15.9        |                                                   |                                                   |
| Д                                                 | Контроль  | <u>19.6</u>            | <u>25.7</u> | <u>37.2</u> | <u>33.0</u>                                       |                                                   |
|                                                   |           | 18.2                   | 17.5        | 16.6        | 17.2                                              |                                                   |
|                                                   | NPK       | <u>31.0</u>            | <u>36.0</u> | <u>48.3</u> |                                                   |                                                   |
|                                                   |           | 18.0                   | 17.1        | 16.1        |                                                   |                                                   |
| Среднее (увлажнение) $HCP_{05} = \frac{1.4}{0.4}$ |           | <u>24.9</u>            | <u>31.8</u> | <u>41.2</u> |                                                   |                                                   |
|                                                   |           | 18.0                   | 17.2        | 16.2        |                                                   |                                                   |

$HCP_{05}$  (частных) обработки —  $\frac{2.5}{0.4}$ , удобрения —  $\frac{2.0}{0.3}$ , увлажнения —  $\frac{2.4}{0.4}$ .

комбинированной обработке почвы в контрольных вариантах, а наименьшая — при безотвальной обработке с внесением удобрений. При низком увлажнении при применении удобрений сахаристость снижалась на 0.2–0.3%, при среднем и высоком увлажнении — на 0.4–0.8%.

Установлено, что хотя наибольшая сахаристость сахарной свеклы была отмечена при низком увлажнении (17.7–18.3%), но соотношение сахаристости и сухих веществ при таком увлажнении составило 64.1–66.9%, что было меньше, чем при среднем увлажнении (67.3–70.0%) (табл. 5). Доброкачественность очищенного сока составила при низком увлажнении 88.1–90.4%, при среднем — 91.4–92.9%, при высоком — 91.2–92.0%. Применение удобрений вело к некоторому снижению доброкачественности на 0.2–0.8%. Системы обработки почвы не повлияли на данный показатель.

Потери сахара в мелассе были минимальными при среднем увлажнении — 1.8–2.1%, самыми большими — при низком увлажнении (3.1–4.0%). При высоком увлажнении потери составили 2.3–2.8%. Безотвальная обработка почвы и примененные удобрения увеличивали потери сахара на 0.1–0.6% по сравнению с другими обработками почвы.

Выход сахара изменялся обратно пропорционально потерям. Наибольший выход сахара 13.8–14.7% был получен при среднем увлажнении. При этом отмечен повышенный коэффициент извлечения сахара из свеклы (82.3–84.0%). Большой выход сахара (14.7%) и коэффициент извле-

чения (84.0%) были при комбинированной обработке почвы в контроле. Выход сахара при низком увлажнении составил 12.7–14.4%, при высоком — 12.1–13.3%.

При низком увлажнении сбор сахара варьировал от 2.4 т/га при безотвальной обработке в контроле до 4.4 т/га при разноглубинной отвальной и комбинированной обработках в удобренном варианте, при среднем увлажнении — от 3.5 до 5.0–5.1 т/га, при высоком — от 4.0 до 6.1 т/га соответственно.

Коэффициент извлечения сахара при низком и высоком увлажнении уменьшался. Установлено, что самый низкий коэффициент извлечения сахара был при безотвальной обработке в удобренном варианте при низком увлажнении — 71.7, при среднем — 84.6, при высоком — 76.1%.

Следовательно, большее извлечение сахара соответствовало средним по увлажнению годам при комбинированной обработке почвы, а меньшее отмечено при низкой увлажненности и безотвальной обработке почвы, что обосновано с различием в химическом составе свекловичного сырья и связанных с этим потерях сахара. Внесенные удобрения снижали извлекаемость сахара ввиду ухудшения технологических качеств. Однако из-за высокой урожайности максимальный выход (сбор) сахара на заводе был при внесении удобрений, разноглубинной отвальной и комбинированной обработке и высоком увлажнении.

Коэффициент энергетической эффективности изменялся от 2.5 до 6.1. Установлено, что чем боль-

**Таблица 5.** Технологическое качество корнеплодов сахарной свеклы

| K <sub>y</sub> | Система   |           | Сахаристость,<br>% к СВ | РВ   | Зола | Азот<br>общий | Доброка-<br>чественность<br>очищенного<br>сока | Потери<br>сахара | Выход<br>сахара<br>на заводе | Сбор<br>сахара,<br>т/га | Коэффициент<br>извлечения<br>сахара<br>из свеклы, % |
|----------------|-----------|-----------|-------------------------|------|------|---------------|------------------------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|
|                | обработки | удобрения |                         |      |      |               |                                                |                  |                              |                         |                                                     |
|                |           |           |                         |      |      |               |                                                |                  |                              |                         |                                                     |
| 0.4            | А         | 0         | 66.8                    | 0.32 | 0.22 | 0.51          | 89.5                                           | 3.2              | 14.1                         | 2.9                     | 77.0                                                |
|                |           | NPK       | 66.4                    | 0.43 | 0.24 | 0.55          | 88.7                                           | 3.5              | 13.5                         | 4.4                     | 75.0                                                |
|                | Г         | 0         | 64.2                    | 0.44 | 0.27 | 0.41          | 88.1                                           | 3.8              | 13.1                         | 2.4                     | 73.2                                                |
|                |           | NPK       | 64.1                    | 0.45 | 0.27 | 0.56          | 89.4                                           | 4.0              | 12.7                         | 3.4                     | 71.8                                                |
|                | Д         | 0         | 66.9                    | 0.32 | 0.23 | 0.54          | 90.4                                           | 3.1              | 14.1                         | 2.7                     | 77.5                                                |
|                |           | NPK       | 66.7                    | 0.41 | 0.22 | 0.58          | 88.8                                           | 3.4              | 13.6                         | 4.2                     | 75.6                                                |
| 0.9            | А         | 0         | 68.5                    | 0.09 | 0.31 | 0.35          | 93.0                                           | 1.9              | 14.5                         | 4.0                     | 83.3                                                |
|                |           | NPK       | 67.5                    | 0.10 | 0.38 | 0.45          | 91.4                                           | 2.0              | 14.0                         | 5.0                     | 82.4                                                |
|                | Г         | 0         | 68.0                    | 0.12 | 0.30 | 0.30          | 92.9                                           | 2.0              | 14.2                         | 3.5                     | 82.6                                                |
|                |           | NPK       | 67.3                    | 0.14 | 0.34 | 0.35          | 92.4                                           | 2.1              | 13.8                         | 4.8                     | 81.7                                                |
|                | Д         | 0         | 70.0                    | 0.08 | 0.30 | 0.32          | 92.8                                           | 1.8              | 14.7                         | 3.8                     | 84.0                                                |
|                |           | NPK       | 68.7                    | 0.10 | 0.41 | 0.37          | 91.5                                           | 1.9              | 14.2                         | 5.1                     | 83.0                                                |
| 1.5            | А         | 0         | 66.0                    | 0.16 | 0.37 | 0.28          | 91.9                                           | 2.3              | 13.0                         | 4.9                     | 79.8                                                |
|                |           | NPK       | 65.3                    | 0.18 | 0.42 | 0.30          | 91.6                                           | 2.5              | 12.5                         | 6.1                     | 78.1                                                |
|                | Г         | 0         | 65.1                    | 0.17 | 0.31 | 0.33          | 91.4                                           | 2.6              | 12.6                         | 4.0                     | 77.8                                                |
|                |           | NPK       | 64.4                    | 0.19 | 0.39 | 0.35          | 91.2                                           | 2.8              | 12.1                         | 5.3                     | 76.1                                                |
|                | Д         | 0         | 66.9                    | 0.14 | 0.32 | 0.29          | 92.0                                           | 2.3              | 13.3                         | 4.9                     | 80.1                                                |
|                |           | NPK       | 65.4                    | 0.15 | 0.39 | 0.31          | 91.5                                           | 2.5              | 12.6                         | 6.1                     | 78.2                                                |

ше коэффициент увлажнения, тем выше энергетическая эффективность (табл. 6). При комбинированной обработке почвы без удобрений коэффициент энергетической эффективности при низком увлажнении составил 3.6, при среднем – 4.2, при высоком – 6.1. При применении удобрений коэффициент энергетической эффективности сни-

**Таблица 6.** Энергетическая эффективность возделывания сахарной свеклы

| Система   |           | Коэффициент увлажнения |     |       |     |       |     |
|-----------|-----------|------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|
| обработки | удобрения | 0.4                    |     | 0.9   |     | 1.5   |     |
|           |           | 1                      | 2   | 1     | 2   | 1     | 2   |
|           |           |                        |     |       |     |       |     |
| А         | 0         | 88.6                   | 4.1 | 94.6  | 4.3 | 102.3 | 4.7 |
|           | NPK       | 120.5                  | 3.0 | 144.0 | 3.6 | 177.9 | 4.5 |
| Г         | 0         | 72.7                   | 3.5 | 89.5  | 4.3 | 117.2 | 5.7 |
|           | NPK       | 99.0                   | 2.5 | 131.5 | 3.4 | 161.1 | 4.1 |
| Д         | 0         | 79.7                   | 3.6 | 90.9  | 4.2 | 134.0 | 6.1 |
|           | NPK       | 122.3                  | 3.1 | 138.1 | 3.5 | 185.5 | 4.6 |

Примечание. В графе 1 – энергия в урожае, ГДж/га; 2 – коэффициент энергетической эффективности.

жался на 4–29%, однако, чем был влажнее год, тем был выше показатель.

Стоимость продукции составляла от 52.1 тыс. руб./га при безотвальной обработке почвы в контроле при низком увлажнении до 135.8 тыс. руб./га при разноглубинной отвальной обработке с применением удобрений при высоком увлажнении (табл. 7).

Наибольший чистый доход с 1 т (1.55 тыс. руб.) был при высоком увлажнении с разноглубинной отвальной и комбинированной обработками почвы без применения удобрений. При использовании удобрений доход снижался до 1.36 тыс. руб./т, при этом была получена самая низкая себестоимость продукции (1.24–1.25 тыс. руб./т).

Рентабельность производства составила 18–81% при низком увлажнении, 45–70% – при среднем, и 91–123% – при высоком. При низком увлажнении большая рентабельность соответствовала отвальной обработке с внесением удобрений; при среднем – безотвальной обработке, при высоком – отвальной обработке без применения удобрений.

Таблица 7. Экономические показатели производства сахарной свеклы (в ценах 2016 г.)

| $K_y$ | Система   |           | Стоимость    | Затраты | Чистый доход, тыс. руб. |      | Себестоимость, тыс. руб./т | Рентабельность, % |
|-------|-----------|-----------|--------------|---------|-------------------------|------|----------------------------|-------------------|
|       | обработки | удобрения |              |         | га                      | т    |                            |                   |
|       |           |           | тыс. руб./га |         |                         |      |                            |                   |
| 0.4   | А         | 0         | 58.0         | 46.7    | 11.3                    | 0.54 | 2.25                       | 24                |
|       |           | NPK       | 91.0         | 69.5    | 21.5                    | 0.66 | 2.14                       | 31                |
|       | Г         | 0         | 52.1         | 40.8    | 11.3                    | 0.61 | 2.19                       | 28                |
|       |           | NPK       | 75.9         | 63.6    | 12.3                    | 0.45 | 2.35                       | 19                |
|       | Д         | 0         | 54.9         | 46.7    | 8.2                     | 0.42 | 2.38                       | 18                |
|       |           | NPK       | 86.8         | 69.5    | 17.3                    | 0.58 | 2.24                       | 25                |
|       | А         | 0         | 76.4         | 46.7    | 29.7                    | 1.09 | 1.71                       | 64                |
|       |           | NPK       | 101.1        | 69.5    | 31.6                    | 0.87 | 1.93                       | 45                |
| 0.9   | Г         | 0         | 69.4         | 40.8    | 28.6                    | 1.15 | 1.65                       | 70                |
|       |           | NPK       | 98.0         | 63.6    | 34.4                    | 0.98 | 1.82                       | 54                |
|       | Д         | 0         | 72.0         | 46.7    | 25.3                    | 0.98 | 1.82                       | 54                |
|       |           | NPK       | 100.8        | 69.5    | 31.3                    | 0.89 | 1.93                       | 45                |
| 1.5   | А         | 0         | 105.3        | 46.7    | 58.3                    | 1.55 | 1.24                       | 125               |
|       |           | NPK       | 135.8        | 69.5    | 66.3                    | 1.37 | 1.43                       | 95                |
|       | Г         | 0         | 89.3         | 40.8    | 48.5                    | 1.52 | 1.28                       | 119               |
|       |           | NPK       | 121.8        | 63.6    | 58.2                    | 1.33 | 1.46                       | 91                |
|       | Д         | 0         | 104.2        | 46.7    | 57.5                    | 1.55 | 1.25                       | 123               |
|       |           | NPK       | 135.2        | 69.5    | 65.7                    | 1.36 | 1.44                       | 94                |

## ВЫВОДЫ

1. Наибольшее влияние на урожайность сахарной свеклы из метеорологических факторов оказал коэффициент увлажнения в августе–сентябре ( $r = 0.73$ ). Определены 3 группы лет для сахарной свеклы по величине коэффициента увлажнения: первая –  $K_y = 0.4$ , вторая –  $K_y = 0.9$ , третья –  $K_y = 1.5$ . Доля влияния метеорологических условий на урожайность сахарной свеклы составила 51, обработки почвы – 3, удобрений – 30%.

2. Режим влажности почвы при высоком увлажнении и применении удобрений был оптимальным для развития сахарной свеклы – общее водопотребление увеличивалось, а использование запасов влаги почвенных слоев – уменьшалось. Чем меньше коэффициент увлажнения, тем больше влаги почвенных слоев использовали растения сахарной свеклы. При применении удобрений и низком и среднем коэффициентах увлажнения суммарное водопотребление сахарной свеклы увеличивалось на 4–12%. При  $K_y = 1.5$  удобрения не влияли на суммарное водопотребление.

3. Лучшие технологические качества корнеплодов (доброкачественность очищенного сока – 93%, потери сахара в мелассе – 2.0%, коэффициент извлечения сахара – 84.0%) отмечены при среднем увлажнении и комбинированной обработке почвы. При внесении удобрений качество ухудшалось, однако урожайность увеличивалась до 48.5 т/га, выход сахара – до 6.1 т/га.

4. Высокий коэффициент энергетической эффективности (4.5–4.6) и рентабельность производства (94–95%) сахарной свеклы отмечены при комбинированной и разноглубинной отвальной обработках почвы, высоком увлажнении и внесении удобрений. Без удобрений эффективность возделывания сахарной свеклы повышалась на 5–29% при сокращении продуктивности на 28–73%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко В.С., Гаврилюк М.С., Шаповал И.С. Нужны ли длительные многофакторные опыты // Земледелие. 1987. № 3. С. 11–14.
2. Боронтов О.К. Изменение агрофизических и агрохимических свойств выщелоченного чернозема в посевах сахарной свеклы при основной обработке и внесении удобрений в зерносвекловичном севообороте ЦЧЗ: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Воронеж: ВГАУ, 2005. 37 с.
3. Минакова О.А., Александрова Л.В. Влияние длительного применения удобрений на плодородие выщелоченного чернозема и потребление элементов питания сахарной свеклой // Научно-практические основы сохранения и воспроизводства плодородия почв ЦЧЗ: мат-лы засед. территор. координац. совета “Проблемы земледелия ЦЧЗ”. Каменная Степь, Воронеж: Истоки, 2008. С. 62–64.
4. Гармашов В.М. Обработка почвы как прием повышения эффективности использования почвенно-климатического потенциала // Докучаевское наследие: итоги и перспективы научного земледелия

- в России: сб. докл. Международ. научн.-практ. конф. Воронеж: Истоки, 2012. С. 119–126.
5. *Косякин П.А., Манаенкова Е.Н., Боронтов О.К., Елфимов М.Н., Дьяков Д.А.* Расход воды и питательных веществ сахарной свеклы при различной обработке почвы // Там же. С. 165–167.
  6. *Минакова О.А., Тамбовцева Л.В., Александрова Л.В.* Продуктивность и вынос НРК гибридами сахарной свеклы отечественной и иностранной селекции на различных фонах основной удобрения // Сахарная свекла. № 5. 2014. С. 40–42.
  7. *Никитин В.В., Соловichenko В.Д., Ступаков А.Г., Навольнева Е.В.* Влияние агрогенных и природных факторов на урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы на черноземе типичном // Инновации в АПК: пробл. и перспект. 2015. № 2 (6). С. 69–76.
  8. *Нестеров А.А., Аканова Н.И.* Влияние агрометеорологических условий на эффективность действия минеральных удобрений // 60 лет Географической сети опытов с удобрениями. Бюл. ВИАУ. 2001. № 115. С. 145–146.
  9. *Черкасов Г.Н., Соколов Н.С., Воронин А.Н., Понедельченко М.Н., Трапезников С.В.* Влияние погодных условий и минеральных удобрений на плодородие почвы и урожайность сахарной свеклы в Центральном Черноземье России // Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно-ландшафтных системах земледелия: сб. докл. Международ. научн.-практ. конф. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2008. С. 401–405.
  10. *Ким А.Д., Лазарев В.И.* Электромагнитный механизм влияния атмосферы на продуктивность агроландшафта // Экологизация земледелия и оптимизация агроландшафтов: сб. докл. Всерос. научн.-практ. конф. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2014. С. 150–153.
  11. *Боронтов О.К., Никульников И.М., Кураков В.И., Сумин А.Н.* Водно-физические свойства и элементы водного режима чернозема выщелоченного при разных способах основной обработки и внесения удобрений в севообороте // Почвоведение. 2005. № 1. С. 113–121.
  12. Методическое руководство по изучению почвенной структуры / Под ред. И.Б. Ревута, А.Н. Роде. М.: Колос, 1969. 527 с.
  13. *Барштейн Л.А., Гизбуллин Н.Г.* Методика исследований по сахарной свекле. Киев: ВНИС, 1986. 262 с.
  14. *Лосева В.А., Ефремов А.А., Квитко И.В.* Методы исследования свойств сырья и готовой продукции (теория и практика). Учеб. пособ. Воронеж: ВГТА, 2008. 247 с.
  15. Методические рекомендации по энергетической оценке систем и приемов обработки почвы. М.: ВАСХНИЛ, 1989. 30 с.
  16. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. М.: ВНИИЭСХ, 1998. 150 с.
  17. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
  18. *Орловский Н.И.* Основы биологии сахарной свеклы. Киев: Госсельхозиздат УССР, 1961. 324 с.
  19. *Медведев В.В.* Оптимизация агрофизических свойств черноземов. М.: Агропромиздат, 1988. 160 с.
  20. *Кузнецова И.В.* Физические свойства пахотных дерново-подзолистых суглинистых почв // Почвоведение. 1978. № 2. С. 44–55.
  21. *Сапожников П.М., Прохоров А.Н.* Подходы к расчету показателей мониторинга физического состояния почв // Почвоведение. 1992. № 9. С. 52–64.
  22. *Мухомтов Я.Н., Мацнева Н.Г., Михайлова М.Ф.* Эффективность различных способов основной обработки почвы в Воронежской области // Земледелие. 1978. № 3. С. 8–9.
  23. *Лазарев В.И.* Влияние основных природных и антропогенных факторов на режим и свойства типичного чернозема, уровень урожайности и качество продукции полевых культур в условиях лесостепи ЦЧЗ: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Курск: ВНИИЗ и ЗПЭ, 1996. 45 с.
  24. *Минакова О.А.* Агроэкологические аспекты применения удобрений в зернопаропропашном севообороте лесостепи ЦЧР: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Воронеж: ВГАУ, 2011. 48 с.

## Moisture Regime of Leached Chernozem, the Yield and Quality of Sugar Beet Root Crops under Different Weather and Agrotechnical Conditions in the Central Chernozem Region

**O. K. Borontov<sup>a</sup>, P. A. Kosyakin<sup>a, #</sup>, and E. N. Manaenkova<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Sugar Beet and Sugar named after A.L. Mazlumov  
p. VNISS 86, Voronezh region, Ramonsky district 396030, Russia

<sup>#</sup>E-mail: kosyakinp@mail.ru

The efficiency of moisture use and the yield of sugar beet increased with the use of fertilizers, combined tillage and an increase in the moisture coefficient (according to Ivanov) for 2 months before cleaning. A more favorable soil moisture regime and a lower density of addition in sugar beet crops were formed in conditions of high moisture during combined tillage. The best technological qualities of the root fruits are determined with average moisture and combined processing. The share of the influence of weather conditions on crop yield was 51, fertilizers – 30, tillage – 3%. The highest yield of sugar beet (48.3–48.5 t/ha), energy efficiency (4.6) and profitability of production (95%) were established with multi-depth dump and combined tillage in crop rotation, fertilization and high soil moisture.

**Key words:** sugar beet, tillage, fertilizers, meteorological conditions, humidity, addition density, leached chernozem, yield, technological qualities, energy efficiency.

УДК 631.46:631.445.152(571.54+.55)

## МИКРОБИОЦЕНОЗ ПОЧВ КРИОМОРФОЗОВ ЮГА ВИТИМСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. Э. О. Чимитдоржиева<sup>1,\*</sup>, Ц. Д-Ц. Корсунова<sup>1</sup>, Г. Д. Чимитдоржиева<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

\*E-mail: erzhenach@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Исследованы микробные сообщества в почвах криоморфозов юга Витимского плоскогорья. Объектами исследования послужили черноземы глеевые криотурбированные и гумусово-квизиглеевые окарбоначенные почвы. В ходе исследования выбраны экспериментальные площадки с ярко выраженными криогенными явлениями. Определяли интенсивность микробиологической деятельности по содержанию углерода микробной биомассы, численности микроорганизмов в доминирующих группах микробных сообществ. Определение численности микроорганизмов в почвах проводили методом прямого микроскопирования, который дает возможность проводить более точный подсчет бактерий в почве с учетом адсорбированных клеток. Предварительно десорбировали клетки на ультразвуковом диспергаторе. Углерод микробной биомассы определяли регидратационным методом. Получены данные, характеризующие направленность и интенсивность микробиологических процессов в горизонтах профилей почв бугров пучений и термокарстовых понижений. Представлены численность микроорганизмов и доминирующие группы бактериальных сообществ почв, сформированных в условиях ультраконтинентального климата Бурятии и относительно близко залегающих многолетнемерзлых пород. Выявлено, что в почвах бугров пучения и термокарстовых понижений преобладала бактериальная микрофлора. Внутривертикальная неоднородность в распределении почвенных микроорганизмов свидетельствовала о том, что как среда обитания почва сильно дифференцирована во всех направлениях. Отражением этой дифференциации по вертикали бугра пучения и термокарстового понижения явилась концепция о почвенных горизонтах как особых экологических нишах и возможности использования микробиологической индикации явлений, происходящих во время пучений и просадок.

**Ключевые слова:** криоморфозы, термокарстовые понижения, бугры пучения, углерод микробной биомассы, актиномицеты, грибы, бактерии, черноземы глеевые криотурбированные, гумусово-квизиглеевые окарбоначенные почвы, черноземы квизиглеевые.

**DOI:** 10.31857/S0002188123060078, **EDN:** QOWHHW

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия одним из ключевых факторов функционирования криогенных экосистем стало глобальное потепление [1–4], в частности, наблюдается увеличение толщины деятельного слоя, повышение температуры и сокращение распространения и слитности мерзлых толщ [5], активизация термокарста в некоторых регионах [6]. Таяние содержащегося в грунте льда сопровождается изменениями дневной поверхности и развитием опасных мерзлотных процес-

сов: пучений и просадок, что приводит к изменениям свойств почв. Усиление пространственной неоднородности накладывает отпечаток на количественный и качественный состав микробиоты.

На мерзлотной территории южной части Витимского плоскогорья широко распространен бугристо-западинный микрорельеф, начало его формирования относят к сартанскому времени [7]. При потеплении климата многолетняя мерзлота стала деградировать, возникли псевдоморфозы, преобразованные затем в понижения, которые долгое время были заполнены водой. На других полигонах в результате выпирания грунта и обрушения их бортов возникли бугры пучения. В работе [8] считали, что бугры пучения

<sup>1</sup> Экспедиционные исследования выполнены за счет средств бюджета по теме госзадания № 121030100228-4, аналитические работы выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-04-01297.

являются элементами термокарстовых форм рельефа, и их образование связано с промерзанием влагонасыщенных талых слоев под исчезающими озерами. Термин “криоморфозы” [9, 10] объединяет различные экзогенные проявления криогенеза: трещиноватость, просадки, пучения, высыхания карстовых озер и др.

Экстремальные природные условия криогенных экосистем определяют своеобразный состав и структуру микробиоценоза, усиливают уязвимость микробиоты, одновременно способствуя их приспособляемости к изменениям условий. Микробная биомасса, ее активность и разнообразие микробного сообщества является индикатором изменения почвенной среды [11, 12]. Биологические процессы в них проходят в короткий вегетационный период на фоне многолетней мерзлоты. Криогенный характер почв накладывает отпечаток на структуру микробных комплексов, определяет их динамику и активность, обуславливая тем самым специфику процесса трансформации веществ.

Цель работы — исследование микробного сообщества в почвах бугров пучения и термокарстовых понижений юга Витимского плоскогорья. Значимость исследования состоит в получении новых данных о микробиоценозе криогенных форм рельефа, что позволит выявить направленность и интенсивность микробиологических процессов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования расположен в Еравнинской котловине юга Витимского плоскогорья, где многолетняя мерзлота достигает максимальной мощности 120–130 м, в среднем составляя 80–85 м. Верхняя граница мерзлоты залегает на глубине 1.5–3.0 м от дневной поверхности, местами — на глубине <1 м.

Климат Еравнинской котловины резко континентальный. Холодная, малоснежная и продолжительная зима сменяется поздней ветреной и засушливой весной. Лето жаркое, короткое. По данным Сосново-Озерской метеостанции, расположенной в районе исследования, среднегодовая температура воздуха составляет  $-4.1^{\circ}\text{C}$  при средней температуре наиболее теплого месяца (июль)  $17.1^{\circ}\text{C}$  и самого холодного (январь) —  $-25.4^{\circ}\text{C}$ . Сумма биологически активных температур составляет  $1330^{\circ}\text{C}$ .

Растительный покров района исследования разнообразен. Формируются злаково- и разнотравно-пижмовые, вострецовые и вострецово-ковыльные сообщества. В более увлажненных

экотопах появляются овсяницы, тонконог стройный, ковыль-волосатик. Учет надземной, подземной и общей фитомассы показал, что биопродуктивность травостоя бугров пучения составляет  $2.08 \text{ кг/м}^2$  и находится наравне с фоновым вариантом — 2.05, но значительно меньше по сравнению с таковых понижений —  $2.50 \text{ кг/м}^2$  [13, 14]. Почвообразующие породы: делювиально-карбонатные суглинистые отложения, слоистые озерные отложения.

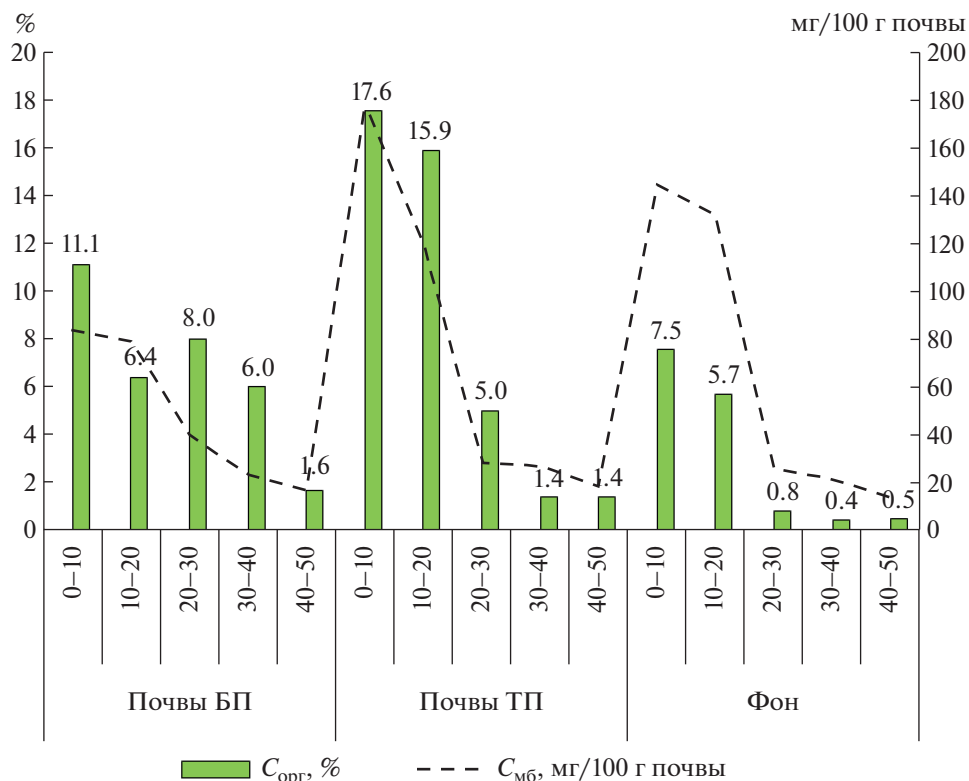
Объектами исследования были почвы бугров пучения и термокарстовых понижений. Работа выполнена в 2018–2019 гг. В ходе исследования выбраны экспериментальные площадки с ярко выраженными криогенными явлениями. Были заложены разрезы на почвах бугров пучения ( $n = 3$ ) и термокарстовых понижений ( $n = 3$ ). Разрезы закладывали на всю мощность сезонно-талого слоя (СТС), пробы отобрали с шагом 10 см с термокарстовых понижений до глубины 80 см и бугров пучения — до 100 см. Мощность СТС на 2008 г., по данным А.И. Куликова для фоновых черноземов квазиглеевых, составляла 285 см [15]. Данные состояния микробиоценоза приводим до 50 см.

Интенсивность микробиологической деятельности определена по содержанию углерода микробной биомассы (при  $n = 3$ ), численности микроорганизмов и по доминирующим группам микробных сообществ (при  $n = 3$ ). Численность микроорганизмов в почвах определена методом прямого микроскопирования, что дало возможность произвести подсчет бактерий в почве с учетом адсорбированных клеток. Предварительно десорбировали клетки на ультразвуковом диспергаторе УЗДН-1. При количественном учете клеток почвенных бактерий и мицелия актиномицетов препараты окрашивали водным раствором акридина оранжевого, а для окраски мицелия и спор грибов применяли калькофлуор белый. Работа выполнена в лаборатории биохимии почв ИОЭБ СО РАН на люминесцентном микроскопе “Микромед 3 ЛЮМ”, углерод микробной биомассы определен регидратационным методом.

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена в среде электронной таблицы Microsoft Excel 2010 пакета Microsoft Office.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для фоновых черноземов квазиглеевых характерны: небольшая мощность гумусово-аккумулятивного горизонта, среднесуглинистый гранулометрический состав. Содержание углерода  $C_{\text{орг}}$  в верхнем горизонте было средним (рис. 1). Сумма поглощенных оснований в верхнем гумусовом



**Рис. 1.** Содержание углерода органического и углерода микробной биомассы в почвах бугров пучений (БП) и термокарстовых понижений (ТП) ( $n = 3$ ).

горизонте — высокая. Реакция среды в верхней части профиля — слабокислая (рН 6.52) и близкая к нейтральной (рН 7.15), в нижней — щелочная (рН до 8.36).

Исследованные черноземы глееватые криотурбированные и гумусово-квазиглеевые окарбоначенные почвы по морфологическим признакам отличались от фоновых почв. Реакция среды почв термокарстовых понижений — щелочная (рН 8.02–8.40), бугров пучения — слабощелочная (рН 7.71–7.81). По гранулометрическому составу исследованные почвы бугров пучения относятся к супесчаным и легкосуглинистым, термокарстовых понижений — легкосуглинистым в 0–30 слое, среднесуглинистым — в слое 30–50 см. Содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) в черноземах глееватых криотурбированных составило 11.1 в слое 0–10 см, 6.38% — в 10–20 см слое. В гумусово-квазиглеевых окарбоначенных почвах отмечено высокое содержание  $C_{орг}$  в слое 0–10 см — 17, 6%, в слое 10–210 см — 15.9% ( $n = 3$ ). Подробная характеристика разрезов описана в работе [16].

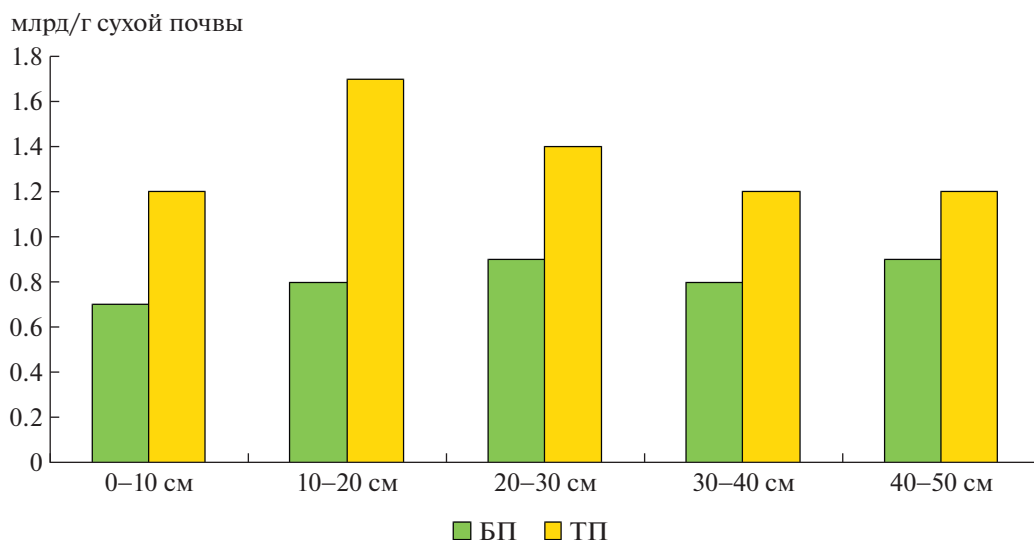
**Углерод микробной биомассы ( $C_{мб}$ ).** В черноземе глееватом криотурбированном среднее содержание  $C_{мб}$  в верхнем слое почвы составило  $83.7 \pm$

$\pm 9.3$  мг/100 г почвы ( $V = 11.1\%$ ). Максимальное количество углерода микробной массы обнаружено в гумусово-квазиглеевой окарбоначенной почве на глубине 0–10 см —  $178 \pm 32$  мг/100 г почвы, что объясняется обилием ризосферной микрофлоры и высоким содержанием  $C_{орг}$ . В фоновых черноземах квазиглеевых среднее содержание  $C_{мб}$  в верхнем слое почвы было равно  $144 \pm 25$  ( $V = 17.6\%$ ). Профильное распределение  $C_{мб}$  было неравномерным, с глубиной выражена тенденция к снижению содержания углерода биомассы.

Накопление  $C_{мб}$  в черноземе глееватом криотурбированном было меньше, несмотря на то, что в них больше углерода, чем в фоновых черноземах квазиглеевых. Предположительно, что этот углерод был представлен большей частью труднодоступной для микробиоты формой.

Расчет коэффициентов вариации показал, что совокупность данных однородна, т.е. значима. Данные содержания углерода микробной биомассы имели сильную корреляционную связь с данными содержания органического углерода ( $r = 0.73–0.99$ ).

**Структура микробиоценоза в почвах.** В черноземе глееватом криотурбированном и гумусово-



**Рис. 2.** Численность бактерий в почвах бугров пучений и термокарстовых понижений: БП — чернозем глееватый криотурбированный ( $n = 3$ ), ТП — гумусово-квизиглеевая окарбоначенная почва ( $n = 3$ ). То же на рис. 3, 4.

квизиглеевой окарбоначенной почве неравномерное распределение биогенных элементов (С, Н, О, N) и органического вещества обусловило изменение количества бактерий в профилях (рис. 2). Если же в природных условиях в почвах микроорганизмы бывают приурочены, как правило, к верхним гумусированным и хорошо прогреваемым горизонтам, то в черноземе глееватом криотурбированном в слое 0–10 см они присутствовали в основном в низких количествах. Это объяснимо тем, что этот слой почвы быстро подвергается высыханию, а в периоды значительного иссушения почвы активная деятельность микроорганизмов в ней практически прекращается. В гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве численность бактерий достигала почти 1.5 млрд/г сухой почвы.

Характерной особенностью микробного населения исследованных почв является его отчетливая внутрипрофильная дифференциация. Богатство почвы органическим веществом существенно влияет на состав и глубину распространения почвенной микрофлоры. Распределение по профилю численности бактерий имело разный характер. В гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве максимум приходился на слой 10–20 см почвы, тогда как в черноземе глееватом криотурбированном показатель увеличивался вниз по профилю. Следует отметить, что полученные данные коррелируют с данными содержания  $C_{орг}$  ( $r = 0.60–0.90$ ).

Количество бактерий было больше в увлажненной и богатой питательными веществами гу-

мусово-квизиглеевой окарбоначенной почве. В последней почве к нижней части профиля показатель снижался, что объясняется тем, что по мере углубления в почву уменьшалось содержание органических веществ, а также кислорода, необходимого для жизнедеятельности аэробных бактерий. В черноземе глееватом криотурбированном низкая численность бактерий объяснялась тем, что верхний слой почвы быстро подвергался высыханию, а в периоды значительного иссушения почвы активная деятельность микроорганизмов в ней практически прекращалась.

В почве, как в гетерогенной микрозональной системе, были распространены мицелиальные формы (грибы и актиномицеты), которые благодаря верхушечному росту преодолевают неблагоприятные микрозоны и лучше осваивают пространство [17]. Актиномицеты эволюционно имеют более богатый ферментативный аппарат, обладают высоким уровнем приспособления и встречаются в различных типах почв. Некоторые их виды являются аэробами, а часть актиномицетов относится к анаэробам. Количество актиномицетов, характеризующих глубину процессов минерализации органического вещества, в черноземе глееватом криотурбированном было равно 0.004 м/г сухой почвы, в слое 40–50 см этот показатель уменьшился до 0.002 м/г сухой почвы (рис. 3). В гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве показатель достигал 0.014 м/г сухой почвы. Корреляционная связь между длиной мицелия актиномицетов и содержанием  $C_{орг}$  составила  $r = 0.51–0.52$ .

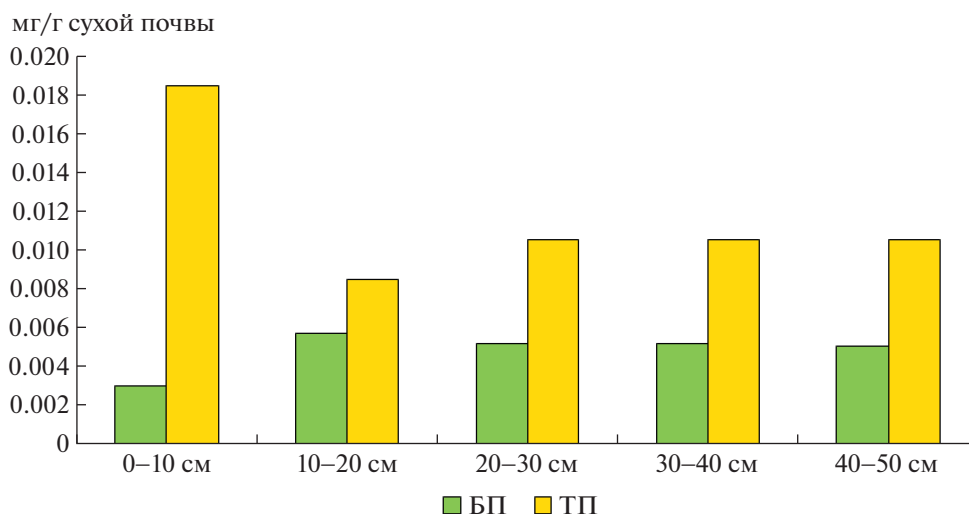


Рис. 3. Мицелий актиномицетов в почвах бугров пучений и термокарстовых понижений.

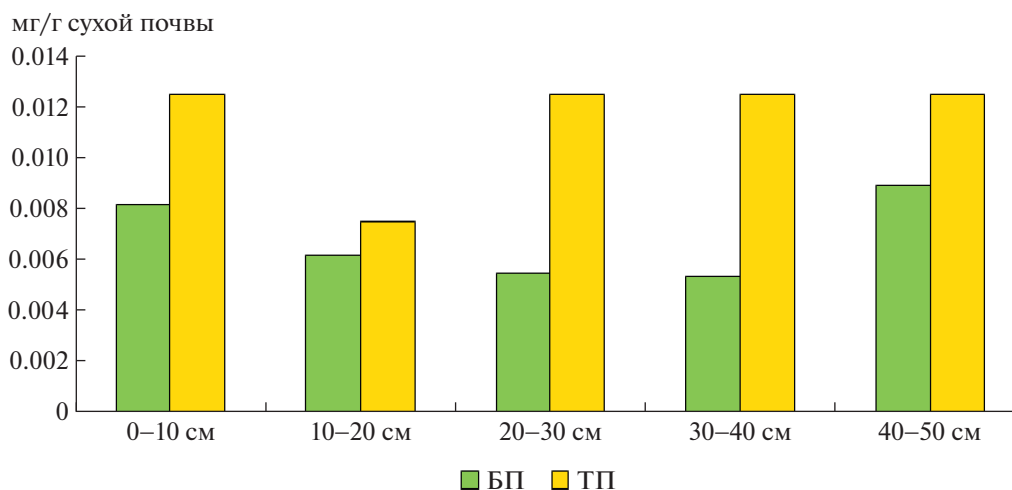


Рис. 4. Мицелий грибов в почвах бугров пучений и термокарстовых понижений.

Различное внутрипрофильное распределение мицелия актиномицетов объясняется тем, что актиномицеты разлагают многие вещества и являются более активными при высоких показателях рН, а также тем, что карбонатсодержащие горизонты являются одним из характерных местообитаний актиномицетов [18]. Поскольку они принимают активное участие в процессах минерализации, наибольшее их количество встречается в почвах, богатых растительными остатками [14], в нашем случае — в гумусово-квасиглеевой окарбонированной почве термокарстовых понижений.

Известно, что почвы содержат очень большой запас спор грибов, преимущественно находящихся в состоянии покоя. Мицелий грибов был обнаружен по всей глубине исследованного профиля

черноземов глееватых криотурбированных в количестве 0.008–0.012 м/г почвы (рис. 4) с биомассой мицелия  $0.12–0.35 \times 10^{-6}$  г/г почвы. В гумусово-квасиглеевой окарбонированной почве этот показатель был равен 0.006–0.01 м/г почвы.

Распределение грибной микрофлоры по профилю почв имело общую тенденцию к уменьшению в слоях 10–20 и 20–30 см с дальнейшим увеличением показателя. Максимальное содержание грибов обнаружено в слое 40–50 см в черноземах глееватых криотурбированных.

Для грибов также было характерно очень широкое варьирование численности, но уже в почвах бугров. Это связано с тем, что при низкой величине рН более активными в деградации органических соединений являются грибы. В черноземах

глееватых квазиглеевых показатель pH был ниже, чем в гумусово-квазиглеевых окарбоначенных почвах. Резкое увеличение количества грибов в нижней части профиля, возможно, было связано с высокой устойчивостью грибов и особенностями водного режима почв. В нижних слоях почвы, даже когда бактерии погибают, грибы выживают и продолжают деструкцию растительной органики. В периоды временного избыточного увлажнения в почвах термокарстовых понижений развитие грибов может быть до некоторой степени подавлено.

Поэтому более оптимальные условия для жизнедеятельности микроорганизмов создаются в гумусово-квазиглеевой окарбоначенной почве, что связано с лучшими условиями увлажнения и содержания питательных веществ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изученные почвы отличались содержанием микробной биомассы, соотношением разных групп микроорганизмов (грибов, бактерий и актиномицетов) и их распределением. В ходе исследования достоверно определено, что микробиологическая активность гумусово-квазиглеевой окарбоначенной почвы была выше, чем чернозема глееватого криотурбированного. Невысокий уровень энергетического обеспечения, глубокое промерзание почвенного профиля и значительное их иссушение в весенне-летний период отразились на почвенной биоте почв бугров пучений.

В исследованных почвах преобладала бактериальная микрофлора. Распределение мицелия актиномицетов и мицелия грибов было неравномерным по профилю почв. Внутрипрофильная неоднородность в распределении почвенных микроорганизмов свидетельствовала о том, что почва как среда обитания сильно дифференцирована по профилю. Отмечена корреляционная связь микробиологических показателей с содержанием  $C_{орг}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kislov A.V., Surkova G.V.* Climatology: textbook. 4th edit. M.: INFRA-M, 2020. P. 324.
2. *Ataev Z.V.* Climate change alleviation for sustainable progression global warming or global cooling: Challenges and future prospects. 2022. P. 13–32.
3. *Атаев З.В., Братков В.В.* Региональные ландшафтные особенности создания карбонового полигона в Республике Дагестан // Изв. Дагестан. ГПУ. Естеств. и точные науки. 2022. Т. 16. № 1. С. 25–36.
4. The Second assessment report on climate change and their impact on the territory of the Russian Federation 2014 // Climate Change. M.: Roshydromet, V. 1. P. 61.
5. *Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A.* Thermal state of permafrost in Russia permafrost and periglacial processes. 2010. V. 21. № 2. P. 136–155. DOI:org/https://doi.org/10.1002/ppp.683
6. *Grosse G., Harden J., Turetsky M., McGuire A.D., Camill Ph., Tarnocai Ch., Froking S., Schuur E. A.-G., Jorgenson T., Marchenko S., Romanovsky V., Wickland K.P., French N., Waldrop M., Chavez L., Strieg R.G.* Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance // J. Geophys. 2011. V. 116. G00K06. https://doi.org/10.1029/2010JG001507
7. *Козлова А.А., Кузьмин В.А., Заговская Э.П.* Почвы палеокриогенных бугристо-западинных ландшафтов Южного Предбайкалья // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1181–1192.
8. *Десяткин Р.В.* Почвообразование в термокарстовых котловинах-аласах криолитозоны. Новосибирск: Наука, 2008. С. 324.
9. *Соколов И.А., Чигир В.Г., Алифанов В.М., Худяков О.И., Гугалинская Л.А., Фоминых Л.А., Гиличинский Д.А., Максимович С.В.* Понятия, терминология и классификационные вопросы изучения промерзающих почв // Почвоведение. 1980. № 2. С. 118–125.
10. *Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н.* Современные криоморфозы в ландшафтах южной тайги Западной Сибири // Географ. и природн. ресурсы. 2007. № 1. С. 96–100.
11. *Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К.В., Васнев В.И.* Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1276–1286.
12. *Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудряков В.Н.* Эмиссия  $CO_2$ , микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
13. *Чимитдоржиева Г.Д., Чимитдоржиева Э.О., Мильхеев Е.Ю., Цыбенков Ю.Б., Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Егорова Р.А., Солдатова З.А., Андреева Д.Б., Корсунова Ц.Д.Ц., Давыдова Т.В.* Почвы криогенных форм рельефа на юге Витимского плоскогорья: распространение и роль в распределении пулов почвенного углерода // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1029–1038.
14. *Чимитдоржиева Г.Д., Цыбенков Ю.Б., Чимитдоржиева Э.О., Мильхеев Е.Ю., Чимитдоржиев Т.Н.* Влияние криогенеза на биоту почв (на примере

- юга Витимского плоскогорья) // Сибир. экол. журн. 2020. Т. 27. № 1. С. 3–12.
15. Куликов А.И., Куликов М.А., Смирнова И.И. О глубине протаивания почв при изменениях климата // Вестн. Бурят. ГСХА им. В.Р. Филиппова. 2009. Т. 1 (14). С. 121–126.
  16. Chimitdorzhieva G.D., Chimitdorzhieva E.O., Milkheev E.Y., Tsybenov Y.B., Egorova R.A., Soldatova Z.A., Andreeva D.B., Korsunova T.D-T., Davydova T.V., Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N. Soils of cryogenic landforms in the south of the Vitim plateau: distribution and role in the allocation of soil carbon pools // *Euras. Soil Sci.* 2019. V. 52. № 9. P. 1019–1027.
  17. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. С. 304.
  18. Паников Н.С. Регидратационный метод определения микробной биомассы в почве // Почвоведение. 1987. № 4. С. 64–71.

## Microbiocenosis of Cryofrost Soils in the South of the Vitim Plateau

E. O. Chimitdorzhieva<sup>a, #</sup>, Ts. D-Ts. Korsunova<sup>a</sup>, and G. D. Chimitdorzhieva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of General and Experimental Biology SB RAS  
ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: erzhenach@mail.ru*

The microbial communities in soils of cryomorphoses in the south of the Vitim Plateau have been studied. The objects of study were gley cryoturbated chernozems and humus-quasi-gley carbonated soils. In the course of the study, experimental sites with pronounced cryogenic phenomena were selected. The intensity of microbiological activity was determined by the carbon content of microbial biomass, the number of microorganisms in the dominant groups of microbial communities. Determination of the number of microorganisms in soils was carried out by direct microscopy, which makes it possible to carry out a more accurate count of bacteria in the soil, taking into account adsorbed cells. Cells were preliminarily desorbed on an ultrasonic disperser. The carbon of microbial biomass was determined by the rehydration method. Data were obtained characterizing the direction and intensity of microbiological processes along the horizons of soil profiles of heaving mounds and thermokarst depressions. The number of microorganisms and the dominant groups of bacterial communities of soils formed under the conditions of the ultracontinental climate of Buryatia and relatively close-lying permafrost are presented. It was revealed that bacterial microflora predominates in the soils of heaving mounds and thermokarst depressions. The intra-profile heterogeneity in the distribution of soil microorganisms indicates that, as a habitat, the soil is strongly differentiated in all directions. This differentiation along the vertical of heaving mound and thermokarst depression was reflected in the concept of soil horizons as special ecological niches and the possibility of using microbiological indications of heaving and subsidence occurring during heaving.

**Key words:** cryomorphoses, thermokarst depressions, heaving mounds, microbial biomass carbon, actinomycetes, fungi, bacteria, cryoturbated gley chernozems, humus-quasi-gley carbonated soils, quasi-gley chernozems.

УДК 581.19:633.162:546.48

## АНАЛИЗ СВЯЗИ ИЗОЭНЗИМНОГО ПОЛИМОРФИЗМА ЯРОВОГО ДВУРЯДНОГО ЯЧМЕНЯ (*Hordeum vulgare* L.) С ЕГО СОРТОВОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ВОЗДЕЙСТВИЮ КАДМИЯ

© 2023 г. А. В. Дикарев<sup>1,\*</sup>, В. Г. Дикарев<sup>1</sup>, Н. С. Дикарева<sup>1</sup><sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии  
249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 109 км, Россия

\*E-mail: ar.djuna@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.

После доработки 23.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

В лабораторном эксперименте выяснили, как связано формирование контрастных реакций сортов ярового двурядного ячменя с изотипным полиморфизмом ряда ферментов, сопряженных с устойчивостью растительного организма к стрессу, на действие кадмия. Были взяты 14 сортов ярового ячменя различного географического происхождения (по 7 чувствительных и устойчивых к  $\text{Cd}^{2+}$ ). Отбор этих сортов был осуществлен в предшествующих исследованиях на основе морфометрических критериев. Семена ячменя этих сортов проращивали в термостате, после чего готовили белковые экстракты проростков, которые потом разделяли с помощью электрофореза в полиакриламидном геле. С фореграммами проводили гистохимические реакции для выявления зон активности следующих ферментов: супероксиддисмутазы, гваяколовой пероксидазы, глутаматдегидрогеназы, алкогольдегидрогеназы, малатдегидрогеназы, глутатионредуктазы, глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы, каталазы. Подсчитывали частоты встречаемости всех выявленных аллельных вариантов, после чего эти частоты с помощью критерия углового преобразования Фишера сравнивали для групп контрастных по устойчивости к кадмию сортов. В результате удалось выявить ряд изотипов, которые с большей вероятностью встречаются или у устойчивых к  $\text{Cd}^{2+}$  сортов, или у чувствительных. Таким образом, можно утверждать, что реакция конкретного сорта ячменя на действие кадмия связана с выработкой у него специфических аллельных вариантов. Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования устойчивости или чувствительности отдельно взятого сорта ячменя к действию  $\text{Cd}^{2+}$ .

**Ключевые слова:** яровой двурядный ячмень, кадмий, устойчивость к стрессу, контрастные по устойчивости сорта, электрофорез, изоферментный анализ.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080057, **EDN:** ZDTKWN

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из серьезных проблем современного сельского хозяйства — прогрессирующее загрязнение окружающей среды, к которому приводит рост промышленного производства. Это вместе с нарастающими изменениями климата вызывает сокращение площадей, пригодных для аграрного производства. Более того, почвы доступных для хозяйственного использования территорий зачастую оказываются сильно загрязнены токсическими веществами, что создает потенциальную опасность для здоровья человека и домашних животных. Таким образом, в целях решения продовольственной проблемы требуется создание таких сортов основных сельскохозяйственных культур, которые отвечали бы следующим крите-

риям. Во-первых, они были бы нечувствительными к токсическому стрессу, давая возможность получать высокие урожаи, во-вторых, эти сорта не должны накапливать вредные вещества в товарной части растения.

Одной из значимых групп техногенных загрязнителей являются тяжелые металлы (ТМ) — химические элементы с металлической кристаллической решеткой, имеющие плотность  $>5 \text{ г/см}^3$ . В соответствии с данными литературы [1–4], соединения ТМ являются токсичными и способны вызывать серьезные нарушения в функционировании растительного организма. Кадмий — один из достаточно широко распространенных ТМ, опасность его для растений можно считать доказанной [5], хотя до сих пор нет вполне сформиро-

ванного представления о механизмах его воздействия на живые объекты.

Ранее [6] были определены критические дозы кадмия, вызывающие существенное угнетение морфометрических показателей проростков ярового двурядного ячменя (*Hordeum vulgare* L.). Эта работа, в свою очередь, развивала идеи других исследователей [7–11], в работах которых был исследован внутривидовой полиморфизм ячменя по устойчивости к другому ТМ — свинцу и рассмотрены причины формирования контрастных реакций на действие этого поллютанта. Используя предложенный в том исследовании критерий коэффициента депрессии, нами были выделены 14 контрастных по устойчивости к кадмию сортов ячменя и описан их полиморфизм. В работе со свинцом удалось установить, что формирование визуально наблюдаемого полиморфизма в ответе на действие этого ТМ связано с биохимическими и цитогенетическими особенностями изученных сортов. В этой связи представляется логичным провести сходную работу в отношении кадмия, чтобы выявить сходства и различия в ответе на действие 2-х ТМ. Аналогичные исследования выполняли и другие авторы, например в [12], где рассмотрен вопрос формирования радиорезистентности пшеницы.

В рамках реализации поставленных задач существенный интерес представляют методы биохимической и молекулярной генетики. Одним из важных методов из арсенала этих дисциплин является поиск маркеров хозяйственно ценных признаков и биологических свойств живых организмов, и, в частности, — растений. Такие методики — неоценимый источник исходного материала для нужд селекционной работы, направленной на выведение сортов с заданными свойствами. Подобный подход использовали уже достаточно давно [13, 14], но при этом тогда рассматривали главным образом морфометрические признаки (например, опушенность колоса или его цвет). Однако в настоящее время такие маркеры, несмотря на их несомненную простоту и удобство использования, не могут считаться удовлетворительными. Причина этого — полигенный характер наследования этих признаков, и, как следствие, — их нестабильность. Таких недостатков лишены белковые и особенно молекулярно-генетические маркеры (изоферменты, последовательности нуклеотидов и др.) [15].

Существуют определенные трудности на пути эффективной идентификации генетических маркеров. К таковым следует причислить их связь с разнообразными жизненными процессами, происходящими на разных уровнях биологической

организации живой материи, что предопределяет сложность генетического контроля таких признаков. Стоит учесть также и большую подверженность этих признаков фенотипической изменчивости. Все эти обстоятельства затрудняют выполнение в отношении таких маркеров классического генетического анализа и интерпретации полученных результатов. Однако существует выход из подобной ситуации. Как правило, из любого сложного признака можно выделить ряд более простых. При этом часть из таких признаков оказываются мономорфными (встречаются у всех представителей изучаемого вида), в то время как другие — полиморфны, т.е. отмечаются только у конкретных представителей вида (сортов, линий, индивидов) [16]. Зная такие особенности структуры сложных биологических признаков, можно изучить систему их генетического контроля и идентифицировать локусы в геноме, которые ответственны за кодирование этих свойств [12].

Одной из разновидностей таких белковых маркеров, позволяющей увязать особенности конкретного организма с его генетической структурой, являются изозимы — изомеры различных ферментных систем. Наличие существенного количества конформаций ферментов, имеющих различия в химической активности, предопределяет формирование разнообразия в пределах биологического вида [17]. Каждый из таких изоферментов распределен среди популяции неравномерно, что ведет к различиям в способности индивида приспосабливаться к меняющимся или экстремальным условиям среды. Причина этого состоит в том, что, как правило, соотношение изоформ ферментов существенно отражается на биологических функциях клетки [18]. Используя эти обстоятельства, можно, выявив те или иные изоферменты, связанные, допустим, с наличием повышенной сопротивляемости к токсическому стрессу, дифференцировать группы индивидов по этому признаку.

Примером такой работы можно считать исследование влияния алюминия на активность супероксиддисмутазы (*SOD*), выявленной у 2-х сортов райграса многолетнего (*Lolium perenne* L.) [19]. Авторами был доказан рост активности 2-х изозимов — LpFe-*SOD* и LpCu/Zn-*SOD* в тканях корней проростков, что сопровождалось повышением экспрессии связанных генов. Что примечательно, у каждого из этих сортов эффективность указанных процессов разнилась, что можно увязать с различиями в металлоустойчивости. Любопытно, что результаты, полученные в отношении *SOD* для одного токсиканта, могут не подтверждаться для другого. Например, в листьях

*Arabidopsis thaliana* при действии меди активность всех изоформ *SOD* стабильно увеличивалась, но если медь заменяли на кадмий, то аналогичный эффект отмечали лишь для Fe-*SOD* и Mn-*SOD*, а у Cu-*SOD* наблюдали противоположный эффект. Другим интересным свидетельством следует считать исследование [20], посвященное кормовым бобам (*Vicia faba* L.). Авторам удалось установить, что несколько выявленных изомеров *SOD* демонстрировали различную способность к нейтрализации активных форм кислорода (АФК), повышенный выход которых наблюдали при внесении в субстрат свинца.

Эти сведения явились предпосылками для настоящей работы, посвященной исследованию формирования реакций сортов ярового ячменя, контрастных по ответу на действие кадмия. Нами был проведен изоферментный анализ белковых экстрактов, полученных из проростков контрастных по устойчивости сортов ячменя, выявленных ранее [6]. В процессе работы был использован ряд ферментов, связанных с различными процессами метаболизма в организме растений, и, в частности, с его стрессоустойчивостью: супероксиддисмутаза (*SOD*), гваяколовой пероксидазы (*PER*), глутаматдегидрогеназы (*GDH*), алкогольдегидрогеназы (*ADH*), малатдегидрогеназы (*MDH*), глутатионредуктазы (*GSR*), глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы (*G6PD*), каталазы (*CAT*). В исследовании выявляли биохимические признаки, связанные с устойчивостью или чувствительностью изученных сортов. Цель работы — поиск специфических изозимных вариантов ряда ферментных систем, которые с большей вероятностью встречаются у устойчивых или чувствительных по устойчивости к кадмию сортов ярового ячменя из мировой коллекции ВИР. В случае если таковые аллели удастся выявить, то можно говорить о наличии связи между формированием ответа конкретных сортов ячменя на токсическое действие кадмия и их биохимическими особенностями.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения изоферментного полиморфизма и выявления специфических аллельных вариантов, сопряженных с устойчивостью/чувствительностью к действию кадмия, использовали метод изоэнзимного анализа с применением электрофореза белков в полиакриламидном геле.

Для приготовления экстрактов брали семена ячменя, замачивали их в дистиллированной воде на ночь при охлаждении (5°C). На другой день семена раскладывали в рулоны фильтровальной бу-

маги и помещали в сосуды с дистиллированной водой. Сосуды выдерживали в течение 1 сут в термостате при 20°C [21]. Подобную процедуру проводили для того, чтобы выбраковать невсхожие семена. Семена, у которых появлялись проростки ~1 мм длиной, отбирали для получения экстрактов.

Дополнительно аналогичное исследование было проведено не только с использованием дистиллированной воды, но и при наличии  $\text{Cd}^{2+}$  в среде. В этом случае семена ячменя выдерживали в термостате при 20°C в течение 5-ти сут в чашках Петри с раствором  $\text{Cd}^{2+}$  0.35 мг/мл (тестирующая доза, выявленная в предыдущем исследовании [6]). Остальные процедуры в этом случае были идентичны таковым для интактных семян.

У семян извлекали зародыши с проростком и растирали в ступке до получения гомогенной массы с добавлением равных количеств (по 50 мкл) 50%-ного раствора сахарозы и экстракционной смеси. Состав экстракционной смеси: 1%-ный раствор меркаптоэтанола + 1%-ный раствор Тритона X-100 = 1 : 1 [22–24]. Гель для анализа получали следующим образом. Готовили растворы: раствор А — 1 н. HCl 48 мл + трис-оксиметиламинметан 36.6 г + тетраметилэтилендиамин 0.23 мл +  $\text{H}_2\text{O}$  до 100 мл (pH = 8.9), раствор В — акриламид 30 г + N,N'-метилен-бисакриламид 0.8 г +  $\text{H}_2\text{O}$  до 100 мл, раствор С — аммоний надсернокислый 0.14 г +  $\text{H}_2\text{O}$  до 100 мл. Растворы смешивали в соотношении: 1 А : 2 В : 1  $\text{H}_2\text{O}$  : 4 С. Полученную смесь заливали в стеклянные блоки со вставленными спейсерами и гребенкой (для формирования карманов) и выдерживали при 37°C до полной полимеризации.

Экстракты помещали в карманы гелевых блоков (1%-ный полиакриламидный гель) и разгоняли с использованием щелочного TRIS—HCl буфера (pH 8.3) (трис-оксиметиламинметан 6.0 г + глицин 28.8 г +  $\text{H}_2\text{O}$  до 1 л (перед использованием буфер разбавляли в 10 раз)) с использованием индикатора бромфенолового синего (0.1%) при ~350 V, 30 mA. Для разгонки использовали аппарат для вертикального электрофореза фирмы “Owl” модели P9DS (США). Процесс вели при комнатной температуре до достижения линией лидирующего красителя положения на 2 см выше нижнего края геля. После окончания процесса проводили гистохимические реакции для определения ферментов: супероксиддисмутаза (*SOD*, К.Ф. 1.15.1.1), пероксидазы (*PER*, К.Ф. 1.11.1.7), глутаматдегидрогеназы (*GDH*, К.Ф. 1.4.1.2), алкогольдегидрогеназы (*ADH*, К.Ф. 1.1.1.1), малатдегидрогеназы (*MDH*, К.Ф. 1.1.1.37), глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы (*G6PD*, К.Ф. 1.1.1.49), глу-

татионредуктазы (*GSR*, К.Ф. 1.6.4.2) и каталазы (*CAT*, К.Ф. 1.11.1.6).

Окрашивание ферментов выполняли по прописям, представленным в [25]. Ниже приведено подробное описание схем визуализации для исследованных ферментов. Для идентификации зон активности *SOD* готовили раствор 10 мг рибофлавина, 100 мг этилен диамин тетрауксусной кислоты (EDTA), 43 мг гексагидрата хлорида магния ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) и 7 мг 3-(4,5-диметил-2-тиазолил)-2,5-дифенил-2Н-тетразолий бромида (МТТ) в 100 мл TRIS-HCl буфера (pH 8.0). Гель заливали данным раствором и помещали под интенсивное облучение видимым светом. Постепенно гель окрашивался в интенсивный фиолетовый цвет, зоны активности проявлялись на нем бесцветными полосами.

Для *PER*: 1.25 г пирогаллола растворяли в 100 мл воды, гель заливали раствором на 30 мин, после этого раствор удаляли, а гель заливали 50 мл 5%-ного пероксида водорода ( $H_2O_2$ ). Кювету с этим составом и гелем осторожно встряхивали до появления на буро-оранжевом фоне нестойких красно-бурых полос с интенсивностью, достаточной для проведения дальнейшего анализа.

Для *ADH*: в 50 мл TRIS-HCl буфера (pH 8.5) готовили раствор 40 мг β-никотинамида аденина динуклеотида (NAD), 10 мг МТТ, 1 мг феназина метасульфата (PMS) с добавлением 2 мл этанола. Залив раствором гель, инкубировали его при 37°C в темноте до появления синих полос на бесцветном фоне.

Для *MDH*: в 100 мл TRIS-HCl буфера (pH 8.0) готовили раствор 250 мг L-малеиновой кислоты (натриевая соль), 30 мг NAD, 25 мг хлористого нитросинего тетразолия (NBT), 2 мг PMS. Залив раствором гель, инкубировали его при 37°C в темноте до появления синих полос на бесцветном фоне.

Для *G6PD*: в 45 мл TRIS-HCl буфера (pH 8.0) готовили раствор 20 мг глюкозо-6-фосфата (динатриевая соль), 10 мг никотинамида динуклеотида фосфата динатриевой соли (NADP), 10 мг МТТ, 1 мг PMS, 40 мг  $MgCl_2$ . Залив раствором гель, инкубировали его при 37°C в темноте до появления синих полос на бесцветном фоне.

Для *GSR*: в 50 мл TRIS-HCl буфера (pH 8.0) готовили раствор 40 мг окисленного глутатиона, 10 мг NADPH, 0.2 мг 2,6-дихлорфенолиндофенола, 10 мг МТТ. Залив раствором гель, инкубировали его при 37°C в темноте до появления пурпурных полос на синем фоне. Для того чтобы сделать полосы более заметными, гель промывали в 0.1 М растворе HCl.

Для *CAT*: предварительно при приготовлении геля в исходную смесь вносили 250 мг растворимого крахмала по Жульковскому. После разгона белковых фракций готовили 3 раствора: первый — 30 мг  $Na_2S_2O_3$  в 50 мл воды, второй — 50 мл 3%-ного  $H_2O_2$ , третий — 100 мг KI в 100 мл воды с добавлением 0.5 мл ледяной уксусной кислоты. Первый и второй раствор одновременно выливали на гель, смешивая их. Так гель выдерживали ~3 ч. После раствор сливали, заливая гель третьим раствором. Гель окрашивался в бурый цвет, а зоны активности фермента оставались бесцветными.

Для *GDH*: готовили раствор 5 мг NAD, 4 мг PMS, 4 мг NBT, 1 г L-глутамата в 30 мл фосфатного буфера (pH 7.0), разбавленного до 100 мл водой. Раствором заливали гель, выдерживали его в темноте при 37°C до появления сине-фиолетовых полос на бесцветном фоне в зонах активности фермента.

Фореграммы фотографировали, после чего подсчитывали частоты каждой из обнаруженных зон активности фермента. Каждую из них помечали порядковым номером в соответствии с электрофоретической подвижностью (отношение длины пробега полосы от старта до линии лидирующего красителя к общему расстоянию от старта до фронта). Частоты тех изоэлемов, которые встречались не во всех случаях (факультативных) сравнивали для групп устойчивых и чувствительных сортов с помощью критерия углового преобразования Фишера [26] с целью выявить такие, которые бы могли служить маркерами устойчивости или чувствительности к кадмию, обнаруживаясь с большей вероятностью в том или ином варианте.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из 50-ти сортов ячменя разного географического происхождения из мировой коллекции ВИР (Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург) на основе анализа морфометрических показателей были отобраны 14 контрастных по устойчивости к действию кадмия (по 7 устойчивых и чувствительных) (табл. 1). Процедура исследования их морфологических реакций на влияние ТМ подробно описана в опубликованной ранее работе [8].

По результатам изоферментного анализа белковых экстрактов у рассматриваемых ферментов отмечено следующее количество зон активности: у *SOD* — 5, *PER* — 1–2, *GDH* — 2–4, *ADH* — 3–4, *MDH* — 5, *G6PD* — 3–8, *GSR* — 8, *CAT* — 6. Схема их размещения на гелях представлена на рис. 1. При

**Таблица 1.** Контрастные по устойчивости к действию кадмия сорта ярового двурядного ячменя разного географического происхождения

| Название и происхождение           | Разновидность | № по каталогу ВИР |
|------------------------------------|---------------|-------------------|
| Устойчивые                         |               |                   |
| Местный (Удмуртия)                 | nutans        | К-9219            |
| Оренбургский 4 (Оренбургская обл.) | nutans        | К-25959           |
| Линия 15 (Московская обл.)         | nutans        | К-26284           |
| Икар (Кировская обл.)              | nutans        | К-26824           |
| Гетьман (Ставропольский край)      | nutans        | К-30965           |
| Русский (Ставропольский край)      | nutans        | К-30969           |
| Симфония (Харьковская обл.)        | medicum       | К-30996           |
| Чувствительные                     |               |                   |
| Blenheim (Великобритания)          | nutans        | К-29780           |
| Ca 220702 (Дания)                  | nutans        | К-29921           |
| Malva (Латвия)                     | nutans        | К-30925           |
| Saloon (Чехия)                     | nutans        | К-30930           |
| Pongo (Швеция)                     | nutans        | К-30946           |
| Jelen (Сербия)                     | nutans        | К-30955           |
| Ansis (Латвия)                     | nutans        | К-30963           |

этом изозимы *SODI*, III, IV+V (встречались вместе), *PERI*, *GDHII*, *ADHII*, III, IV, *GSRI*, II, III–V (встречались совместно), *VI*, *MDHII*, IV, V, *G6PDI*, II–III (тоже совместно) отмечали всегда (они были облигатными), в то время как *SODI*,

*PERII*, *GDHII*, III, IV, *ADHI*, *GSRII*, VIII, *MDHI*, II, *G6PDIV*–VIII (встречались совместно) наблюдали от случая к случаю (т.е. они были факультативными).

На основе анализа фореграмм, полученных путем разгона экстрактов 14-ти контрастных по устойчивости сортов, была произведена оценка частот факультативных зон активности изученных ферментов (*SODI*, *GDHII*, III и IV; *ADHI*, *MDHI*, II) с помощью  $\phi$ -критерия углового преобразования Фишера. Из анализа были исключены *PERII*, *G6PDIV*–VIII, *GDHIV*, *GSRII*, VIII ввиду того, что не удалось выявить связи этих изозимов с устойчивостью или чувствительностью сортов, и *CAT*, которая обладала достаточно слабой активностью, и поэтому не удалось собрать достаточной статистики присутствия этого фермента. Результаты оценки частот встречаемости изоформ изученных ферментов представлены в табл. 2. В данном случае рассмотрены результаты исследования интактных семян.

У всех рассмотренных изозимов рассчитанные величины  $\phi$ -критерия Фишера больше критической величины  $\phi_{кр}^{0.01}$  (2.31), за исключением *GDHII*, где он является значимым при  $\phi_{кр}^{0.05}$  (1.64). Таким образом, выделенные в настоящем исследовании редко встречающиеся изоформы исследованных ферментов можно рассматривать в качестве биохимических маркеров чувствительности или устойчивости к действию кадмия. Изоферменты *SODI*, *GDHII*, *MDHI* с большей вероятностью встречались у чувствительных сортов, в то время как *GDHII*, *ADHI*, *MDHII* – у устойчивых. Из представленных в табл. 2 данных следует, что обнаруженный при исследовании 50-ти сортов ярового ячменя полиморфизм по устойчивости к действию кадмия [6] сопряжен с биохимическим полиморфизмом.

**Таблица 2.** Встречаемость изоформ исследованных ферментов у 14 контрастных по устойчивости к кадмию сортов ярового ячменя

| Изофермент    | Частота встречаемости |                   | Величина критерия Фишера |
|---------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|
|               | устойчивые, %         | чувствительные, % |                          |
| <i>SODI</i>   | 28.571                | 71.429            | 4.799                    |
| <i>GDHII</i>  | 14.285                | 71.429            | 6.593                    |
| <i>GDHIII</i> | 14.286                | 3.571             | 2.275                    |
| <i>ADHI</i>   | 57.148                | 28.571            | 3.228                    |
| <i>MDHI</i>   | 12.5                  | 37.5              | 3.148                    |
| <i>MDHII</i>  | 78.571                | 57.143            | 2.386                    |



Одной из причин угнетения процессов роста и развития растительных организмов, вызываемого ТМ, такими как кадмий, является окислительный стресс [27–31]. Суть этого явления состоит в повышенной продукции активных форм кислорода (АФК), которые, имея высокую реакционную способность, вызывают повреждение структурных элементов клетки [32–34]. В наших работах [6–8] было показано, что воздействие свинца и кадмия на проростки ячменя ведет к существенному угнетению ростовых процессов и возникновению морфологических аномалий корней. Было бы логично увязать подобные явления с окислительным стрессом. Например, свободные радикалы типа  $O_2^{\cdot-}$ ,  $H_2O_2$ ,  $OH^{\cdot}$  – обычные субпродукты процесса окислительного фосфорилирования и других процессов, легко обнаруживаемые в хлоропластах, митохондриях и пероксисомах [35].

Разумеется, в организме существуют механизмы и системы, призванные контролировать данный процесс, учитывая его потенциальную опасность [36]. Но в ряде случаев данная сбалансированная система способна давать серьезные сбои, не справляясь с избыточной продукцией АФК [37]. Полагают, что эти соединения легко вступают в химические реакции с ДНК, белками и липидами, нарушая их структуру и функциональность [38]. Но в то же время образование АФК запускает механизмы, направленные на их ликвидацию, такие как увеличение биосинтеза антиоксидантных ферментов *SOD*, *CAT*, *PER* и др. Подобные тезисы подтверждены и данными настоящего исследования, где был обнаружен рост активности *CAT* в ответ на введение в среду кадмия.

Одним из важнейших энзимов, входящих в число высокомолекулярных антиоксидантов, является супероксиддисмутаза [39]. Химизм катализируемого ею процесса заключается в обезвреживании супероксид-радикала  $O_2^{\cdot-}$  путем перевода его в пероксид водорода (который потом может быть превращен в воду и кислород посредством другого важного фермента – каталазы) и молекулярный кислород. Примечательно, что окислительный статус клетки разнится в ее компартментах, поэтому повышенная продукция АФК вызывает активацию не одного, а нескольких генов, ответственных за синтез нескольких изоформ *SOD*, работающих в специфических компартментах клетки [40]. Впервые это теоретическое предположение, актуальное как для растительных, так и для животных клеток, было экспериментально подтверждено на кукурузе [41, 42]. В нашем исследовании были получены аналогичные данные,

показывающие, что изоформа *SOD1* имеет связь с чувствительностью к действию ТМ. Вероятно, данный изоэнзим имеет большую активность в детоксикации свободных радикалов, что и предопределило его ассоциируемость с более уязвимыми к действию техногенного стресса сортами ячменя. Хотя, надо заметить, что это наблюдение не является абсолютным, и в предшествующей работе со свинцом этот изоэнзим *SOD* не удалось увязать с устойчивостью к стрессу [9].

Существуют работы, постулирующие связь высокого уровня генетического полиморфизма с устойчивостью к стрессу [43]. В частности, одним из примеров такого полиморфизма становится как раз возникновение редких изоформ *SOD* и других антиоксидантных ферментов. Частота и разнообразие подобных изоэнзимов напрямую связана с уровнем полиморфизма. Наша работа вполне согласуется с такими утверждениями, демонстрируя наличие у контрастных по устойчивости сортов ячменя довольно высоких уровней биохимического полиморфизма.

Есть основания полагать, что возникновение редких аллелей антиоксидантных ферментов связано с особенностями формирования сортов, у которых они обнаруживаются. Возможно, условия среды, в которых были выведены эти сорта, предполагали достаточно высокую стрессовую нагрузку, что и предопределило эволюционное закрепление таких аллельных вариантов, как необходимых для приспособления к неблагоприятным по какому-то фактору условиям. При этом стоит отметить, что соотношение факторов среды могло варьировать, что и объясняет неоднозначную реакцию изоферментов на различные ТМ. Подобную ситуацию можно наблюдать, например, в случае повышенной засоленности почв или в условиях произрастания вблизи с месторождениями полиметаллических руд, где содержание каждого элемента (в %) в составе минералов способно заметно различаться.

Известно, что антиоксидантные системы организма не являются специфичными, а способны аналогичным образом реагировать на разные неблагоприятные факторы среды [44–46]. Это обстоятельство предопределяет сложность ответа на стресс и различия в таковом по отношению, например, к действию 2-х металлов. О различиях в ответе культурных растений на действие токсических элементов, содержащихся в почве (на примере As), сообщают в [47]. В соответствии с представлениями о движущем отборе в подобной ситуации изоэнзимные варианты, имеющие повышенную способность к обезвреживанию АФК, имеют все шансы сохраниться в ряду поколений. Не стоит

упускать из внимания и те особенности, которые могут быть предопределены хозяйственно ценными признаками сорта, сформированными в ходе искусственного отбора. Например, высокое содержание липидов в семенах создает повышенный риск свободнорадикального окисления этих метаболитов, что в конечном итоге ведет к необходимости ликвидации этих нежелательных соединений.

Одним из путей решения данной проблемы становится возникновение новых, более эффективных изоформ антиоксидантных ферментов. Потенциальная возможность сохранения таких аллельных вариантов в генетическом коде растения была показана в работе [48], посвященной особенностям транскрипции гена, отвечающего за изоформу *Mn-SOD*. При наличии в среде обитания растения ионов ртути экспрессия отвечающего за этот изоформ гена заметно повышалась, при этом росла и активность соответствующего изофермента. Аналогичные данные, свидетельствующие о преимуществах высокополиморфных образцов в стрессовых условиях, получены и для других ТМ, например, кобальта [43]. Эти сведения показали неоднозначность и сложность механизмов стрессоустойчивости живых систем, способность антиоксидантных ферментов реагировать на различные факторы среды. Например, отмечено сходство в ответе растений на действие не только химических, но и физических факторов, таких как ионизирующее излучение [49].

При всей важности *SOD* для жизнедеятельности клеток сам по себе этот фермент не может полностью защитить растение от окислительного стресса. Причина этого кроется в том, что продукт его работы —  $H_2O_2$  тоже представляет опасность, потому для обеспечения нормального функционирования организма необходимо поддерживать его концентрацию на низком уровне [50]. Кроме того, пероксиды способны образовываться вследствие воздействия на организм ядовитых веществ (в том числе ТМ) и патогенов. Некоторые исследователи [50] для пероксида водорода отмечали закономерности, сходные с рассмотренными выше: у чувствительных к стрессовым воздействиям сортов сельскохозяйственных культур выявлены более высокие уровни содержания этого вещества, чем у устойчивых. Однако не стоит считать, что  $H_2O_2$  играет чисто негативную роль в функционировании живых систем. Напротив, известно [51], что молекулы пероксида водорода могут выполнять сигнальную функцию, запуская механизмы ответа на негативное воздействие извне. К таковым можно отнести восстановление поврежденной клеточной стенки

[52], связывание вредных ионов и окисление патогенов (например, вирусные частицы и бактерии могут “сжигаться” пероксидом водорода) [53], продукцию специальных белков, ответственных за подавление патогенов и фитоалексинов [54, 55].

Все эти сведения проясняют причины сделанного нами наблюдения, что *CAT*, имея в случае с интактными проростками настолько низкую активность, что ее зачастую не удавалось обнаружить, при наличии в среде  $Cd^{2+}$  уверенно выявлялась практически всегда. Это объясняется повышенным образованием пероксидов под воздействием токсиканта. В нашем предшествующем исследовании [9] отмечена связь редкой изоформы *PER* с устойчивостью к  $Pb^{2+}$ , что тоже позволяет полагать, что этот изоформ более эффективен в ликвидации пероксидов. Впрочем, в случае с кадмием сходных закономерностей подтвердить не удалось, но это свидетельствует не об их принципиальном отсутствии в данном случае, а скорее — о сложном характере ответа на стресс. Адаптация к негативным факторам среды — комплексный процесс, в который вовлекаются различные не только высокомолекулярные, но и низкомолекулярные антиоксиданты.

Не стоит недооценивать и значение ферментов, прямо не вовлеченных в ответ на стрессовые воздействия. Будучи ответственными за различные важные метаболические процессы, они тоже тем или иным образом реагируют на изменения во внутренней и окружающей среде. Например, *GDH* играет значимую роль в азотном обмене, являясь катализатором процесса восстановительного аминирования 2-оксоглутарата до глутамата и обратного ему процесса окислительного дезаминирования [56] при участии в качестве кофермента восстановленной и окисленной форм *NAD*. Важность этого процесса для жизнедеятельности растений заключается в том, что таким образом происходит включение минерального азота в обмен веществ. Если прямая реакция используется для построения всех азотистых соединений, то обратная, напротив, служит для разрушения старых органических соединений и высвобождения азота.

Подобно рассмотренным выше ферментам, *GDH* также присуща множественность изоформ, в работах [57, 58] указано, что данный фермент имеет 2 изоформы, отличающиеся по молекулярной массе. Вероятно, речь идет как раз о тех изоформах, которые были выявлены в настоящей и предшествующей наших работах. Каждая из этих изоформ отвечает преимущественно за один из про-

тивоположно направленных процессов обмена азота, и их соотношение определяет баланс этих реакций. Изменения окружающей среды способны сместить это равновесие в любую сторону. Способствуя накоплению в тканях широкого диапазона азотсодержащих веществ, *GDH* может быть опосредованно вовлечена в ответ на стрессовые воздействия среды. Об этом свидетельствуют работы [59–61], где содержание биологически активных веществ и развитие биомассы увязывали с устойчивостью к действию токсикантов и сообщали, что, добившись роста этих показателей (путем генетической модификации), можно усилить и стрессоустойчивость.

В настоящем исследовании отмечали наличие главным образом 2-х изоформ *GDH*, хотя в редких случаях это число увеличивалось до 4-х (в работе со свинцом было только 2 изоформы). При этом если в случае свинца аллель *GDHII* ассоциировалась с устойчивостью к ТМ, то в случае с кадмием наблюдали обратную картину, хотя аллель *GDHIII* все же значимо чаще встречается у устойчивых сортов. Можно предположить, что этот наиболее легкий изофермент главным образом катализирует реакцию аминирования, что определяет большую активность анаболизма у имеющих его сортов, а как следствие — их устойчивость к стрессу. Более тяжелый и гораздо чаще встречающийся аллель *GDHII*, видимо, не столь избирателен. Потому в разных случаях способен встречаться и у устойчивых, и у чувствительных сортов.

Индивидуальные особенности сортов, вероятно, способны отразиться и на том, как именно поведет себя изозим в данном случае. Все это еще раз подтверждает, что ответ организма на стресс является комплексным процессом, способным заметно видоизменяться при модификации внешнего воздействия. Надо полагать, что такая ситуация имеет важный смысл с точки зрения эволюции, делая организм более пластичным, позволяя ему быстрее и эффективнее приспосабливаться к разным условиям среды. Это предположение подтверждается данными работы [62], свидетельствующими о том, что более легкая изоформа *GDH* (из 2-х) чаще встречается у тех линий сосны, которые чувствительны к воздушному загрязнению. Применительно к ячменю наличие у него такой пластичности на уровне ферментных систем дало данной культуре возможность занять свое место в сельском хозяйстве — одной из основных сельскохозяйственных культур, возделываемых по всему миру в самых разнообразных условиях.

По некоторым данным [63], определенные изоформы *GDH*, отвечающие за дезаминирование, способны активироваться не только  $\text{NH}_4^+$ , но и катионами типа  $\text{Me}^+$ ,  $\text{Me}^{2+}$  (например, двухзарядными ионами  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ), при этом интенсивность реакции может быть даже больше, чем в случае иона аммония.

Таким образом, постоянное наличие ионов металлов в питательном субстрате способно предопределить соотношение соответствующих изоформ *GDH* у культур, возделываемых длительное время в таких условиях. В конечном счете эти обстоятельства могут привести к тому, что сформировавшиеся в итоге сорта могут показывать повышенную устойчивость или чувствительность к избытку металлов. Примечательно, что указанные реакции должны обнаруживаться даже у интактных растений. Подобная информация способна пролить свет на вопрос о причинах связи наличия легких изоформ *GDH* с устойчивостью к техногенному стрессу.

Сходную ситуацию наблюдают и с другими метаболическими ферментами. Например, филогенетические исследования выявили 2 или 3 аллеля *ADH* (а в некоторых случаях больше 3-х) у двудольных и однодольных растений [64]. При этом на примере кукурузы обнаружено, что у тех или иных сортов и линий растения уровень активности гена, кодирующего аллель *ADH*, неодинаков. Помимо того, экспрессия генов, кодирующих изоформы *ADHI* и *ADHII*, различается в зависимости от тканей растения. Выявлено, что усиление экспрессии *ADH* наблюдается в ответ на средовой стресс, такой как гипоксия, дегидратация, низкие температуры. Рост экспрессии этого фермента также связан с накоплением абсцизовой кислоты, что связано с адаптацией к стрессу [64].

В нашем исследовании у устойчивых к действию кадмия сортов ячменя отмечали наличие редких аллелей *ADH*. На основании приведенных выше сведений можно предполагать, что эти изоформы способствуют более эффективному сопротивлению стрессу.

Доказано существование несколько изоформ и у *MDH* [65]. При этом фермент в эукариотических клетках главным образом представлен 2-мя изозимами. Первый из них находится в матриксе митохондрий, где *MDH* является ключевым ферментом в цикле трикарбоновых кислот, катализируя реакцию окисления малата. Помимо этого, фермент принимает участие в превращении глицина в серин и переносе  $\text{CO}_2$  для его дальнейшей фиксации в хлоропластах. Другая изоформа встречается в цитоплазме, катализируя реакцию

обратимого превращения малата и аспартат [65, 66]. В ходе этого процесса происходит перенос малата через митохондриальную мембрану для дальнейшего превращения в оксалоацетат, который вовлекается в иные клеточные процессы.

Помимо этого, *MDH* обнаруживается в митохондриях клеток (глиоксисомы и пероксисомы), хлоропластах [65]. Почти все эти формы *MDH* в качестве кофактора используют NAD, кроме той, что находится в хлоропласте — у нее кофактором является NADP. В хлоропластах фермент участвует в C<sub>3</sub>- и C<sub>4</sub>-путях фотосинтеза, а именно в превращении малата в оксалоацетат, таким образом контролируя поступление и выведение этих метаболитов из органелл.

Во всех клеточных компартментах выявляется целый ряд изоформ этого фермента [65, 66]. Известно [67], что наличие во внутренней среде растения ТМ оказывает угнетающее воздействие на активность ферментов циклов Кальвина и Кребса, в том числе и на *MDH*. В нашем исследовании мы выявили 2 изозима этого фермента, один из которых с большей вероятностью встречается у устойчивых, а другой — у чувствительных сортов ячменя. Такие результаты связаны с многообразием функций *MDH*. Вероятно, одни изоформы *MDH* имеются у устойчивых сортов, обеспечивая им лучшее сопротивление к негативному воздействию среды. В то время как другие, напротив, довольно чувствительны к токсическому стрессу, и их ингибирование ионами ТМ сразу же ведет к разбалансировке физиологических процессов и угнетению растения.

## ВЫВОДЫ

На основании полученных в ходе настоящего исследования результатов можно заключить, что полиморфизм устойчивости ярового двурядного ячменя к действию кадмия связан с особенностями ферментной системы растительного организма. Были идентифицированы редкие аллели супероксиддисмутазы, глутаматдегидрогеназы, алкогольдегидрогеназы и малатдегидрогеназы, с большей вероятностью встречающиеся у устойчивых или чувствительных к кадмию сортов. Этот полиморфизм обнаруживается на интактных проростках, а внесение в среду поллютанта не выявляет значимых отличий от контрольного варианта, хотя этот вопрос, вероятно, требует отдельного и более подробного исследования. На это также указывает тот факт, что *CAT*, почти не активную у интактных проростков, уверенно идентифицировали при наличии в среде кадмия, хотя

и не удалось выявить различий в частотах встречаемости ее изоформ между группами контрастных сортов.

Спектр факультативных изозимов не совпадал с полученным ранее для свинца, что свидетельствовало о сложности и неоднозначности ответа растительного организма на техногенный стресс на биохимическом уровне. Изохим *SOD1* оказался ассоциированным с чувствительностью к действию кадмия (в случае свинца не удалось выявить статистически значимых связей с устойчивостью), аллель *GDH1* также чаще встречался у чувствительных сортов (обратная ситуация по сравнению со свинцом), в то время как *GDH3* был связан с устойчивостью к кадмию (при исследовании полиморфизма по устойчивости к свинцу не обнаруживался). Также с большей вероятностью у устойчивых сортов встречались изоформы *ADH1* и *MDH1*, а *MDH1* — у чувствительных. Выявленные изомеры указанных ферментов можно рассматривать как биохимические маркеры устойчивости или чувствительности избранных сортов к действию кадмия.

Учитывая различия в данных устойчивости к 2-м тяжелым металлам, полученные результаты не могут рассматриваться как абсолютные. В целом, общие закономерности ответа на токсическое действие ТМ воспроизводятся для всех металлов, но существуют и заметные различия. Вероятно, требуется проведение аналогичных исследований с другими тяжелыми металлами, а возможно, и иными сельскохозяйственными культурами. Полученные данные имеют важное фундаментальное значение для понимания причин и механизмов формирования стрессоустойчивости живых систем.

Потенциально накопленные сведения могут быть полезны и в прикладном плане для нужд сельскохозяйственного производства на загрязненных ТМ территориях, однако в силу указанных выше причин давать конкретные практические рекомендации было бы преждевременно. Следует продолжать лабораторные исследования в целях выявления таких изозимов, которые подтвердили бы свой статус как маркеров устойчивости или чувствительности для целого диапазона тяжелых металлов, и только после этого можно было бы переходить к проведению вегетационных и полевых экспериментов. Подобный подход позволяет подготовить исходный материал для нужд селекционной работы, имеющей целью выведение устойчивых к воздействию техногенных стрессоров сортов основных сельскохозяйственных культур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуральчук Ж.З. Механизмы устойчивости растений к действию тяжелых металлов // Физиол. и биохим. культ. раст. 1994. Т. 26. № 2. С. 107–117.
2. Феник С.И., Трофимьяк Т.Б., Блюм Я.Б. Механизмы формирования устойчивости растений к тяжелым металлам // Усп. совр. биол. 1995. Т. 115. № 3. С. 261–276.
3. Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // Planta. 2001. V. 212. P. 475–486.
4. Sawidis T., Breuste J., Mitrovic M., Pavlovic P., Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities // Environ. Pollut. 2011. P. 3560–3570.
5. Кулаева О.А., Цыганов В.Е. Молекулярно-генетические основы устойчивости высших растений к кадмию и его аккумуляции // Экол. генетика. 2010. Т. 8. С. 3–15.
6. Гераськин С.А., Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Анализ внутривидового полиморфизма ячменя по устойчивости к действию кадмия // Агрохимия. 2021. № 8. С. 57–64.
7. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Влияние нитрата свинца на морфологические и цитогенетические показатели растений ярового двурядного ячменя (*Hordeum vulgare* L.) // Агрохимия. 2014. № 7. С. 45–52.
8. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А. Внутривидовой полиморфизм ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) по устойчивости к действию свинца // Сел.-хоз. биол. 2014. № 5. С. 78–87.
9. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А. Исследование изозимного полиморфизма у сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), контрастных по устойчивости к свинцу // Сел.-хоз. биол. 2016. Т. 51. № 1. С. 89–99.
10. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Сравнительный анализ частоты цитогенетических эффектов в апикальной меристеме корешков проростков сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), контрастных по устойчивости к свинцу // Тр. по прикл. бот., генет. и селекции. 2016. Т. 177. № 1. С. 50–68.
11. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А. Факторный анализ полиморфизма сортов ячменя по изоэнзимам, маркирующим устойчивость к свинцу // Агрохимия. 2017. № 6. С. 73–80.
12. Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Атомиздат, 1993. С. 250.
13. Конарев В.Г. Белки растений как генетические маркеры. М.: Колос, 1983. С. 320.
14. Созинов А.А. Полиморфизм белков и его значение в генетике и селекции. М.: Наука, 1985. С. 272.
15. Чесноков Ю.В. ДНК-фингерпринтинг и анализ генетического разнообразия у растений // Сел.-хоз. биол. 2005. № 1. С. 20–40.
16. Алтухов Ю.П. Генетические процессы в популяциях. М.: Академкнига, 2003. С. 431.
17. Тимошкина Н.Н., Водолажский Д.И., Усатов А.В. Молекулярно-генетические маркеры в исследовании внутри- и межвидового полиморфизма осетровых рыб (*Acipenseriformes*) // Экол. генетика. 2010. Т. 8. № 1. С. 12–24.
18. Алтухов Ю.П., Салменкова Е.А. Полиморфизм ДНК в популяционной генетике // Генетика. 2002. Т. 38. № 9. С. 1173–1195.
19. Cartes P., McManus M., Wulf-Zotelle C. Differential superoxide dismutase expression in ryegrass cultivars in response to short term aluminum stress // Plant Soil. 2012. V. 350. P. 353–363.
20. Wang Y., Greger M. Clonal differences in mercury tolerance, accumulation and distribution in willow // J. Environ. Qual. 2004. V. 33. P. 1779–1785.
21. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартиформ, 2010. С. 25.
22. Маурер Г. Диск-электрофорез. М.: Мир, 1971. С. 247.
23. Плешков Б.П. Практикум по биохимии растений. М.: Колос, 1976. С. 256.
24. Остерман Л.А. Методы исследования белков и нуклеиновых кислот. Электрофорез и ультрацентрифугирование. М.: Наука, 1981. С. 288.
25. Manchenko G.P. Handbook of detection of enzymes on electrophoretic gels. N.Y.: CRC Press, 1994. P. 268.
26. Зыкова Н.Ю., Лапкина О.С., Хлоповских Ю.Г. Методы математической обработки данных. Воронеж: Издат.-полиграф. центр ВоронежГУ, 2008. С. 84.
27. Boening D.W. Ecological effects, transport and fate of mercury: a general review // Chemosphere. 2000. V. 40. P. 1335–1351.
28. Wang Y., Greger M. Clonal differences in mercury tolerance, accumulation and distribution in willow // J. Environ. Qual. 2004. V. 33. P. 1779–1785.
29. Zhou Z.S., Huang S.Q., Guo K., Mehta S.K., Zhang P.C., Yang Z.M. Metabolic adaptations to mercury-induced oxidative stress in roots of *Medicago sativa* L. // J. Inorg. Biochem. 2007. V. 101. P. 1–9.
30. Drazkiewicz M., Scorezinska-Polit E., Krupa Z. The redox state and activity of superoxide dismutase classes in *Arabidopsis thaliana* under cadmium or copper stress // Chemosphere. 2007. V. 67. P. 188–193.
31. Malecka A., Jarmuszkiewicz W., Tomaszewska B. Antioxidative defense to lead stress in subcellular compartments of pea root cells // Acta Biochim. Polonica. 2001. V. 48. № 3. P. 687–690.
32. Cho U.H., Park J.O. Mercury-induced oxidative stress in tomato seedlings // Plant Sci. 2000. V. 156. P. 1–9.
33. Cargnelutti D., Tabaldi L.A., Spanevello R.M. Mercury toxicity induces oxidative stress in growing cucumber seedlings // Chemosphere. 2006. V. 65. P. 999–1006.

34. Chen J., Shiyab S., Han F.X. Bioaccumulation and physiological effects of mercury in *Pteris vittata* and *Nephrolepis exaltata* // *Ecotoxicology*. 2009. V. 18. P. 110–121.
35. Apel K., Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2004. V. 55. P. 373–399.
36. del Ri'o L.A., Sandalio L.M., Corpas F.J., Palma J.M., Barroso J.B. Reactive oxygen species and reactive nitrogen species in peroxisomes, production, scavenging, and role in cell signaling // *Plant Physiol.* 2006. V. 141. P. 330–335.
37. Полесская О.Г. Растительная клетка и активные формы кислорода. М.: Университет, 2007. 140 с.
38. Mittler R., Vanderauwera S., Gollery M., Van Breusegem F. Reactive oxygen gene network of plants // *Trends Plant Sci.* 2004. V. 9. P. 490–498.
39. Fried R. Enzymatic and non-enzymatic assay of superoxide-dismutase // *Biochemie*. 1975. V. 57. P. 657–660.
40. Inze D., Montagu M. Oxidative stress in plants // *Current Opinion in Biotechnology*. 1995. V. 6. P. 153–158.
41. Scandalios J.G. Oxygen stress and superoxide dismutases // *Plant Physiol.* 1993. V. 101. P. 7–12.
42. Alscher R.G., Erturk N., Heath L.S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants // *J. Exp. Bot.* 2002. V. 53. P. 1331–1341.
43. Rancelis V., Cesniene T., Kleizaite V. Influence of cobalt uptake by *Vicia faba* seeds on chlorophyll morphosis induction, SOD polymorphism and DNA methylation // *Environ. Toxicol.* 2010. V. 10. P. 5–15.
44. Tanaka Y. Salt tolerance of transgenic rice overexpressing yeast mitochondrial Mn-SOD in chloroplasts // *Plant Sci.* 1999. V. 148. P. 131–138.
45. Taylor N.L., Day A.C. Targets of stress-induced oxidative damage in plant mitochondria and their impact on cell carbon/nitrogen metabolism // *J. Exp. Bot.* 2004. V. 55. № 394. P. 1–10.
46. Vacca R.A. Production of reactive oxygen species, alteration of cytosolic ascorbate peroxidase, and impairment of mitochondrial metabolism are early events in heat shock-induced programmed cell death in tobacco // *Plant Physiol.* 2004. V. 134. № 3. P. 1100–1112.
47. Mallick S., Sinam G., Sinha S. Study on arsenate tolerant and sensitive cultivars of *Zea mays* L.: differential detoxification mechanism and effect on nutrient status // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2011. V. 74. P. 1316–1324.
48. Elbaz A., Wei Y., Meng Q. Mercury-induced oxidative stress and impact on antioxidant enzymes in *Chlamidomonas reinhardtii* // *Ecotoxicology*. 2010. V. 10. P. 8–18.
49. Dat J., Vandenabeele S., Vranova E. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses // *Cell. Mol. Life Sci.* 2000. V. 57. P. 779–795.
50. Lanubile A., Bernardi J., Marocco A. Differential activation of defense genes and enzymes in maize genotypes with contrasting levels of resistance to *Fusarium verticillioides* // *Environ. Exp. Bot.* 2012. V. 78. P. 39–46.
51. Lamb C., Dixon R.A. The oxidative burst in plant disease resistance // *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol.* 1997. V. 48. P. 251–275.
52. Bolwell G.P., Butt V.S., Davies D.R., Zimmerlin A. The origin of the oxidative burst in plants // *Free Radic. Res.* 1995. V. 23. P. 517–523.
53. Lane B.G. Oxalate, germin, and the extracellular matrix of higher plants // *FASEB J.* 1994. V. 8. P. 294–301.
54. Hammond-Kosack K.E., Jones J.D.G. Resistance gene-dependent plant defense responses // *Plant Cell.* 1996. V. 8. P. 1773–1791.
55. Greenberg J.T., Guo A., Klessig D.F., Ausubel F.M. Programmed cell death in plants: a pathogen-triggered response activated coordinately with multiple defense functions // *Cell.* 1994. V. 77. P. 551–563.
56. Grabowska A., Nowicki M., Kwinta J. Glutamate dehydrogenase of the germinating triticale seeds: gene expression, activity distribution and kinetic characteristics // *Acta Physiol. Plant.* 2011. V. 33. P. 1981–1990.
57. Loulakis K.A., Roubelakis-Angelakis K.A. The seven NAD(H)-glutamate dehydrogenase isoenzymes exhibit similar anabolic and catabolic activities // *Physiol. Plant.* 1996. V. 96. P. 29–35.
58. Purnell M.P., Scopelites D.S., Roubelakis-Angelakis K.A. Modulation of higher-plant NAD(H) dependent glutamate dehydrogenase activity in transgenic tobacco via alteration of beta-subunit level // *Planta*. 2005. V. 222. P. 167–180.
59. Ameziane R., Bernhardt K., Lightfoot D.A. Expression of the bacterial *gdhA* gene encoding a glutamate dehydrogenase in tobacco and corn increased tolerance to the phosphinothricin herbicide // *Nitrogen in a sustainable ecosystem: From the cell to the plant* / Eds. M.A. Martins-Loucao, S.H. Lips. Leiden, the Netherlands: Backhuys Publishers, 2000. P. 339–343.
60. Mungur R., Glass A.D.M., Goodenow D.B. Metabolite fingerprinting in transgenic *Nicotiana tabacum* altered by the *Escherichia coli* glutamate dehydrogenase gene // *J. Biomed. Biotechnol.* 2005. № 2. P. 198–214.
61. Mungur R., Glass A.D., Wood A.J., Lightfoot D.A. Increased water deficit tolerance in *Nicotiana tabacum* expressing the *Escherichia coli* glutamate dehydrogenase gene // *Plant Cell Physiol.* 2006. V. 54. P. 260–272.
62. Geburek T., Scholz F., Knabe W. Genetic studies by isozyme gene loci on tolerance and sensitivity in air polluted *Pinus sylvestris* field trial // *Silvae Genetica*. 1987. V. 36. № 2. P. 49–53.
63. Wootton J.C. Re-assessment of ammonium-ion affinities of NADP-specific glutamate dehydrogenases // *Biochem. J.* 1983. V. 209. P. 527–531.
64. Thompson C.E., Fernandes C.L., de Souza O.N., de Freitas L.B., Salzano F.M. Evaluation of the impact of functional diversification on Poaceae, Brassicaceae, Fabaceae, and Pinaceae alcohol dehydrogenase enzymes // *J. Mol. Model.* 2010. V. 16. P. 919–928.
65. Gietl C. Malate dehydrogenase isoenzymes: cellular locations and role in the flow of metabolites between the cytoplasm and cell organelles // *Biochim. Biophys. Acta*. 1992. V. 1100. P. 217–234.
66. Dasika S.K., Vinnakota K.C., Beard D.A. Determination of the catalytic mechanism for mitochondrial malate dehydrogenase // *Biophys. J.* 2015. V. 108. № 1. P. 408–419.
67. Sharma P., Dubey R.S. Lead toxicity in plants // *Braz. J. Plant. Physiol.* 2005. V. 17. P. 35–52.

## Analysis of the Spring Barley (*Hordeum vulgare* L.) Isoenzyme Polymorphism Connection with Its Tolerance to the Cadmium Influence

A. V. Dikarev<sup>a,#</sup>, V. G. Dikarev<sup>a</sup>, and N. S. Dikareva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Russian Institute of Radiology and Agroecology*

*Kiev highway 109 km, Kaluga region, Obninsk 249032, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: ar.djuna@yandex.ru*

In was the laboratory experiment carried on with the spring barley variants, which shown a contrasting reactions to the cadmium influence. The topic of this work was a searching of the connection of the barley variants response to the toxic stress with the isoenzyme polymorphism of some ferments, which are determined a plants tolerance to the environmental stress. It was taken 14 spring barley variants with the different geographic origin (7 – tolerant to Cd<sup>2+</sup> and 7 – sensitive) for this task. Such variants were selected on the base of the morphometric criteria in our previous work. The seeds of these variants were germinated and then a protein extracts were prepared from the seedlings. The extracts were separated by electrophoresis in the polyacrilamide gel. The gel blocks after this process were stained for discovering of the enzyme activity zones. The list of the ferments used was follows: superoxidedismutase, peroxidase, glutamatedehydrogenase, alcoholdehydrogenase, malatedehydrogenase, glutationedehydrogenase, glucose-6-phosphatedehydrogenase, catalase. The frequencies of all enzyme activity zones were counted, and thus such frequencies were compared for the groups of the Cd<sup>2+</sup> tolerant and sensitive barley variants. Consequently, it was discovered the specific alleles, which are found in the tolerant or sensitive variants with the much probability. Therefore, some conclusion can be stated: the reaction of the selected barley variant to the Cd<sup>2+</sup> influence is connected with some specific isozyme variants. The data, collected in this work, can be used for forecasting of the tolerance of the selected barley variants to the Cd<sup>2+</sup>.

**Key words:** spring barley, cadmium, environmental stress tolerance, tolerant and sensitive barley variants, electrophoresis, isoenzyme analysis.

УДК 546:631.445.152(571.53)

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОФИЛЕ АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ЛУГОВОЙ ПОЧВЫ ЗАЛИВА КУРКУТЫ ОЗ. БАЙКАЛ

© 2023 г. О. В. Зарубина

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
664033 Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

*E-mail: zarub@igc.irk.ru*

Поступила в редакцию 22.02.2023 г.

После доработки 26.03.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

Представлены результаты валового содержания редкоземельных элементов по профилю аллювиальной луговой почвы залива Куркуты оз. Байкал (Иркутская обл., Прибайкалье). Установлено, что максимальное содержание легких редкоземельных элементов находится в верхнем горизонте Ап. Содержание тяжелых редкоземельных элементов по профилю разрезов распределено равномерно и их максимальное количество сосредоточено в основном в горизонтах А и В.

**Ключевые слова:** аллювиальная луговая почва, редкоземельные элементы (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080124, **EDN:** ZEPZCC

### ВВЕДЕНИЕ

Почвы Прибайкалья являются уникальным объектом для изучения содержания, распределения и поведения редкоземельных элементов (РЗЭ). В регионе развиты топливно-энергетический, агропромышленный комплексы, также последние годы очень сильно стал развиваться туризм. Интенсивное использование природных ресурсов вызвало изменение циклов химических элементов в биосфере, темпов миграции, зон выноса и накопления. Значительная доля элементов попадает в почву, которая служит их аккумулятором и прочно фиксируется в плодородном слое [1–5]. Особенностью РЗЭ является их совместное нахождение в земной коре, где преобладают минералы редкоземельных элементов цериевой подгруппы, содержание которых составляет около  $10^{-3}\%$  [6–10]. Концентрация РЗЭ в почвах зависит от почвообразующей породы, степени ее выветренности, генезиса почв, содержания глинистых минералов, органического вещества и варьирует в пределах 0.2–87.6 мг/кг почвы [3].

В условиях резко континентального климата верхние горизонты обеднены РЗЭ по сравнению с почвообразующей породой [4, 7]. Согласно литературным данным РЗЭ мигрируют из верхних кислых горизонтов в более глубокие, осаждаются

во вторичных минералах в различных частях почвенного профиля, содержащих марганцевые и фосфорные конкреции, глинистая фракция почв наиболее обогащена РЗЭ. Показано, что количество вымываемых из почвы РЗЭ коррелирует с количеством вымываемых железа и марганца [11–14]. В качестве субстрата для материнской породы в аллювиальных почвах служат гомогенизированные и отсортированные в ходе разрушения продукты различных пород. Почти во всех работах, посвященных редкоземельным элементам в почвах, делается акцент на первостепенном влиянии исходного состава почвообразующей породы на содержание в ней исследованных веществ. К фактам возможного неравномерного накопления РЗЭ в аллювиальных почвах можно отнести и то, что затопляемые во время паводков участки выполняют функции барьера в отношении веществ, мигрирующих с постоянными и временными, поверхностными и внутрипочвенными водотоками [1, 4, 10, 15, 16].

К редкоземельным элементам относятся 15 химических элементов от лантана до лютеция [2, 3, 6]. Данное название группа химических элементов получила в связи с тем, что они (элементы) редко встречаются в земной коре и подразделяются на 2 группы: легкие редкоземельные элементы (атомная масса <153) или элементы “цери-

евой” подгруппы La, Ce, Pr, Nd, Sm и Eu; тяжелые редкоземельные элементы (атомная масса >153) или элементы “иттриевой” подгруппы Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu.

До недавнего времени изучение содержания, распределения и поведения редкоземельных элементов в природных объектах было затруднено из-за низкой чувствительности применяемых приборов и отсутствием стандартных образцов. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой дало возможность для изучения всех 15-ти РЗЭ в почвах [12, 13]. Цель работы — изучение распределения редкоземельных элементов в профиле аллювиальной луговой почвы залива Куркуты оз. Байкал (Иркутская обл., Прибайкалье), сведения о содержании которых практически отсутствуют.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были аллювиальные луговые почвы, сформированные на аллювии и делювии магматических и метаморфических горных пород [1, 5]. Исследованные почвы находятся в зоне транспортного и туристического воздействия. Для отбора проб почвы были выбраны участки с отсутствием следов сильного антропогенного воздействия. Отбор проб почвы проводили в сентябре согласно общепринятым в почвоведении методам. Исследование проводили методом прикопок с шагом в 50 м с глубины 15 см. Отбор образцов с небольших глубин обоснован тем, что большая часть привнесенных элементов концентрируется в верхнем почвенном горизонте. Почвенные разрезы закладывали в разных частях исследованной территории (разрезы 1, 2), генетические горизонты выделяли визуально, отбирали пробы массой  $\approx 1000$  г через 10–15 см в каждом горизонте. Отобранный материал сохраняли в естественно-влажном состоянии, затем сушили до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях во избежание потерь химически неустойчивых и летучих элементов и их соединений. Морфологическое описание аллювиальной луговой почвы, взятой для исследования следующее.

Разрез № 1 заложен в 650 м в пойме Куркутского залива оз. Байкал (Иркутская обл.). Растительность: осока, мятлик луговой, ромашка, горошек, полынь.

Горизонт Ап на глубине 2–7 см, глубина взятия образца — 4 см, светло-серый, рыхлый, сухой легкий суглинок, пылит; включения: обильные корни растений, встречаются гравелиты, характер перехода резкий по цвету и плотности, граница перехода волнистая, слабо вскипает от HCl.

Горизонт А на глубине 7–20 см, глубина взятия образца — 10 см, серовато-коричневый, сухой, уплотнен и пылит, слабокомковатой структуры легкий суглинок; включения: галька и корни растений, характер перехода постепенный по цвету и плотности, не вскипает от HCl. Горизонт А на глубине 20–60 см, глубина взятия образца — 30 и 40 см, коричневый с серыми включениями до 15 см, сухой, средний суглинок, очень плотный; включения: галька по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, слабо вскипает от HCl. Горизонт В1 на глубине 60–100 см, глубина взятия образца — 50 и 60 см, серовато-коричневый, сухой, средний суглинок, очень плотный, комковатый; включения серого цвета по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, не вскипает от HCl. Горизонт В2 на глубине 100–130 см, глубина взятия образца — 120 см, серовато-коричневый однородный, сухой, средний суглинок, очень плотный; включения: галька от 5 см по всему горизонту. Горизонт С на глубине 130–150 см, глубина взятия образца — 140 см, коричневый однородный, влажный, супесь, очень плотный; включения: мелкие камни.

Разрез № 2 заложен в 250 м в пойме Куркутского залива оз. Байкал (Иркутская обл.). Растительность: осока, мятлик луговой, горошек.

Горизонт Ап на глубине 2–5 см, глубина взятия образца — 3 см, светло-серый, рыхлый, сухой легкий суглинок, пылит; включения: обильные корни растений, характер перехода резкий по цвету и плотности, граница перехода волнистая, слабо вскипает от HCl. Горизонт А на глубине 5–25 см, глубина взятия образца — 10 см, серовато-коричневый, сухой, уплотнен и пылит, слабокомковатой структуры легкий суглинок; включения: галька и корни растений, характер перехода постепенный по цвету и плотности, слабо вскипает от HCl. Горизонт А на глубине 25–50 см, глубина взятия образца — 40 см, коричневый с серыми включениями до 15 см, сухой, слабый суглинок, очень плотный, включения: галька по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, не вскипает от HCl. Горизонт В на глубине 50–110 см, глубина взятия образца — 70 и 80 см, серовато-коричневый, сухой, опесчаненный суглинок, очень плотный, комковатый, включения серого цвета по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, не вскипает от HCl. Горизонт С на глубину 110–130 см, глубина взятия образца — 120 см, коричневый однородный, влажный, супесь, очень плотный; включения: мелкие камни.

Анализ почвенных прикопок ( $n = 9$ ) показал, что почвенный покров однороден и представлен аллювиальной луговой почвой.

**Таблица 1.** Основные параметры для съемки NexION 300D (Perkin Elmer)

| Инструмент                                                      | NexION 300D (Perkin Elmer)                  |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Входная мощность ВЧ-генератор                                   | 1500 Вт                                     |
| Расходы газовых потоков (Ar):                                   |                                             |
| транспортирующего                                               | 1.2 л мин <sup>-1</sup>                     |
| охлаждающего                                                    | 18 л мин <sup>-1</sup>                      |
| вспомогательного                                                | 1.2 л мин <sup>-1</sup>                     |
| Реакционный газ для KED ячейки (He)                             | 2.5 л мин <sup>-1</sup>                     |
| Реакционный газ для DRC ячейки (NH <sub>3</sub> )               | 0.6 л мин <sup>-1</sup>                     |
| Распылитель                                                     | Meinhard, концентрический                   |
| Распылительная камера                                           | кварцевая                                   |
| Время подвода образца                                           | 80 с                                        |
| Время регистрация спектра                                       | 150–200 с                                   |
| Время промывки                                                  | 120–240 с (3% HNO <sub>3</sub> )            |
| Чувствительность (имп/сек на 1 нг мл <sup>-1</sup> )            | Mg 24 138069<br>Co 59 34833<br>Pb 208 39106 |
| Внутренний стандарт                                             | Rh 103 (10 нг мл <sup>-1</sup> )            |
| Относительное стандартное отклонение интенсивности (RSD) за 1 ч | Mg 24 1.67<br>Pb 208 0.4                    |
| Отношение CeO : Ce                                              | 0.024                                       |
| Ce <sup>++</sup> : Ce <sup>+</sup>                              | 0.014                                       |

Для определения содержания редкоземельных элементов использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Это высокочувствительный метод, который дает возможность получить рекордно низкие пределы обнаружения определяемых элементов [13]. Измерения выполняли по аттестованной методике [8]. Определение содержаний РЗЭ в почвах выполнено при помощи современного квадрупольного масс-спектрометра NexION 300D (Perkin Elmer, США) на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) “Изотопно-геохимических исследований”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Инструментальная часть.* Перед началом измерений проводили настройку прибора и оптимизацию инструментальных параметров с целью получения максимальной величины аналитического сигнала и его стабильности при минимальном вкладе в сигнал оксидных и двухзарядных ионов, низком фоновом уровне. Выбор способа градуировки обусловлен необходимостью одновременно определить максимально возможное количество элементов в одном растворе и учесть матричные помехи. В связи с этим применяли

внешнюю градуировку по раствору Tuning Solution (“tune”) с концентрацией 1 ppb следующих элементов: Ba, Be, Ce, Co, In, Mg, Pb, Rh, U (табл. 1).

Для расчета концентраций использовали градуировку по сертифицированным растворам CLMS-1-4 фирмы SPEX (США) с концентрациями элементов 0.1, 1.0, 5.0 нг/мл с контролем дрейфа сигнала по внутреннему стандарту, в качестве которого выбран <sup>103</sup>Rh. Нивелирование матричного эффекта достигали путем разбавления готовых растворов проб для анализа в 10000 раз.

Для перевода анализируемого раствора в аэрозоль использовали концентрический низкотоковый распылитель Meinhard (0.1 мл/мин). Пределы обнаружения (ПО) оценивали по 3σ-критерию:  $ПО = C_{\text{контр}} + 3\sigma$ , где  $C_{\text{контр}}$  – величина среднего контрольного опыта,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение его измерения по данным, полученным для контрольных проб. Величины ПО, полученные для растворов, пересчитывали на содержание в твердом веществе с учетом фактора разбавления.

Для решения задачи обеспечения правильности полученных результатов применяли стандартные образцы почв (Китай) GSS-11, 14 и 16.

**Таблица 2.** Установленные и аттестационные значения для стандартных образцов почв, GSS-11, 14 и 16 (Китай), мг/кг

| Элемент | ПО    | GSS-11                     |                             | GSS-14                     |                             | GSS-16                     |                             |
|---------|-------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|         |       | $C_{\text{cp}} \pm \Delta$ | $C_{\text{атт}} \pm \Delta$ | $C_{\text{cp}} \pm \Delta$ | $C_{\text{атт}} \pm \Delta$ | $C_{\text{cp}} \pm \Delta$ | $C_{\text{атт}} \pm \Delta$ |
| La      | 0.1   | $36 \pm 0.004$             | $34 \pm 2$                  | $43 \pm 0.03$              | $41 \pm 2$                  | $71 \pm 0.02$              | $67 \pm 3$                  |
| Ce      | 0.2   | $66 \pm 3.19$              | $65 \pm 3$                  | $83 \pm 0.18$              | $80 \pm 2$                  | $140 \pm 0.81$             | $133 \pm 5$                 |
| Pr      | 0.01  | $8.0 \pm 0.03$             | $7.9 \pm 0.5$               | $9.5 \pm 0.08$             | $9.2 \pm 0.6$               | $15.4 \pm 0.42$            | $14.6 \pm 1.1$              |
| Nd      | 0.07  | $31 \pm 0.79$              | $30 \pm 2$                  | $38 \pm 1.34$              | $36 \pm 3$                  | $60 \pm 1.2$               | $57 \pm 4$                  |
| Sm      | 0.03  | $5.7 \pm 0.13$             | $5.5 \pm 0.2$               | $6.5 \pm 0.21$             | $6.4 \pm 0.3$               | $10.5 \pm 0.40$            | $10.4 \pm 0.5$              |
| Eu      | 0.01  | $1.16 \pm 0.08$            | $1.18 \pm 0.04$             | $1.47 \pm 0.02$            | $1.36 \pm 0.06$             | $1.61 \pm 0.02$            | $1.66 \pm 0.07$             |
| Gd      | 0.03  | $4.9 \pm 0.05$             | $4.7 \pm 0.3$               | $5.9 \pm 0.05$             | $5.5 \pm 0.5$               | $8.7 \pm 0.06$             | $8.5 \pm 0.7$               |
| Tb      | 0.005 | $0.77 \pm 0.03$            | $0.76 \pm 0.05$             | $0.89 \pm 0.01$            | $0.87 \pm 0.06$             | $1.3 \pm 0.02$             | $1.3 \pm 0.1$               |
| Dy      | 0.02  | $4.4 \pm 0.17$             | $4.2 \pm 0.4$               | $5.1 \pm 0.22$             | $4.8 \pm 0.3$               | $7.7 \pm 0.14$             | $7.4 \pm 0.5$               |
| Ho      | 0.005 | $0.85 \pm 0.07$            | $0.89 \pm 0.05$             | $0.97 \pm 0.06$            | $0.93 \pm 0.04$             | $1.53 \pm 0.07$            | $1.41 \pm 0.08$             |
| Er      | 0.07  | $2.57 \pm 0.07$            | $2.46 \pm 0.07$             | $2.8 \pm 0.12$             | $2.6 \pm 0.3$               | $3.7 \pm 0.26$             | $3.8 \pm 0.2$               |
| Tm      | 0.005 | $0.41 \pm 0.01$            | $0.38 \pm 0.03$             | $0.43 \pm 0.01$            | $0.41 \pm 0.03$             | $0.59 \pm 0.01$            | $0.57 \pm 0.05$             |
| Yb      | 0.02  | $2.63 \pm 0.02$            | $2.54 \pm 0.13$             | $2.66 \pm 0.05$            | $2.53 \pm 0.12$             | $4.06 \pm 0.02$            | $3.80 \pm 0.2$              |
| Lu      | 0.004 | $0.42 \pm 0.01$            | $0.41 \pm 0.02$             | $0.44 \pm 0.01$            | $0.42 \pm 0.02$             | $0.58 \pm 0.02$            | $0.58 \pm 0.05$             |

Для каждого стандартного образца при соответствующих условиях анализа находили соотношение  $C_{\text{cp}} : C_{\text{атт}}$ , где  $C_{\text{cp}}$  — полученное среднее содержание,  $C_{\text{атт}}$  — аттестованные показатели. В табл. 2 представлены результаты полученных показателей  $C_{\text{cp}} \pm \Delta$ , где доверительный интервал ( $\pm \Delta$ ) оценивали при  $P = 0.95$  и аттестованные величины  $C_{\text{атт}} \pm \Delta$  ( $\pm \Delta$  — погрешность аттестации).

Для РЗЭ дополнительным показателем правильности анализа могут служить нормализованные по образцу PAAS (Постархейский австралийский сланец) или образцу RPSC (глины Русской платформы) кривые распределения, которые являются одним из основных инструментов геохимических исследований природных процессов [14, 17]. Отношения содержаний (проба : хондрит) в большинстве случаев имеют плавные распределения от La до Lu, за исключением возможных аномалий Eu (иногда Ce). На рис. 1 представлены составы РЗЭ, нормализованные по RPSC, из которых видно, что полученные данные дают сопоставимые кривые распределения РЗЭ с аттестованными показателями.

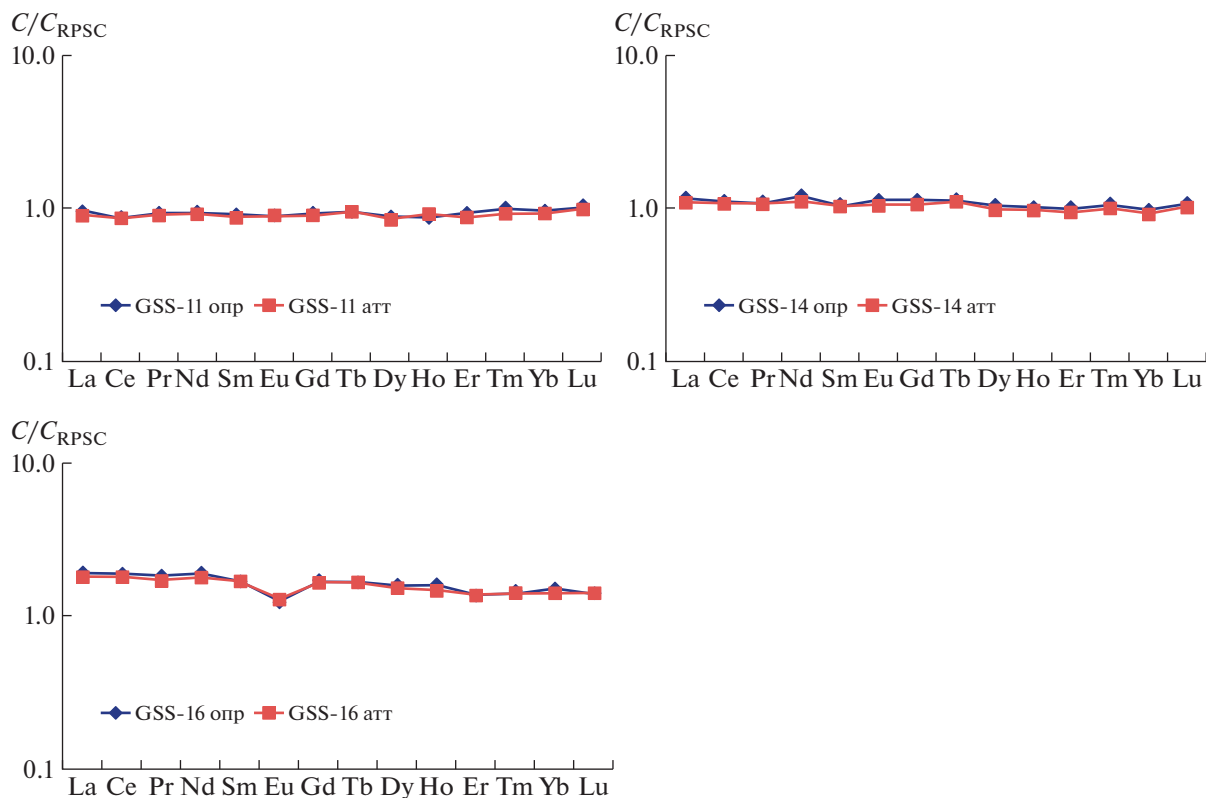
**Химическая пробоподготовка.** Образцы почв (навеска 100 мг), имеющие в своем составе органическое вещество и тугоплавкие минералы, сплавляли с безводным метаборатом лития (400 мг) в течение 3 мин в стеклоглеродных тиглях марки СУ-2000 при температуре 1150°C в высокочастотной индукционной печи ВЧГ-4 (Таганрогский завод электротехнического оборудования), с по-

следующем и согласно следующим разложением плавня смесью перегнанных кислот HF и HNO<sub>3</sub> и отгонкой SiF<sub>4</sub>, окончательный фактор разведения основного раствора пробы составлял 1000 раз [8].

Двойную и тройную перегонку кислот осуществляли последовательно в системах глубокой очистки кислот: в subPUR/duo PUR Milestone microwave laboratory systems, затем в Savillex DST-1000 sub-boiling Distillation System User's Manual. Кислотность всех готовых к ИСП-МС-анализу растворов составляла 2–3% HNO<sub>3</sub>. Для приготовления всех растворов (промывочных, градуировочных, анализируемых и контроля) использовали сверхчистую воду, очищенную с помощью аппарата Milli Q (Millipore SAS, Франция), дозировка и раздача сверхчистой воды через дозатор Q-POD (первой степени чистоты).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой был использован при изучении содержания редкоземельных элементов аллювиальной луговой почвы Прибайкалья. В табл. 3 приведены данные предела обнаружения, средние содержания для исследованной почвы, средние содержания для почв мира [3, 9] по литературным данным редкоземельных элементов, данные для аллювиальной луговой почвы Забайкалья [7] и геохимические кларки редкоземельных элементов для верхней континентальной коры [14, 17].



**Рис. 1.** Составы РЗЭ, нормализованные по RPSC [14, 17] в стандартных образцах почв GSS-11, 14 и 16 для аттестованных и установленных показателей.

Содержание лантана в аллювиальной луговой почве значительно варьировало по профилю разрезов 1 и 2 (рис. 2а). В верхнем горизонте Ап содержание La составило 17–23 мг/кг и его содержание с глубиной постепенно уменьшалось до 6 мг/кг почвы (гор. С), в горизонтах А и В отмечено снижение содержания лантана до 9.1 и 7.8 мг/кг почвы соответственно. Возможно, подобный характер распределения лантана по профилю аллювиальной луговой почвы был обусловлен снижением содержания органического вещества и постепенным его вымыванием в нижние горизонты В1 и В2 на глубину до 60 см.

Повышенные концентрации церия в почве отличались по профилю от элементов группы легких редкоземельных в несколько раз: лантана – в 2 раза, прозеодима – в 8 раз, неодима – в 2 раза, самария – в 9.5 раза, европия – в 17 раз и гадолиния – в 5 раз. Даже по сравнению с тяжелыми редкоземельными элементами содержание церия было больше в десятки раз.

Содержание самария в исследованной почве составило от 3.0 до 5.7 мг/кг, что было в несколько раз меньше содержания неодима, лантана и церия. Максимальный уровень накопления сама-

рия соответствовал верхнему горизонту А, что возможно также было связано с содержанием органического вещества и постепенным вымыванием самария с органической составляющей в нижние горизонты В1 и В2 на глубину до 70 см.

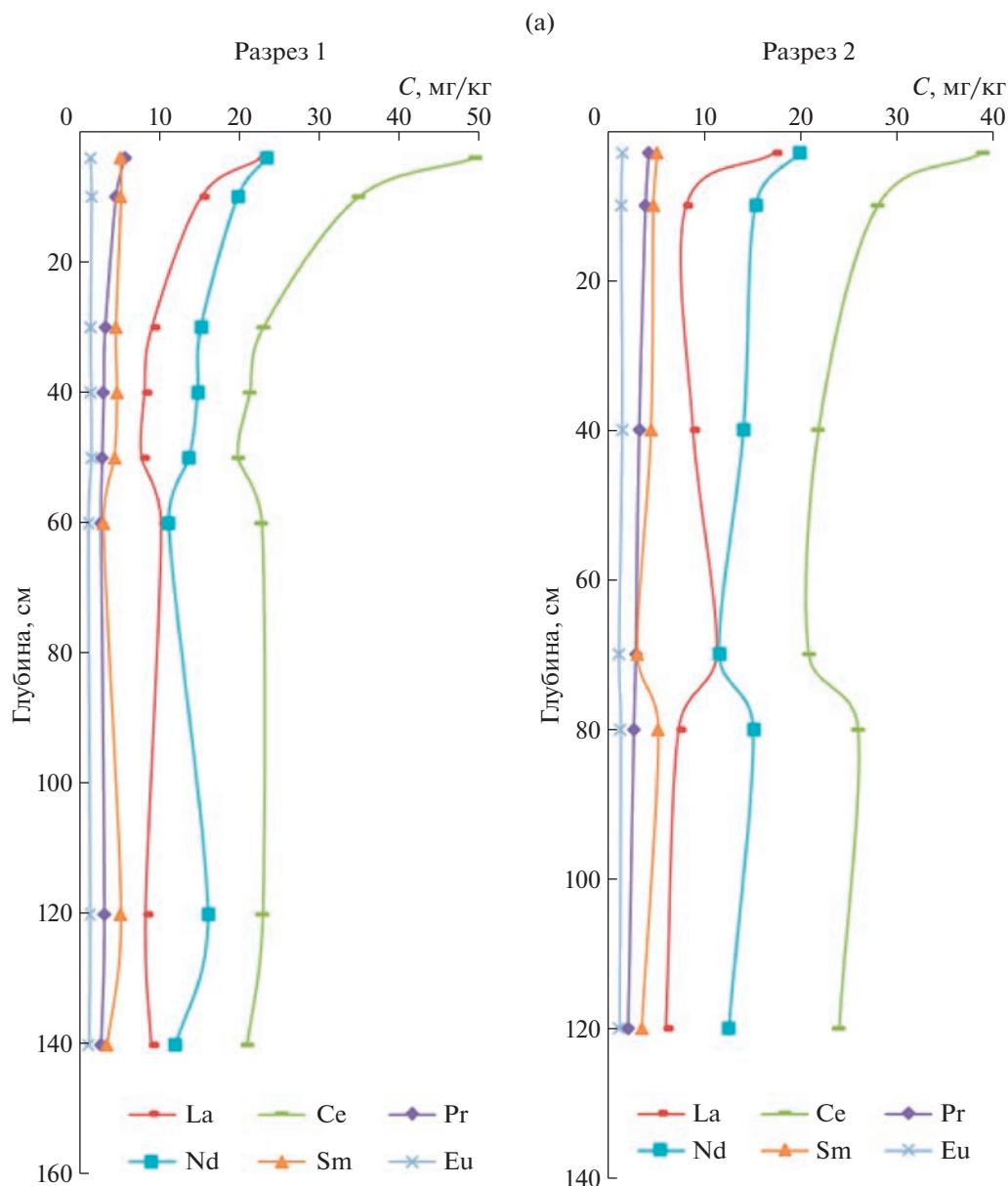
Легкие редкоземельные элементы имеют сходство по контрастности дифференциации между собой в генетических горизонтах исследованной аллювиальной луговой почвы (рис. 2а) [11].

В исследованной аллювиальной луговой почве концентрация тяжелых редкоземельных элементов варьировала по профилю разрезов 1 и 2 (рис. 2б). Максимум накопления Gd, Dy, Er и Yb в профиле разрезов 1 и 2 почв приходился на горизонты А и В глубиной до 50–80 см. В верхнем горизонте Ап максимальное содержание гадолиния достигало 5.4, диспрозия – 7.4, эрбия – 4.9 и итербия – 4.4 мг/кг, и с глубиной постепенно концентрация элементов увеличивалась до горизонта А (Gd – 6.9, Dy – 7.9, Er – 5.2 и Yb – 4.8 мг/кг почвы), в нижнем горизонте С их содержание снижалось и составило: Gd – 4.2, Dy – 4.9, Er – 3.2 и Yb – 3.0 мг/кг почвы.

Содержание Tb, Ho, Tm и Lu по профилю разрезов было распределено равномерно и их макси-

Таблица 3. Пределы обнаружения и среднее содержание редкоземельных элементов аллювиальной луговой почвы, по результатам масс-спектрометрического с индуктивно-связанной плазмой метода анализа, мг/кг

|                                       | La               | Ce        | Pr   | Nd        | Sm       | Eu        | Gd   | Tb        | Dy   | Ho    | Er   | Tm    | Yb        | Lu        |
|---------------------------------------|------------------|-----------|------|-----------|----------|-----------|------|-----------|------|-------|------|-------|-----------|-----------|
| ПО                                    | 0.1              | 0.2       | 0.01 | 0.07      | 0.03     | 0.01      | 0.03 | 0.005     | 0.02 | 0.005 | 0.07 | 0.005 | 0.02      | 0.004     |
| Горизонт (см)                         | Разрез 1         |           |      |           |          |           |      |           |      |       |      |       |           |           |
| Ап (0–7)                              | 23               | 49        | 5.6  | 23        | 5.1      | 1.4       | 5.4  | 0.82      | 5.3  | 1.1   | 3.3  | 0.46  | 3.0       | 0.49      |
| А (7–20)                              | 15               | 35        | 4.5  | 20        | 5.2      | 1.5       | 6.4  | 1.0       | 6.9  | 1.5   | 4.5  | 0.72  | 4.4       | 0.67      |
| А (20–60)                             | 9.1              | 23        | 3.2  | 15        | 4.6      | 1.4       | 6.5  | 1.1       | 7.3  | 1.6   | 4.9  | 0.69  | 4.5       | 0.71      |
| А (20–60)                             | 8.2              | 21        | 3.0  | 15        | 4.7      | 1.4       | 6.9  | 1.2       | 7.9  | 1.6   | 5.2  | 0.76  | 4.8       | 0.76      |
| В1 (60–100)                           | 7.8              | 20        | 2.9  | 14        | 4.4      | 1.5       | 6.2  | 1.0       | 7.4  | 1.6   | 5.1  | 0.72  | 4.7       | 0.73      |
| В1 (60–100)                           | 10               | 23        | 2.7  | 11        | 3.0      | 1.1       | 3.5  | 0.56      | 3.8  | 0.8   | 2.4  | 0.37  | 2.5       | 0.38      |
| В2 (100–130)                          | 8.3              | 23        | 3.1  | 16        | 5.2      | 1.3       | 6.6  | 1.2       | 7.7  | 1.6   | 4.6  | 0.67  | 4.4       | 0.70      |
| С (130–150)                           | 9.0              | 21        | 2.7  | 12        | 3.4      | 1.2       | 4.2  | 0.70      | 4.9  | 1.1   | 3.2  | 0.45  | 3.0       | 0.51      |
| Горизонт (см)                         | Разрез 2         |           |      |           |          |           |      |           |      |       |      |       |           |           |
| Ап (0–5)                              | 17               | 39        | 4.2  | 20        | 5.1      | 1.5       | 6.1  | 1.0       | 7.3  | 1.1   | 4.9  | 0.5   | 3.4       | 0.7       |
| А (5–25)                              | 8.1              | 28        | 3.9  | 15        | 4.7      | 1.4       | 6.2  | 1.1       | 7.4  | 1.9   | 4.9  | 0.7   | 3.5       | 0.7       |
| А (25–50)                             | 8.8              | 22        | 3.3  | 14        | 4.4      | 1.5       | 5.9  | 1.1       | 7.5  | 1.1   | 4.9  | 0.5   | 3.7       | 0.6       |
| В (50–110)                            | 11               | 21        | 2.9  | 12        | 3.0      | 1.1       | 3.5  | 0.6       | 3.9  | 0.9   | 2.4  | 0.4   | 2.5       | 0.5       |
| В (50–110)                            | 7.3              | 26        | 2.7  | 15        | 5.2      | 1.3       | 6.6  | 1.2       | 7.7  | 0.6   | 4.7  | 0.6   | 2.4       | 0.5       |
| С (110–130)                           | 6.0              | 24        | 2.1  | 13        | 3.5      | 1.2       | 4.3  | 0.7       | 4.9  | 0.7   | 3.2  | 0.5   | 3.0       | 0.5       |
| Горизонт (см)                         | Прикопки (n = 9) |           |      |           |          |           |      |           |      |       |      |       |           |           |
| Ап (0–25)                             | 14               | 43        | 5.2  | 22        | 5.7      | 1.7       | 6.9  | 1.1       | 6.7  | 1.4   | 4.4  | 0.6   | 4.1       | 0.6       |
| По литературным данным                |                  |           |      |           |          |           |      |           |      |       |      |       |           |           |
| Почвы мира [3, 9]                     | 13.9–56.3        | 21.2–75.7 | –    | 16.5–56.0 | 3.3–11.9 | 0.69–3.21 | –    | 0.49–1.66 | –    | –     | –    | –     | 1.57–3.66 | 0.24–0.52 |
| Аллювиальная луговая Забайкалье [7]   | 28.3–49.7        | 34.8–51.2 | –    | 14.3–23.4 | 5.8–8.2  | –         | –    | –         | –    | –     | –    | –     | –         | –         |
| Верхняя континентальная кора [14, 17] | 30               | 64        | 7.1  | 26        | 4.5      | 0.88      | 3.8  | 0.64      | 3.5  | 0.8   | 2.3  | 0.33  | 2.2       | 0.32      |
| Примечание. Прочерк – нет данных.     |                  |           |      |           |          |           |      |           |      |       |      |       |           |           |



**Рис. 2.** Распределение легких (а) и тяжелых (б) редкоземельных элементов в профиле аллювиальной луговой почвы по данным масс-спектрометрического метода анализа.

мальное количество обнаружено в основном в горизонтах А или В: Tb – 1.2, Ho – 1.9, Tm – 0.8 и Lu – 0.7 мг/кг.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено содержание редкоземельных элементов в аллювиальной луговой почве залива Куркуты оз. Байкал с использованием современного высокоточного масс-спектрометрического метода анализа. По данным анализов, установлены закономерности накопления и распределения РЗЭ в вертикальном разрезе, зависящие от геохи-

мической характеристики элементов, генетических особенностей и вертикальной миграции. Легкие редкоземельные элементы имели сходство по контрастности дифференциации между собой в генетических горизонтах исследованной аллювиальной луговой почвы.

Содержание лантана значительно варьировало по профилю разрезов, а концентрация церия отличалась от всей группы редкоземельных элементов в несколько раз: лантана – в 2 раза, празеодима – в 8 раз, неодима – в 2 раза, самария – в 9.5 раза, европия – в 17 раз и гадолиния – в 5 раз.

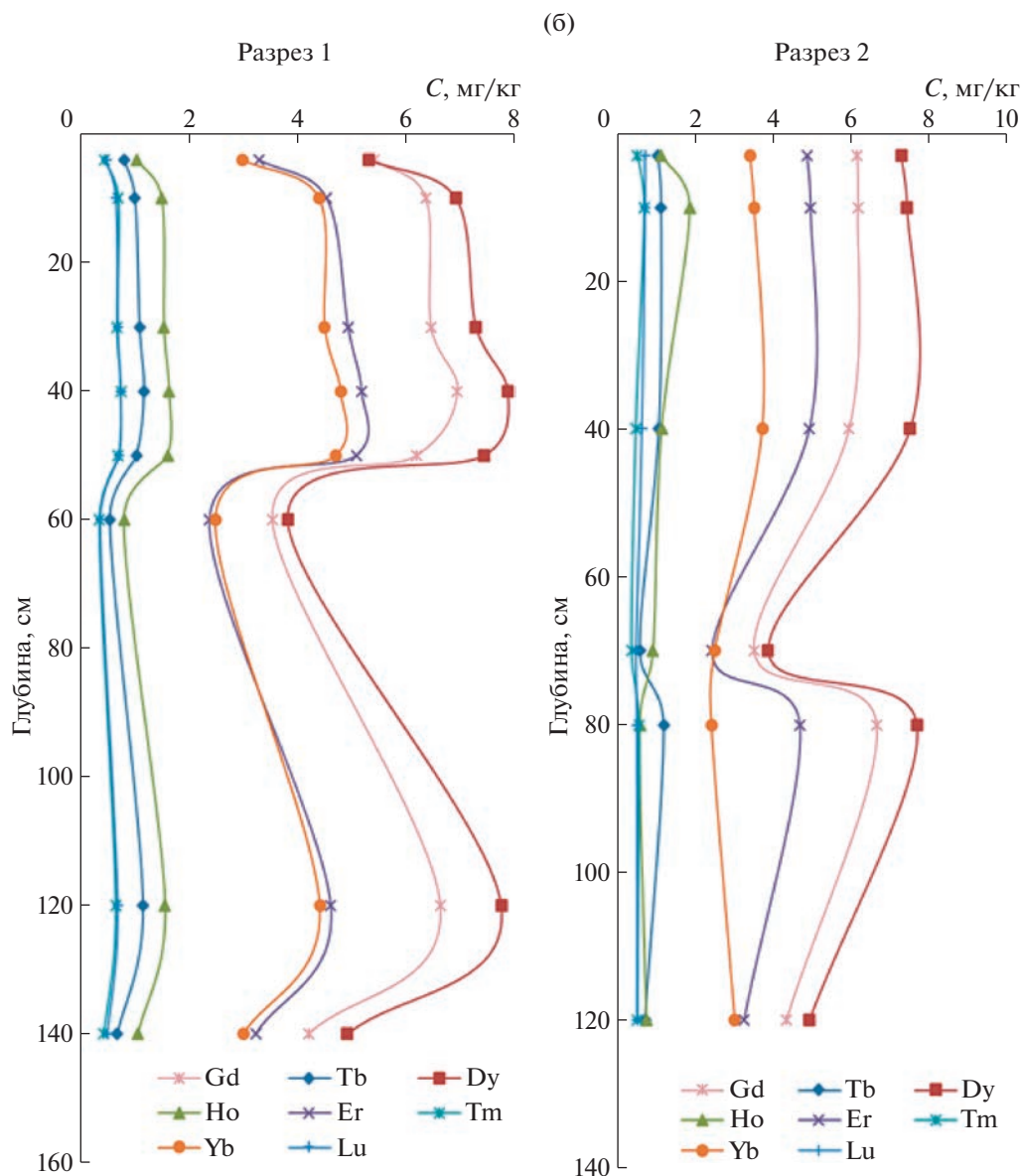


Рис. 3. Окончание.

Даже по сравнению с тяжелыми редкоземельными элементами содержание церия было больше в десятки раз.

Содержание самария в исследованной почве составило от 3.0 до 5.7 мг/кг, максимальный уровень накопления самария соответствовал верхнему горизонту А, что было связано с содержанием органического вещества и постепенным вымыванием самария в нижние горизонты В1 и В2.

Содержания тяжелых редкоземельных элементов по профилю разрезов были распределены равномерно, и их максимальное содержание обнаружено в горизонтах А или В на глубине 50–80 см.

Автор благодарит сотрудников Института геохимии СО РАН А.Ю. Митрофанову, Н.Н. Пахомову и В.И. Гребенщикову за поддержку и помощь в отборе образцов и проведении анализа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Иркутской области: экологические условия. Иркутск, 2004. 90 с.
2. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Пер. с англ. / Под ред. Саева Ю.Е. М.: Мир, 1989. 439 с.

4. Кузьмин В.А. Почвы Предбайкалья и Северного Забайкалья. Новосибирск: СО АН СССР, Наука, 1988. 174 с.
5. Напрасникова Е.В. Экологическое состояние почвенного покрова юго-западного побережья оз. Байкал // Сиб. мед. журн. 2008. № 2. С. 69–71.
6. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 1–6. М.: Недра–Экология, 1994–1997.
7. Кожевникова Н.М. Распределение редкоземельных элементов цериевой подгруппы (La, Ce, Pr, Nd, Sm) в профиле аллювиальной луговой почвы Забайкалья и их аккумуляция растениями овса на примере лантана // Агрохимия. 2012. № 10. С. 32–38.
8. МВИ 002-ХМС-2009 “Методика выполнения измерений массовых долей 62 элементов в почвах, донных отложениях, горных породах и сплавах цветных металлов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой”. 2015.
9. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М., 1973. Вып. 1. 280 с.
10. Переломов Л.В. Взаимодействие редкоземельных элементов с биотическими и абиотическими компонентами почв // Агрохимия. 2007. № 11. С. 85–96.
11. Fedotov P.S., Rogova O.B., Dzhenloda R.Kh., Karandashchev V.K. Metal-organic complexes as a major sink for rare earth elements in soils // Environ. Chem. 2019. V. 16. № 5. P. 323–332.
12. Ran Y., Liu Z. The distribution of REEs in Chinese major types of soil // Acta Chin. Rare Earth Element. 1994. № 12 (4). P. 243–252.
13. Sahoo S.K., Yonehara H., Kurotari K., Shiraishi K., Ramzaev V., Barkovski A. Determination of rare earth elements, thorium and uranium by Inductively coupled plasma mass spectrometry and strontium isotopes by thermal ionization mass spectrometry in soil samples of Bryansk region contaminated due to Chernobyl accident // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2004. V. 247. № 2. P. 341–345.
14. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford, Melbourne: Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.
15. Переломов Л.В., Асаинова Ж.С., Йошида С., Иванов И.В. Содержание редкоземельных элементов в почвах Приокско-террасного биосферного заповедника // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1115–1126.
16. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1999. 610 с.
17. Tyler G., Olsson T. Conditions related to solubility of rare and minor elements in forest soils // J. Plant. Nutr. Soil Sci. 2002. V 165. P. 594–601.

## Distribution of Rare-Earth Elements in the Profile of Alluvial Meadow Soil in Kurkuty Bay oz. Baikal

O. V. Zarubina

*A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
ul. Favorskogo 1a, Irkutsk 664033, Russia  
E-mail: zarub@igc.irk.ru*

The results presented of the content of rare-earth elements in the profile of the alluvial meadow soil of the Kurkuty bay of the lake Baikal. The maximum content for light rare earth elements was revealed in the upper Ap horizon. The content of heavy rare earth elements along the profile of the sections distributes evenly and reaches its maximum value mainly in horizons A and B.

**Key words:** alluvial meadow soil, rare earth elements (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, and Lu), inductively coupled plasma mass spectrometry.