ISSN 0002-1881

Номер 3

Март 2023

АГРОХИМИЯ

www.sciencejournals.ru

300 лет Российская Академия Наук

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Фиксация калия и магния почвой агроценоза

В. Н. Якименко 3

Влияние бинарных сидеральных смесей с гречихой на активность целлюлозоразрушающих бактерий и качество пахотных черноземов

А. М. Гребенников 12

Сера в неорошаемых и орошаемых каштановых почвах и оценка применения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под картофель

М. Г. Меркушева, Л. Л. Убугунов, Л. Н. Болонева, И. Н. Лаврентьева 20

Удобрения

Эффективность применения различных систем удобрения на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в условиях Предуралья

М. Т. Васбиева, В. Р. Ямалтдинова 29

Влияние возрастающих уровней минерального питания на качество различных фракций зерна озимой ржи

А. В. Пасынков, Е. Н. Пасынкова 43

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

Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова 53

Регуляторы роста растений

Влияние состава питательной среды для культивирования бактерий и дозы препарата *Bacillus subtilis* 10-4 на ростовые показатели и продуктивность растений пшеницы

С. Р. Гарипова, Л. И. Пусенкова, О. В. Ласточкина, К. А. Федорова, М. А. Дедова, О. В. Маркова, В. Д. Матюнина, Р. А. Юлдашев 60

Пестициды

Эффективность гербицидов в борьбе с сорняками и их фитотоксичность для сахарной свеклы в зависимости от возраста обрабатываемых растений и нормы расхода препаратов

Е. А. Дворянкин 70

Влияние диоксида серы, входящего в состав летучих органических соединений грибов рода *Lecanicillium*, на фитофагов западного цветочного трипса и персиковую тлю

Г. В. Митина, Е. А. Степанычева, Ю. А. Титов, А. А. Чоглокова, М. А. Черепанова, А. Г. Кузьмин 82

Агроэкология

Валовое содержание и подвижные формы галогенов (фтора, брома и йода) в почвах Тывы

Г. А. Конарбаева, Е. Н. Смоленцева, В. В. Демин 87

Contents

No. 3, 2023

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Fixation of Potassium and Magnesium by the Soil of Agrocenoses

V. N. Yakimenko 3

Effect of Binary Sideral Mixtures with Buckwheat on the Activity of Cellulose-Destroying Bacteria and the Quality of Arable Chernozems

A. M. Grebennikov 12

Sulfur in Non-Irrigated and Irrigated Chestnut Soils and Evaluation of Application of Increasing Doses of Sulfur Fertilizers (with NPK) for Potatoes

M. G. Merkusheva, L. L. Ubugunov, L. N. Boloneva, I. N. Lavrentieva 20

Fertilizers

Efficiency of Application of Organic, Organo-Mineral and Mineral Fertilizer Systems on Sod-Podzolic Heavy Loamy Soil in Sis-Urals

M. T. Vasbieva, V. R. Yamaltdinova 29

Effect of Increasing Levels of Mineral Nutrition on the Quality of Various Fractions of Winter Rye Grain

A. V. Pasynkov, E. N. Pasynkova 43

Effect of Long-Term Use of Organic and Miineral Fertilizers on the Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soils and Productiviny of Annual Grasses in the Fodder Crop Rotation of the European North

N. T. Chebotarev, O. V. Brovarova 53

Plant Growth Regulators

Influence of Nutrient Medium Composition for Culturing Bacteria and the Dose of B. subtilis 10-4 Biologics on Growth Indicators and Productivity of Wheat Plants

S. R. Garipova, L. I. Pusenkova, O. V. Lastochkina, K. A. Fedorova, M. A. Dedova, O. V. Markova, R. A. Yuldashev 60

Pesticides

Effectiveness of Herbicides for Weed Control and Their Phytotoxicity for Sugar Beet depending on Age of the Treated Plants and Consumption Rates of Chemicals

E. A. Dvoryankin 70

Effect of Sulfur Dioxide as a Component of the Volatile Organic Compounds of Fungi of the Genus *Lecanicillium* on the Phytophagous Western Flower Thrips and Peach Aphid

G. V. Mitina, E. A. Stepanycheva, Yu. A. Titov, A. A. Choglokova, M. A. Cherepanova, A. G. Kuzmin 82

Agroecology

Gross Content and Mobile Forms of Halogens (Fluorine, Bromine and Iodine) in the Soils of Republic of Tyva

G. A. Konarbaeva, E. N. Smolentseva, V. V. Demin 87

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 3–11

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ
Плодородие почв

УДК 631.416.4:631.416.8:631.445

ФИКСАЦИЯ КАЛИЯ И МАГНИЯ ПОЧВОЙ АГРОЦЕНОЗА[§]

© 2023 г. В. Н. Якименко

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия
E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 07.11.2022 г.
После доработки 29.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

Установлено, что почва агроценоза с длительным дефицитным балансом калия и магния фиксировала 60–70% калия, внесенного с удобрением, и 20–30% магния. При положительном балансе этих элементов в агроценозе фиксация почвой калия снижалась до 40, а магния – до 6–10%. Внесение возрастающих доз калийного удобрения не отражалось на почвенном уровне содержания обменного магния, использование магниевых удобрений не изменяло содержание в почве обменного калия. Совместное использование умеренных доз калийных и магниевых удобрений способствовало снижению фиксации калия на 10–16% по сравнению с раздельным его внесением, интенсивность фиксации магния при этом не изменялась. При повышенных дозах калия его фиксация почвой не зависела от дополнительного внесения магния, а фиксация магния существенно снижалась.

Ключевые слова: агроценоз, почва, калий, магний, фиксация.
DOI: 10.31857/S0002188123030134, **EDN:** KOHSQV

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность минерального питания растений в агроценозах зависит не только от соотношения приходной и расходной статей баланса элементов-биофилов, но и во многом от интенсивности и направленности процессов трансформации почвенных форм этих элементов. Эти трансформации заключаются в возможности некоторых ионов, в т.ч. катионов калия и магния, занимать различные по прочности связи почвенные позиции и относятся к 2-м противоположно направленным, обратимым процессам – фиксации и мобилизации.

Под фиксацией почвой, например, калия или магния, обычно понимают переход катионов, находящихся в почвенном растворе или в обменной форме, в необменное, более прочно связанное с почвой состояние, в основе механизма данного процесса могут быть как явления физико-химического характера, так и изменения минералогического состава кристаллитов [1–5]. В ранее проведенных исследованиях показано, что фиксирующая способность почв в отношении калия зависит от их минералогического и гранулометрического состава, величины pH, содержания органического вещества, внесенной дозы удобрения, гидротермического режима и других факторов [6–11].

На эффективность минерального питания выращиваемых культур существенное влияние может оказывать характер взаимодействия вносимых элементов – антагонистический или синергетический, которое проявляется как в почвенных процессах адсорбции–десорбции, так и при поглощении ионов растениями [3, 12, 13]. Например, в ряде исследований отмечено антагонистическое в целом взаимодействие между одновалентными катионами H^+, NH_4^+, K^+ с одной стороны, и Ca^{2+}, Mg^{2+} с другой, при усвоении этих элементов растениями из почв и удобрений [14–17]. В то же время было показано, что в зависимости от абсолютного количества определенных ионов в почвенном растворе и их соотношения между ними могут возникать как явления антагонизма, так и синергизма [3, 12, 18, 19]. Кроме того, специфика взаимовлияния отдельных элементов может значительно изменяться в зависимости от действия различных факторов. Установлено, что на характер взаимодействия K и Mg при поглощении растениями, эффективность их использования существенное влияние оказывают условия внешней среды и биологические особенности отдельных культур [3, 12, 14–17, 20, 21].

[§]Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН.

В целом проведенный анализ литературных данных показал, что основное внимание в исследованиях было уделено эффективности питания культур калием и магнием и их взаимовлиянию при различных уровнях содержания этих элементов в почвах агроценозов. Взаимодействие калия и магния в почвенных процессах, в т.ч. адсорбции–десорбции, изучено в значительно меньшей степени, что обусловливает целесообразность и актуальность проведения дальнейших исследований по этой проблематике.

Цель работы – установить специфику фиксации калия и магния при раздельном и совместном их внесении в почвы агроценозов с различной обеспеченностью этими элементами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение фиксирующей способности почвы в отношении K и Mg проводили в лабораторном опыте при компостировании почвенных образцов с калийными и магниевыми удобрениями в режиме попеременного намачивания до наименьшей влагоемкости и высушивания при комнатной температуре: тем самым в определенной степени воспроизводили процесс, которому подвергается пахотный слой почв агороценозов в полевых условиях.

Почвенные образцы (слой 0–20 см) для компостирования были отобраны в различных вариантах длительного полевого и микрополевого опытов [19, 22], проводимых на серой лесной среднесуглинистой почве со следующими характеристиками: содержание физической глины – 31%, содержание гумуса – 4%, емкость катионного обмена – 21 мг-экв/100 г. Проведенный ранее [5] анализ минералогического состава почвы показал, что почвенная фракция физического песка состоит из кварца, полевого шпата и амфиболов, а фракция физической глины содержит (в убывающем порядке) гидрослюду мусковитового типа (иллит), хлорит, каолинит, вермикулит и дисперсный смектит.

В вариантах указанных полевых опытов при выращивании картофеля ежегодно применяли следующие дозы удобрений (кг/га): K1 – 100, K2 – 150, Mg1 – 50, Mg2 – 100. Варианты полевых опытов, в которых была отобрана почва для лабораторного эксперимента, дозы используемых в нем K и Mg, сроки компостирования указаны в таблицах. K и Mg в форме KCl и MgO вносили в почву в виде растворов. Сроки компостирования были приближены к продолжительности вегетационного периода. Дозы калия 5 и 10 мг/100 г почвы примерно соответствовали внесению 100 и 200 кг этого элемента/га пашни, а доза магния 2.5 мг – 50 кг/га, подобные дозы удобрений можно реально использовать в практическом земледелии при выращивании овощных и пропашных культур в интенсивных технологиях [5].

Повторность в опытах четырехкратная. Фиксированными считали калий и магний, не переходящие в вытяжку 1 М раствора CH_3COONH_4, в которой определяли почвенное содержание обменной формы этих элементов [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Калий. Основой классификации почвенных форм калия является прочность связи элемента с твердой фазой почвы, что выражается в степени проявления физико-химических процессов (адсорбции, десорбции, замещения в кристаллической решетке) и ассоциированности с носителем (преимущественно, минеральным) той или иной калийной фракции. Весь калийный пул почв подразделяется на формы: обменный K (в т.ч. K почвенного раствора), приуроченный к почвенному органо-минеральному поглощающему комплексу, необменный K, дислоцирующийся в межслоевом пространстве трехслойных глинистых минералов, K минерального скелета, включенный в кристаллическую решетку первичных минералов [2, 3, 5].

В процессе эволюционного формирования почвы в ней складывается определенное соотношение между формами калия (прежде всего, относительно подвижными – обменной и необменной). Основная регуляторная роль процессов трансформации калия в почвах состоит в обеспечении и сохранении естественных пропорций между формами элемента. В этой связи процесс фиксации калия заключается в перераспределении поступающего в почву элемента по фракциям его почвенных форм для оптимизации соотношения между ними [5].

В нашем исследовании основное количество внесенного с удобрениями калия было зафиксировано почвой в первые же сутки опыта (табл. 1), возможно, что процесс фиксации калия (перераспределения между его формами) завершился в ряде случаев уже в первые часы или даже минуты взаимодействия почвы с вновь поступившими катионами. В дальнейшем необменное поглощение калия почвой различных вариантов опыта проходило по-разному. В вариантах с относительно истощенным почвенным калийным фондом (NP и NPMg1) дополнительную адсорбцию калия отмечали (при различной интенсивности) на протяжении всего лабораторного опыта (180 сут), тогда как в вариантах с предшествующим положительным балансом калия (NPK1 и NPK1Mg1) этот процесс практически завершился в начале опыта (1–15 сут), вероятно в связи с заполненно-

стью необменных позиций. В некоторых случаях отмечена дополнительная фиксация собственно калия почвы (исходного), в вариантах без его внесения с удобрениями (особенно в почве вариантов NPK1 и NPK1Mg1). Это было связано, по-видимому, с качественными изменениями, произошедшими с минеральной основой почвы при длительном попеременном намачивании и высушивании (например, агрегация коллоидов и т.п.).

Фиксация калия почвами может происходить, главным образом, двумя способами: 1 – иллитизация части набухающей минеральной фазы и 2 – непосредственное вхождение катионов калия на имеющиеся свободные позиции в кристаллической решетке минералов иллитового типа [1–5]. Учитывая, что основным глинистым минералом исследованной серой лесной среднесуглинистой почвы является гидрослюда, второй путь кажется наиболее вероятным.

Следует сказать, что калий, внесенный с удобрениями в почву в нашем эксперименте, никогда не фиксировался полностью – независимо от степени истощенности почвы в отношении калия и величины внесенной его дозы. Поступивший в почву калий всегда распределялся по его почвенным формам в соотношении более или менее приближенном к естественному (целинному). Однако данный процесс характерен для недеградированных почв и для "нешоковых" доз удобрений [5]. Используемые нами дозы калия, даже самая высокая, были сопоставимы с количеством его обменной формы, и почва вполне могла перераспределить их в рамках существующих природных пропорций между почвенными фракциями элемента. В этой связи заметим, что нередко исследователи в опытах по изучению фиксирующих свойств почв вносят калий в количествах (150–200 мг/100 г), многократно превышающих и реальные дозы удобрений, и подвижный почвенный калийный фонд. Очевидно, что результаты таких опытов трудно сопоставлять и трактовать для практических целей.

Объем необменного поглощения внесенного калия определяется емкостью фиксации почвы, зависящей от содержания глинистой фракции и ее минералогического состава, а также насыщенности калием почвенного поглощающего комплекса [5]. Почвы, имеющие большую емкость фиксации, могут не поглощать калий из-за высокой насыщенности им, а почвы, бедные этим элементом, не фиксируют повышенные дозы из-за низкой емкости поглощения. В разных вариантах нашего лабораторного опыта использовали одну почву – серую лесную, поэтому различия между ними в фиксации калия могли быть обусловлены внесенными его дозами и имеющимся уровнем почвенного содержания подвижных форм (а также возможным влиянием сопутствующего катиона – Mg).

В опубликованных ранее работах [6–11] было показано влияние внесенных доз калия на процесс его фиксации почвами. В целом отмечено, что при внесении в почву возрастающих доз калия его количество, фиксируемое почвой, повышалось, а доля (от дозы) его фиксации – снижалась. Например, в опытах [24] количество калия, фиксируемого одной и той же почвой (черноземом выщелоченным), в зависимости от дозы внесенного калийного удобрения изменялось от 14 до 82%.

В нашем исследовании абсолютная величина калия, необменно поглощенного почвой, также закономерно возрастала при увеличении внесенной дозы (табл. 1). Например, в варианте NP при внесении в почву 5, 10 и 20 мг K/100 г было зафиксировано (перешло в необменную форму), соответственно, 3.4, 6.1 и 12.4 мг K, а в варианте NPK1 – 2.1, 4.1 и 9.0 мг. Однако доля фиксации калия удобрений (%) при этом практически не изменилась, составив в варианте NP 61–68% при разных дозах, а в варианте NPK1 – 41–45%. Таким образом, в варианте NP ≈35% внесенного калия (независимо от дозы) использовалось на пополнение почвенного содержания обменной формы элемента, а 65% – необменной, в варианте NPK1 – соответственно 55 и 45%. Это в очередной раз подтвердило регуляторную эффективность почвенных трансформационных процессов. Еще раз подчеркнем – речь идет о "нормальной" почве и адекватных дозах удобрений.

Фиксация (необменное поглощение) определенных количеств внесенного калия довольно точно подтверждается и прямым методом. Например, содержание необменного калия (вытяжка 1 M раствора HNO_3) в почве варианта NP до начала эксперимента составляло 126 мг/100 г, после внесения 20 мг K/100 г и компостирования в течение 180 сут оно возросло до 139 мг, увеличившись на 13 мг, т.е. соответствовало расчетной (по разности) величине фиксации калия удобрений. В варианте NPK1 в аналогичном случае содержание необменного калия изменилось от 136 до 145 мг/100 г почвы.

Интенсивность фиксации калия почвой существенно зависит от степени истощенности почвенного фонда подвижных калийных форм или, иными словами, степени заполненности специфических селективных для этого катиона позиций в минеральном комплексе. В нашем лабораторном эксперименте почва вариантов NP и NPMg1 с относительно истощенными калийными запасами фиксировала до 70% внесенного калия (табл. 1). В то же время почва вариантов NPK1 и NPK1Mg1, в которых в предшествующем поле-

Таблица 1. Изменение содержания обменного калия в почве (мг/100 г) вариантов полевого опыта при ее компостировании с удобрениями

Вариант	Внесено	Срок компостирования, сут					Фиксация K	
		1	15	30	90	180	мг	%
NP	H_2O	14.8	14.9	14.4	14.6	14.7	–	–
	5 мг K/100 г	18.0	17.1	17.2	17.0	16.3	3.4	68
	10 мг K/100 г	20.3	19.5	19.3	19.0	18.6	6.1	61
	20 мг K/100 г	22.8	22.0	21.3	21.8	22.3	12.4	62
	2.5 мг Mg/100 г	14.5	14.4	14.5	14.4	14.5	–	–
	5 мг Mg/100 г	14.4	14.8	14.6	14.5	14.6	–	–
	10 мг Mg/100 г	14.8	14.4	14.5	14.6	14.7	–	–
	5 мг K + 2.5 мг Mg	18.0	17.4	17.0	17.2	17.1	2.6	52
	10 мг K + 5 мг Mg	21.0	19.9	20.0	19.8	19.5	5.2	52
	20 мг K + 10 мг Mg	22.5	22.5	21.7	21.8	21.5	13.2	66
NPMg1	H_2O	14.0	14.0	13.8	13.7	13.6	–	–
	5 мг K/100 г	16.5	16.0	16.0	15.8	15.3	3.3	66
	10 мг K/100 г	19.3	19.0	18.0	17.8	17.3	6.3	63
	20 мг K/100 г	22.2	22.3	21.7	21.0	20.0	13.6	68
	2.5 мг Mg/100 г	14.0	14.1	13.8	13.9	14.0	–	–
	5 мг Mg/100 г	14.0	14.1	13.7	13.8	13.8	–	–
	10 мг Mg/100 г	14.0	14.1	13.8	13.8	13.8	–	–
	5 мг K + 2.5 мг Mg	17.0	16.1	16.1	16.0	15.6	3.0	60
	10 мг K + 5 мг Mg	19.5	19.0	18.0	18.0	17.6	6.0	60
	20 мг K + 10 мг Mg	22.5	22.0	21.0	20.5	20.0	13.6	68
NPK1	H_2O	18.0	18.1	18.2	17.1	16.6	–	–
	5 мг K/100 г	20.8	20.3	20.0	20.0	19.5	2.1	42
	10 мг K/100 г	24.3	24.0	23.8	23.2	22.5	4.1	41
	20 мг K/100 г	27.9	27.5	27.6	27.5	27.6	9.0	45
	2.5 мг Mg/100 г	18.1	18.3	18.2	17.3	16.6	–	–
	5 мг Mg/100 г	18.3	18.1	18.0	17.5	17.0	–	–
	10 мг Mg/100 г	18.5	18.8	18.7	18.0	17.1	–	–
	5 мг K + 2.5 мг Mg	21.3	21.2	20.4	20.2	20.0	1.6	32
	10 мг K + 5 мг Mg	23.9	23.5	23.8	23.6	23.5	3.1	31
	20 мг K + 10 мг Mg	27.9	27.3	27.6	27.5	27.8	8.8	44
NPK1Mg1	H_2O	18.3	18.0	17.7	17.0	16.6	–	–
	5 мг K/100 г	20.5	20.5	20.0	20.1	19.5	2.1	42
	10 мг K/100 г	23.5	23.3	23.0	23.0	22.6	4.0	40
	20 мг K/100 г	28.5	28.7	27.8	27.5	27.0	9.6	48
	2.5 мг Mg/100 г	18.1	18.0	18.0	17.0	16.3	–	–
	5 мг Mg/100 г	18.0	18.0	18.1	17.2	16.5	–	–
	10 мг Mg/100 г	18.1	18.0	18.0	17.3	16.1	–	–
	5 мг K + 2.5 мг Mg	21.2	21.2	21.0	20.5	19.8	1.8	36
	10 мг K + 5 мг Mg	23.9	23.3	23.6	23.5	23.6	3.0	30
	20 мг K + 10 мг Mg	28.0	27.7	27.5	27.6	27.6	9.0	45
	HCP_{05}	1.5	1.4	1.6	1.6	1.5		

Таблица 2. Изменение почвенного уровня содержания обменного калия и магния при внесении этих элементов в почву с повышенным их содержанием, мг/100 г почвы

Вариант	Внесено	Срок компостирования, сут					Зафиксировано	
		1	15	30	90	180	мг	%
Калий								
NPMg2	H_2O	13.8	14.2	14.3	14.0	13.8	–	–
	10 мг K/100 г	20.6	19.9	19.6	19.7	19.6	4.2	42
	10 мг K + 5 мг Mg	20.3	20.1	19.6	19.5	19.3	4.5	45
NPK2	H_2O	20.7	20.5	20.3	20.3	20.3	–	–
	10 мг K/100 г	26.8	26.6	26.5	26.5	26.3	4.0	40
	10 мг K + 5 мг Mg	26.6	26.8	26.0	26.2	26.0	4.3	43
NPK2Mg2	H_2O	20.8	20.3	20.6	20.5	20.6	–	–
	10 мг K/100 г	25.9	25.6	25.5	25.4	25.5	5.1	51
	10 мг K + 5 мг Mg	26.2	25.6	25.5	25.6	25.5	5.1	51
HCP_{05}		1.8	1.7	1.9	1.8	1.8	–	–
Магний								
NPK2	H_2O	7.5	7.2	7.2	7.2	7.2	–	–
	5 мг Mg/100 г	10.9	10.5	10.4	10.4	10.4	1.8	36
	10 мг K + 5 мг Mg	10.5	10.9	10.4	10.4	10.4	1.8	36
NPMg2	H_2O	19.8	19.5	19.8	19.7	19.8	–	–
	5 мг Mg/100 г	25.1	24.8	24.5	24.4	24.5	0.3	6
	10 мг K + 5 мг Mg	25.3	25.2	24.4	24.3	24.2	0.6	12
NPK2Mg2	H_2O	22.1	21.5	21.2	21.3	21.2	–	–
	5 мг Mg/100 г	25.5	25.0	24.7	24.6	24.7	1.5	30
	10 мг K + 5 мг Mg	25.2	25.2	24.9	24.8	24.9	1.3	26
HCP_{05}		1.1	1.4	2.0	1.6	1.5	–	–

вом опыте поддерживался бездефицитный калийный баланс, фиксировала только ≈40% от поступившего калия удобрений, вероятно, в связи с определенной насыщенностью этим катионом адсорбирующих позиций в почвенной матрице. Отметим, что почва варианта NPK2 (табл. 2), хотя и имела более высокое содержание калия по сравнению с вариантом NPK1, фиксировала примерно такое же его количество – ≈40%. Очевидно, присущая почве буферность по отношению к калию позволяла сохранять пропорции между калийными формами, как в случае его дополнительного поступления извне, так и выноса. Данные пропорции зависят от сочетания почвенных позиций с различной селективностью к калию и определяются качественным составом минеральной основы почв.

Магний. Формы магния в почве аналогичны калийным: он активный компонент катионообменного комплекса и почвенного раствора, входит в состав глинистых и первичных почвенных минералов. В отличие от калия, основным депо необменной формы которого является иллит (содержание K до 7%), магний дислоцируется главным образом в хлорите (до 23% Mg), вермикулите (12–17%) и смектите (до 6%) [3], все перечисленные минералы обладают трехслойной структурой, с некоторыми различиями по способности к набуханию. Учитывая близость природы носителей форм калия и магния в почвах, механизмы

почвенных процессов адсорбции–десорбции этих катионов принципиально не отличаются.

В нашем лабораторном эксперименте процесс фиксации магния почвой всех вариантов и при всех внесенных дозах практически завершился в первые же сутки (табл. 3), возможно это произошло уже на стадии перемешивания почвы с удобрениями. В дальнейшем на протяжении всего срока компостирования почвы (180 сут) содержание в ней обменного магния (а, следовательно, и дополнительная его фиксация) оставалось без изменений.

Дополнительная необменная адсорбция внесенного магния проявлялась в той или иной степени во всех вариантах опыта: полной его фиксации никогда не происходило, как и не наблюдалось отсутствия этого процесса. Исследованная серая лесная почва с ЕКО, равной 21 мг-экв/100 г, фиксировала 0.5–3.0 мг Mg/100 г в зависимости от дозы удобрения или 20–30% от внесенного количества, т.е. в 2–3 раза меньше, чем калия (табл. 1, 3). С увеличением внесенной дозы магния его количество, зафиксированное почвой, возрастало и в абсолютных (мг) и в относительных (%) показателях. Вероятно, при росте концентрации катионов магния в почвенном растворе возрастала и их возможность вытеснять другие катионы (например, Са) с экстенсивно обменных и необменных позиций в почвенной матрице. При невысоких концентрациях ионы Mg заполняли лишь небольшую часть потенциально доступных необменных (фиксирующих) позиций.

Почва полевых опытов, отобранная в вариантах NP и NPK1 с длительным дефицитным балансом магния, фиксировала такое же его количество (20–30%), как и почва вариантов NPMg1 и NPK1Mg1 с заметно более высоким содержанием обменного Mg и, следовательно, повышенной им обеспеченностью.

В то же время почва варианта NPMg2, в котором ранее применяли завышенные дозы магниевых удобрений, практически перестала фиксировать дополнительно внесенный Mg (лишь 6%) (табл. 2). Очевидно, что фиксирующая способность почвы, в т.ч. и в отношении Mg, не безмерна, по мере заполнения каким-либо ионом селективных почвенных позиций, интенсивность его фиксации ослабевала вплоть до полного прекращения.

Существенно меньшая фиксация почвой магния по сравнению с калием обусловлена, на наш взгляд, следующими обстоятельствами. Во-первых, вынос калия урожаем культур существенно больше, чем магния (у картофеля – в 20 раз [19]). Поэтому, если обеспечение растений калием осуществляется в значительной степени за счет запасов его необменной формы, заметно истощая этот фонд, то вынос магния может быть обеспечен и за счет его обменной формы, которая впоследствии и восполняется в первую очередь в случае дополнительного поступления магния извне. Отметим, что во всех вариантах опыта и при всех дозах (табл. 3), 70–80% внесенного магния расходовалось на пополнение почвенных запасов его обменной формы и соответственно 20–30% поглощалось необменно. Во-вторых, определенную роль сыграло, возможно, и относительно невысокое содержание в исследованной почве 2:1-глинистых минералов с расширяющимся типом решетки (монтмориллонит, вермикулит), обеспечивающих в основном необменное поглощение магния.

Взаимовлияние калия и магния при их фиксации почвой. В ранее проведенных исследованиях [19] показано индифферентное взаимовлияние раздельного внесения калия и магния на почвенное содержание их обменных форм, складывающийся в почве уровень обменного калия и магния зависел только от применения или неприменения соответствующих удобрений и их доз. При использовании магниевых удобрений характер его накопления в почве не изменялся в зависимости от имеющегося калийного фона, равно как и дополнительное внесение калия слабо влияло на почвенный уровень обменной формы магния. Стабильный уровень обменного калия или магния свидетельствовал, очевидно, и об отсутствии изменения уровня их необменных форм (т.е. дополнительной фиксации или десорбции). Однако при адсорбции почвой калия и магния из смешанных растворов их солей при совместном внесении они, вероятно, могли конкурировать между собой за специфические позиции в почвенной минеральной основе.

Отдельно отметим, что взаимовлияние K и Mg в почвенных процессах фиксации может в значительной степени проявляться в связи с качественными трансформациями калий- и магнийсодержащих минералов в почвах интенсивных агроценозов [2–5]. Например, в исследованиях [2] установлено прямое превращение биотита в вермикулит, когда биотит являлся источником калия для растений в течение нескольких сезонов, в наших опытах [5] также отмечена тенденция к снижению содержания гидрослюды и возрастанию содержания вермикулита в почве вариантов с сильнодефицитным калийным балансом. По мнению [25], в почве, по-видимому, существует вся серия постепенных переходов между иллитом, с одной стороны, и вермикулитом и монтмориллонитом (смектитом), с другой. Такой деградированный иллит обладает очень высокой способностью к фиксации как калия, так и магния. Для трансформации иллита в вермикулит необходим гидроксид

Таблица 3. Изменение содержания обменного магния в почве (мг/100 г) вариантов полевого опыта при ее компостировании с удобрениями

Вариант	Внесено	Срок компостирования, сут					Фиксация Mg	
		1	15	30	90	180	мг	%
NP	H_2O	7.2	7.3	7.2	7.3	7.3	–	–
	5 мг K/100 г	7.2	7.2	7.3	7.3	7.2	–	–
	10 мг K/100 г	7.1	7.1	7.3	7.2	7.2	–	–
	20 мг K/100 г	7.2	7.0	7.3	7.3	7.2	–	–
	2.5 мг Mg/100 г	9.3	9.3	9.2	9.3	9.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	11.3	11.2	11.1	11.2	11.2	1.1	22
	10 мг Mg/100 г	14.3	14.3	14.2	14.2	14.3	3.0	30
	5 мг K + 2.5 мг Mg	9.3	9.2	9.3	9.2	9.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	11.4	11.2	11.3	11.2	11.3	1.0	20
	20 мг K + 10 мг Mg	16.4	16.0	16.3	16.2	16.3	1.0	10
NPK1	H_2O	7.3	7.3	7.2	7.3	7.3	–	–
	5 мг K/100 г	7.3	7.3	7.3	7.2	7.3	–	–
	10 мг K/100 г	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	–	–
	20 мг K/100 г	7.3	7.3	7.3	7.2	7.3	–	–
	2.5 мг Mg/100 г	9.3	9.2	9.3	9.2	9.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	11.0	11.0	10.9	10.8	10.9	1.4	28
	10 мг Mg/100 г	14.4	14.3	14.2	14.3	14.3	3.0	30
	5 мг K + 2.5 мг Mg	9.4	9.2	9.3	9.2	9.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	11.9	11.9	11.8	11.5	11.3	1.0	20
	20 мг K + 10 мг Mg	16.5	16.3	16.3	16.2	16.3	1.0	10
NPMg1	H_2O	11.4	11.4	11.3	11.2	11.3	–	–
	5 мг K/100 г	11.3	11.2	11.3	11.2	11.2	–	–
	10 мг K/100 г	11.3	11.2	11.2	11.2	11.2	–	–
	20 мг K/100 г	11.4	11.3	11.2	11.3	11.3	–	–
	2.5 мг Mg/100 г	13.6	13.6	13.5	13.5	13.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	15.5	15.3	15.2	15.2	15.0	1.3	26
	10 мг Mg/100 г	18.8	18.8	18.7	18.6	18.6	2.7	27
	5 мг K + 2.5 мг Mg	13.5	13.4	13.3	13.3	13.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	15.5	15.4	15.3	15.3	15.2	1.1	22
	20 мг K + 10 мг Mg	18.9	18.8	18.7	18.6	18.6	2.7	27
NPK1Mg1	H_2O	15.4	15.3	15.2	15.2	15.3	–	–
	5 мг K/100 г	15.4	15.2	15.3	15.2	15.3	–	–
	10 мг K/100 г	15.3	15.3	15.3	15.3	15.2	–	–
	20 мг K/100 г	15.3	15.3	15.3	15.2	15.3	–	–
	2.5 мг Mg/100 г	17.8	17.5	17.5	17.5	17.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	19.2	19.1	19.0	19.0	18.9	1.4	28
	10 мг Mg/100 г	22.5	22.4	22.4	22.3	22.3	3.0	30
	5 мг K + 2.5 мг Mg	17.7	17.5	17.4	17.4	17.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	19.5	19.4	19.3	19.2	19.2	1.1	22
	20 мг K + 10 мг Mg	23.5	23.5	23.0	23.0	22.8	2.5	25
	HCP_{05}	1.1	1.3	1.2	1.2	1.3	–	–

магния (брусит), а обратный процесс – иллитизация – превращение смектитовых структур в гидрослюды требует значительного дополнительного количества калия.

В рассматриваемом лабораторном опыте при внесении невысоких и средних доз калия (5 и 10 мг/100 г) совместно с соответствующими дозами магния фиксация калия почвой снижалась во всех вариантах – на 3–16% (табл. 1), особенно заметно в варианте NP с относительно истощенным подвижным фондом и калия, и магния. В то же время при использовании высокой дозы (20 мг) калийного удобрения совместно с магниевым фиксация калия не изменилась по сравнению с отдельным его внесением. Очевидно, что при относительно невысоком содержании калия и магния в почвенном растворе эти катионы могли более или менее активно конкурировать друг с другом за специфические адсорбирующие позиции в краевых зонах межпакетных промежутков кристаллитов и межслоевом пространстве минералов. При повышении концентрации калия он препятствует необменному поглощению катионов магния на “своих” позициях, демонстрируя преимущество катионов калия при поглощении почвой. Вероятно, ионы калия в значительной мере блокируют вход других ионов в межслоевое пространство минералов с расширяющейся решеткой – основное депо необменных катионов. Это подтверждается и взаимовлиянием калия и магния при фиксации почвами с повышенным содержанием этих элементов (табл. 2): то количество необменных позиций, которое может занять калий в почве, он занимает независимо от совместного внесения или не внесения магния.

Фиксация магния почвой с истощенным его фондом (варианты NP и NPK) при невысоких и средних дозах внесенных удобрений не различалась в случаях раздельного внесения магния и совместного с калием (табл. 2, 3). Однако при совместном внесении магния с высокой дозой калия фиксация магния резко снижалась – в 2 раза, с 20 до 10%, т.е. катионы калия при высокой концентрации блокировали необменное поглощение ионов магния. В вариантах опыта NPMg и NPKMg с неистощенным фондом подвижного магния его фиксация при всех использованных дозах удобрений не зависела от дополнительного совместного внесения калия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование на серой лесной среднесуглинистой почве выявило закономерности фиксации калия и магния при их раздельном и совместном внесении в почву агроценоза, в различной степени истощенную в отношении этих элементов.

Показано, что внесенные с удобрениями K и Mg распределяются в почве по формам этих элементов с учетом предшествующей истощенности их почвенных запасов и с соблюдением определенных пропорций между формами. Значительный вынос почвенного K урожаем культур в вариантах полевого опыта с дефицитным его балансом осуществлялся в основном за счет запасов необменной формы элемента, поэтому внесенный с удобрениями K поглощался преимущественно необменно. Многократно меньший вынос Mg обеспечивался, по-видимому, за счет его обменной формы и соответственно поступающий Mg удобрений адсорбировался главным образом обменно.

Количество фиксируемого почвой K в несколько раз превышало фиксацию Mg при сопоставимых дозах внесенных калийных и магниевых удобрений. Почва варианта NP с длительным дефицитным балансом K и Mg фиксировала до 60–70% внесенного калия и 20–30% магния. При длительном положительном калийном балансе и повышенном его содержании в почве (варианты NPK и NPKMg) фиксация калия снижалась до 40% от внесенной дозы, в то время как фиксация магния почвой с высоким его содержанием и невысоким уровнем калия (вариант NPMg) практически прекращалась, составляя 6–10%.

Внесение в почву возрастающих доз калийных удобрений не отражалось на почвенном содержании обменного магния, равно как и внесение магния не изменяло имеющийся почвенный уровень содержания обменного калия.

Совместное внесение калийных и магниевых удобрений в невысоких дозах снижало фиксацию калия на 10–16% по сравнению с раздельным его внесением, независимо от имеющегося в почве уровня подвижных форм этих элементов. При внесении повышенных доз калия его фиксация почвой не изменялась при дополнительном использовании магниевых удобрений.

В почве с невысоким содержанием подвижного магния интенсивность его фиксации не изменялась при совместном внесении с умеренными дозами калийных удобрений, однако дополнительно внесенные высокие дозы калийных удобрений приводили к снижению фиксации магния в 2 раза. При неистощенном, повышенном почвенном фонде магния его фиксация почвой не зависела от дополнительно внесенного в сопоставимых дозах калия.

Специфику фиксации калия и магния почвой и их взаимовлияние в адсорбционных процессах целесообразно учитывать при оптимизации ка-

лийного и магниевого почвенного состояния и регулировании питательного режима этих элементов в агроценозах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горбунов Н.И.* Минералогия и физическая химия почв. М.: Наука, 1978. 293 с.
2. *Potassium* in agriculture. Madison. Wis.: Amer. Soc. Agronomy, 1985. 1223 p.
3. *Барбер С.А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
4. *Prokoshev V.V., Sokolova T.A.* Soil properties and potassium behaviour // Proc. 22-nd Coll. IPI. Soligorsk, USSR, 1990. P. 99–115.
5. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
6. *Забавская К.М.* Фиксация калия различными почвами, выделенными из них механическими фракциями // Агрохимия. 1974. № 7. С. 38–42.
7. *Медведева О.П.* Фиксация черноземом калия удобрений в необменной форме и его доступность растениям // Агрохимия. 1976. № 7. С. 51–58.
8. *Пивоварова Е.Г.* Калийное состояние почв и его моделирование в условиях Алтайского Приобья. Барнаул: Изд-во АлтайГАУ, 2005. 160 с.
9. *Шаймухаметов М.Ш., Петрофанов В.Л.* Влияние длительного применения удобрений на К-фиксирующую способность почв // Почвоведение. 2008. № 4. С. 494–506.
10. *Середина В.П.* Калий и почвообразование. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. 354 с.
11. *Нечаева Т.В., Добрянская С.Л.* Калийфиксирующая способность и состав обменных катионов постагрогенного чернозема // Плодородие. 2020. № 4. С. 24–27.
12. *Магницкий К.П.* Взаимосвязи в питании растений // Агрохимия. 1967. № 10. С. 32–46.
13. *Nemeth K., Mengel K., Grimme H.* The concentration of K, Ca and Mg in the saturation extracts in relation to exchangeable K, Ca and Mg // Soil Sci. 1970. V. 109. № 3. P. 179–185.
14. *Мазаева М.М.* Об обеднении дерново-подзолистой почвы магнием и возможности проявления необеспеченности им растений при длительном применении NPK-удобрений // Агрохимия. 1977. № 9. С. 97–101.
15. *Аристархов А.Н.* Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 524 с.
16. *Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленов Н.А.* Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
17. *Тихомирова В.Я.* Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // Агрохимия. 2011. № 5. С. 84–89.
18. *Yakimenko V., Naumova N.* Tuning potassium and magnesium fertilization of potato in the South of West Siberia // Agronomy. 2021. V. 11. № 9. Art. 1877.
19. *Якименко В.Н.* Взаимовлияние калия и магния при выращивании картофеля на серой лесной почве // Агрохимия. 2021. № 6. С. 8–15.
20. *Прокошев В.В., Неугодова О.В., Смирнов Ю.А., Государева З.И.* Магниевые удобрения в интенсивном земледелии. М.: ВНИИТЭИ-агропром, 1987. 52 с.
21. *Таврыкина О.М., Богдевич И.М., Путятин Ю.В.* Влияние возрастающих уровней обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием и удобрений на урожайность и качество зеленой массы кукурузы // Агрохимия. 2013. № 10. С. 39–45.
22. *Якименко В.Н.* Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 10. С. 16–24.
23. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
24. *Пчелкин В.У.* Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 336 с.
25. *Грим Р.* Минералогия и практическое использование глин. М.: Мир, 1967. 510 с.

Fixation of Potassium and Magnesium by the Soil of Agrocenoses

V. N. Yakimenko

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Division, Russian Academy of Science
prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia

E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

It was found that the soil of the agrocenosis with a long–term deficit balance of potassium and magnesium recorded 60–70% of potassium introduced with fertilizer and 20–30% of magnesium. With a positive balance of these elements in the agrocenosis, the fixation of potassium by the soil decreased to 40, and magnesium – to 6–10%. The introduction of increasing doses of potassium fertilizer did not affect the soil level of the content of exchangeable magnesium, the use of magnesium fertilizers did not change the content of exchangeable potassium in the soil. The combined use of moderate doses of potassium and magnesium fertilizers contributed to a decrease in potassium fixation by 10–16% compared with its separate application, while the intensity of magnesium fixation did not change. With increased doses of potassium, its fixation by the soil did not depend on the additional addition of magnesium, and magnesium fixation significantly decreased.

Key words: agrocenosis, soil, potassium, magnesium, fixation.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 12–19

Плодородие почв

УДК 631.584.5:631.46.61:631.452

ВЛИЯНИЕ БИНАРНЫХ СИДЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ГРЕЧИХОЙ НА АКТИВНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗОРАЗРУШАЮЩИХ БАКТЕРИЙ И КАЧЕСТВО ПАХОТНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ

© 2023 г. А. М. Гребенников

Федеральный исследовательский центр "Почвенный институт им. В.В. Докучаева"
109017 Москва, Пыжевский пер., 7, Россия
E-mail: gream1956@gmail.com

Поступила в редакцию 08.09.2022 г.
После доработки 15.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

Изучили использование сидеральных бинарных смесей 2-х сортов гречихи между собой, а также с соей и подсолнечником на активность целлюлозоразрушающих бактерий (ЦРБ) и содержание гумуса в пахотном и подпахотном горизонтах типичных тяжелосуглинистых черноземов. Показано, что применение для сидерации смешанных агросообществ по сравнению с чистыми посевами культур позволяет значительно увеличить численность агрономически ценной микрофлоры и содержание гумуса. Наиболее существенно возросла активность ЦРБ и увеличилось содержание гумуса как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах, а также произошло увеличение урожайности зерновых культур под влиянием агроценотического эффекта в посевах бинарных сидеральных смесей гречихи сорта Крылатая и гречихи сорта Деметра с подсолнечником. Между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур и активностью ЦРБ в почве как пахотного, так и подпахотного горизонтов были установлены связи, достоверные при 5%-ном уровне значимости. Зависимости между показателями урожая и содержанием гумуса в почвах оказались менее выражены и в большинстве случаев были недостоверными. Установленная между величинами активности ЦРБ и содержания гумуса тесная зависимость позволила заключить, что чем больше активность ЦРБ, тем выше качество исследованных почв.

Ключевые слова: бинарные сидеральные смеси, продуктивность сидератов, урожайность зерновых культур, агроценотический эффект, активность микроорганизмов, содержание гумуса, качество почв.

DOI: 10.31857/S0002188123030067, **EDN:** KNPHLA

ВВЕДЕНИЕ

Применение сидеральных удобрений является важным фактором экологически безопасного повышения плодородия и нормализации фитосанитарного состояния почв [1–5]. Использование сидератов может значительно улучшить состояние почв, подверженных деградации и агроистощению в результате длительного и нерационального использования в земледелии [6, 7]. Одним из факторов увеличения уровня плодородия и улучшения фитосанитарного состояния почв при использовании сидератов является активизация полезной микрофлоры в почвах. Высокая активность агрономически ценной микрофлоры, особенно целлюлозоразрушающих бактерий, может создать условия для значительного улучшения режима питания культурных растений, вытеснения фитопатогенной микрофлоры из почвы и ее очистку от токсичных веществ органического происхождения [8]. В литературе встречаются сведения о повышении активности микроорганизмов в почвах. Например, различные виды бобовых сидератов на дерново-подзолистых почвах Северо-Запада РФ стимулировали биологическую активность почвы в большей степени, чем минеральные азотсодержащие удобрения [9]. Запашка сидератов в полевых опытах [10] приводила к росту численности почвенных микроорганизмов (на 29–65%), особенно грибов и актиномицетов (в 1.2–2.6 раза). Поступление сидеральной массы в почву способствовало интенсивному развитию триходермы, что снижало интенсивность развития корневых гнилей на 5.9–8.2% и положительно повлияло на сохранность стеблестоя зерновых культур. Целлюлозолитическая активность почвы в вариантах с сидератами возросла с 16.8–17.2 до 23.2–41.5%. Использование сидератов приво-

дило к снижению потенциала инфекции и предохранению растений от поражения фитопатогенами. Заболеваемость корневой гнилью озимой ржи снизилась до 15, ячменя – до 20% [11]. Перспективной для использования в качестве сидерата является гречиха, формирующая к моменту цветения высокопродуктивную биомассу, содержащую в сбалансированных количествах большое количество элементов питания растений [12, 13].

Усилить позитивное воздействие сидератов на почву посредством увеличения их продуктивности возможно, если в качестве зеленого удобрения использовать не одну культуру, а смесь экологически и аллелопатически совместимых культур. При использовании для сидерации таких агросообществ в сравнении с чистыми посевами их компонентов часто отмечали более значительное улучшение всего комплекса свойств почв, в том числе и микробиологических, определяющих плодородие, а также фитосанитарное состояние культур, выращиваемых после заделки сидератов [14–16].

Почвенные микроорганизмы обладают мощным ферментативным аппаратом, выполняют многообразные функции в кругообороте всех биогенных элементов, участвуют в почвообразовании и поддержании почвенного плодородия. Поэтому биологическую активность почвы в этом случае следует рассматривать как одну из важнейших характеристик интенсивности микробиологических процессов.

Поскольку многими исследователями была отмечена прямая тесная взаимосвязь между интенсивностью биологических процессов и содержанием гумуса в почве [17], являющимся одним из важных показателей качества почв [18], усилению биологических процессов соответствует улучшение качества почв.

Учитывая возможное позитивное влияние сидератов, состоящих из смеси разных культур, на свойства почв, их качество и перспективность использования гречихи в качестве сидерата, представляет определенный интерес исследование сидеральных агросообществ, в состав которых наряду с гречихой входят и другие культуры. Цель работы – оценка влияния сидеральных агросообществ с участием гречихи на активность целлюлозоразрушающих бактерий (**ЦРБ**) и содержание гумуса в почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевом опыте исследовали влияние чистых посевов сидеральных культур и их бинарных смесей с гречихой на микробиологическую активность пахотного и подпахотного горизонтов типичных черноземов. Опыт включал варианты с чистыми посевами гречихи сорта Деметра, гречихи сорта Крылатая, сои сорта Октябрьская, подсолнечника сорта Енисей и бинарные смеси этих культур. Опыты проводили в трехкратной повторности на стационаре Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева (Курская обл.) в период с 2001 по 2005 г. Почвы опытного участка были представлены тяжелосуглинистыми мощными типичными черноземами.

На учетной площади каждой делянки, составлявшей 280 м^2 (5.6 × 50 м), сплошным методом определяли величину продуктивности сидеральных культур и урожайность озимой и яровой пшеницы, которые по годам исследования чередовались с посевами сидератов. Сидеральные культуры на каждой делянке скашивали, измельчали агрегатом КИР-1.5 Б и помещали в тележку, которую потом взвешивали, отбирали образец на определение влажности, затем привозили назад, высыпали сидеральную массу на ту же делянку и запахивали в почву. После установления влажности в отобранном образце продуктивность сидератов на каждой делянке пересчитывали в г сухого вещества/м^2. Уборку урожая зерновых проводили механизированным способом [19].

В пахотном (0–25 см) и подпахотном (25–40 см) горизонтах почв посезонно (весна, лето, осень) определяли содержание гумуса по Тюрину [20] и активность целлюлозоразрушающих бактерий (ЦРБ) – как долю (%) уменьшения массы бумажных фильтров, которые в капроновой оболочке на 2 мес. (с конца мая по конец июля) закладывали в почву на глубину пахотного и подпахотного горизонтов [21].

Для оценки влияния фактора смешивания посевов на изменение исследованных показателей применяли специально разработанный для этой цели метод построения вариантов сравнения [22], в соответствии с которым для исследованных показателей агросообществ по их величинам в чистых посевах рассчитывали варианты сравнения, которые отличались от показателей агросообществ лишь тем, что влияние фактора смешивания посевов было в них исключено. Для исследованных показателей вариант сравнения рассчитывали по следующей формуле:

$$Vs_i = P_i \times W_i / \mathrm{Sum}(W_i), \quad (1)$$

где Vs_i – вариант сравнения для i-той культуры, P_i – величина исследованного показателя в чистых посевах i-той культуры, W_i – доля i-той культуры в смешанном посеве, определенная как количество семян этой культуры, отнесенных к норме

Таблица 1. Продуктивность сидератов, урожайность последующих зерновых культур, активность ЦРБ и содержание гумуса в пахотном и подпахотном горизонтах

Сидераты	Продуктивность, г сухого вещества/м^2	Урожайность зерновых, ц/га	Активность ЦРБ		Содержание гумуса	
			%			
			Апах	Аподпах	Апах	Аподпах
Соя	410	32.7	11	15	0.30*	0.09
Подсолнечник	720	32.3	16	15	0.47*	0.13
Гречиха сорта Крылатая	520	32.8	13	13	0.26*	0.15*
Гречиха сорта Деметра	570	32.0	15	17	0.33*	0.22*
Гречиха сорта Крылатая + + гречиха сорта Деметра	538	31.8	14	15	0.53*	0.34*
Соя + гречиха сорта Крылатая	540	32.7	14	15	0.56*	0.09*
Соя + гречиха сорта Деметра	710	33.3	17	18	0.56*	0.19*
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	890	33.8	19	19	0.64*	0.32*
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	905	34.3	21	21	0.63*	0.35*

Примечания. 1. $НСР_{05}$ (продуктивность) = 67 г сухого вещества/м^2. 2. $НСР_{05}$ (урожайность зерновых) = 1.2 ц/га. 3. Активность ЦРБ определяли как долю уменьшения массы бумажных фильтров (%), которые в капроновой оболочке на 2 мес. (с конца мая по конец июля) закладывали в почву на глубину пахотного и подпахотного горизонтов.
*Отмечены значимые на 5%-ном уровне изменения содержания показателя. То же в табл. 3–5.

высева, соответствующей нормальным по плотности посевам:

$$W_i = (Q_i/N_i), \quad (2)$$

где Q_i – количество высеваемых семян i-й культуры (в чистых и смешанных посевах оно должно быть равным), N_i – норма высева этой культуры, Sum – указатель суммы. Если величина исследованного показателя имело начальную и конечную величину, как у всех показателей агрохимических свойств, определенных при закладке и окончании опыта, то P_i было равно разности между конечной и начальной величиной этого показателя. Влияние фактора смешивания на продуктивность агроценоза и свойства почв (агроценотического эффекта) определяли как разность между величинами исследованных показателей в смешанном агросообществе и в варианте сравнения.

Для статистических оценок использовали *t*-критерий Стьюдента для неравных дисперсий, критерий Фишера и непараметрический метод Краскела–Валлиса. Использование рассмотренных критериев позволило с позиций 3-х различных подходов оценить степень различия между сравниваемыми величинами. Считали, что различия между последовательностями исследованного свойства существуют, если это подтверждало применение не менее чем 2-х критериев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведены средние за годы проведения опытов величины продуктивности надземной фитомассы в чистых посевах сидератов и их бинарных смесях, величины урожайности зерновых культур и активности ЦРБ в пахотном и подпахотном горизонтах (табл. 1).

Наиболее высокие показатели продуктивности сидератов были получены в смешанных агросообществах, особенно в смесях подсолнечника с каждым из сортов гречихи. Из чистых посевов сидератов максимальной продуктивностью отличались варианты с подсолнечником. По продуктивности чистые посевы этой культуры значительно превосходили сортосмеси гречих и смеси сои с гречихой сорта Крылатая, примерно соответствовали продуктивности смеси соя + гречиха сорта Деметра, но при этом существенно уступали агросообществам подсолнечника с каждым из сортов гречихи.

В вариантах опыта с наиболее высокой продуктивностью сидератов была получена наиболее высокая урожайность зерновых культур. Максимальная урожайность, полученная после запашки сидератов на делянках с чистыми посевами, была достигнута в варианте с гречихой сорта Крылатая. Однако отличия величины этой уро-

Таблица 2. Величина агроценотического эффекта в вариантах с сидеральными агросообоествами и зерновыми культурами

Вариант с сидеральным сообществом	Сидеральные агросообщества			Зерновые культуры		
	*Р*а	*Р*вс	*АЭ*а	*У*а	*У*вс	*АЭ*у
Гречиха сорта Крылатая + гречиха сорта Деметра	538	545	–7	31.8	32.4	–0.6
Соя + гречиха сорта Крылатая	540	465	75	32.7	32.7	0.0
Соя + гречиха сорта Деметра	710	490	220	33.3	32.4	0.9
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	890	620	270	33.8	32.5	1.3
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	905	645	260	34.3	32.1	2.2

Примечание. *Р*а – продуктивность агросообществ, г сухого вещества/м^2, *Р*вс – продуктивность сидератов в вариантах сравнения, г сухого вещества/м^2, *АЭ*а – агроценотический эффект сидеральных агросообществ, г сухого вещества/м^2, *АЭ*у – агроценотические эффекты зерновых культур в вариантах с агросообществами, ц/га, *У*а – урожайность зерновых на делянках вариантов с агросообществами, ц/га, *У*вс – урожайность зерновых в вариантах сравнения, ц/га.

жайности как от соответствующих показателей в вариантах с чистыми, так и смешанными посевами сидератов, были несущественными.

Активность ЦРБ в пахотном горизонте в вариантах опыта примерно изменялась в соответствии с тенденциями к изменению продуктивности сидератов и урожайности зерновых культур. Наиболее высокой величиной разложения целлюлозы в пахотном горизонте (17–21%) характеризовались варианты смешанных агросообществ соя + гречиха сорта Деметра, подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра. Активность ЦРБ в пахотном слое под этими агросообществами была больше по сравнению с соответствующими показателями под чистыми посевами. Пахотный горизонт под остальными агросообществами характеризовался более низкими величинами активности ЦРБ, уступавшими по этому показателю половине вариантов с чистыми посевами сидератов.

Таким же образом в вариантах опыта изменялась активность ЦРБ в слое 25–40 см. Так же как и в пахотном горизонте, максимальными величинами активности ЦРБ в слое 25–40 см характеризовались делянки под агросообществами соя + + гречиха сорта Деметра, подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра. По активности ЦРБ в слое 25–40 см делянки под остальными агросообществами и чистыми посевами мало различались между собой и значительно уступали делянкам под агросообществами соя + гречиха сорта Деметра, подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра.

За 5-летний период проведения опытов в пахотном горизонте во всех вариантах опытов произошло статистически значимое увеличение содержания гумуса. Под вариантами с чистыми посевами количество гумуса возросло на 0.26–0.47%, под смешанными агроценозами–на 0.53–0.64%. Наиболее значительно обогатились органическим веществом пахотные горизонты на делянках с вариантами опыта подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра. Количество органического вещества в слое 0–25 см в этих вариантах возросло на 0.64 и 0.63%.

В подпахотном горизонте за время проведения опытов содержание гумуса возросло также во всех вариантах. Однако статистическая значимость этого факта была подтверждена только для 7-ми вариантов из 9-ти. При этом общий эффект увеличения содержания гумуса в подпахотном горизонте был достоверным во всех вариантах со смешанными агроценозами и в 2-х вариантах с чистыми посевами (гречиха сорта Крылатая, гречиха сорта Деметра). Наиболее высокими и достаточно близкими величинами роста содержания гумуса характеризовались агросообщества гречиха сорта Крылатая + гречиха сорта Деметра, подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра. Эти величины соответственно составили 0.34, 0.32 и 0.35%.

Агроценотические эффекты для продуктивности сидеральных агросообществ и урожайности зерновых культур определялись разностью между величинами этих показателей в вариантах с агросообществами и в вариантах сравнения (табл. 2). Варианты сравнения рассчитывали по формулам (1) и (2). Для расчета агроценотических эффектов использовали данные из табл. 1. Как следует из табл. 2, агроценотический эффект оказывал неодинаковое влияние на продуктивность сидеральных агросообществ, что приводило к существенному ее увеличению в агросообществах гречиха сорта Деметра + подсолнечник, гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и соя + гречиха сорта Деметра, менее выраженному возрастанию в агроценозе соя + гречиха сорта Крылатая и не-

Таблица 3. Влияние фактора смешивания на активность ЦРБ и содержание гумуса в пахотном и подпахотном горизонтах почв

Вариант с сидеральным агросообществом	Агроценотический эффект			
	Активность ЦРБ		Содержание гумуса	
	%			
	Апах	Аподпах	Апах	Аподпах
Гречиха сорта Крылатая + гречиха сорта Деметра	0	0	0.14*	0.11
Соя + гречиха сорта Крылатая	2	1	0.16*	0.12
Соя + гречиха сорта Деметра	3	2	0.20*	0.20*
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	4	5	0.23*	0.19*
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	5	5	0.14*	0.32*

значительному уменьшению в смеси разных сортов гречихи. В рамках аналогичной тенденции было отмечено влияние агроценотического эффекта на урожайность зерновых культур.

Таким же образом были рассчитаны агроценотические эффекты для активности ЦРБ и содержания гумуса в слоях 0–25 и 25–40 см (табл. 3). Влияние агроценотического эффекта привело к значимому увеличению содержания гумуса в пахотном горизонте под всеми агросообществами. Особенно заметным это было в пахотном горизонте под агроценозами подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и соя + гречиха сорта Деметра. Содержание органического вещества в слое 0–25 см под этими агросообществами в результате влияния агроценотического эффекта увеличилось на 0.23 и 0.20%. Для указанных агросообществ вклад агроценотического эффекта в общее увеличение содержания гумуса в пахотном горизонте соответственно составил 37 и 36%.

В слое 25–40 см влияние фактора смешивания привело к значимому повышению содержания гумуса под 3-мя из 5-ти агросообществ, содержание гумуса под которыми возросло на 0.19–0.32%. Максимальный вклад фактора смешивания в общее увеличение содержания гумуса был отмечен в подпахотном горизонте под агросообществом подсолнечник + гречиха сорта Деметра и составил 91%.

Согласно балансовым расчетам (Методические указания по определению баланса ..., 2000 г.), для повышения на 0.14–0.23% содержания органического вещества в пахотном горизонте тяжелосуглинистых черноземов необходимо внести подстилочный навоз в дозах 15.4–25.3 т/га. Увеличение содержания органического вещества в слое почвы 25–40 см на 0.19–0.32% могло произойти при поступлении в подпахотный горизонт количества органики, эквивалентного 13.7–23.0 т подстилочного навоза/га.

Влияние агроценотического эффекта привело к увеличению активности ЦРБ в пахотном горизонте под всеми агросообществами, за исключением смеси сортов гречих. На активность изученных бактерий в слое 0–25 см под сортосмесью фактор смешивания не оказал никакого влияния. Наиболее выраженным влияние агроценотического эффекта было в пахотном слое под агросообществами подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и соя + гречиха сорта Деметра, в которых под влиянием фактора смешивания разложение бумажных фильтров соответственно увеличилось на 4 и 5% от их исходной массы. Для этих агросообществ вклад агроценотического эффекта в общее увеличение активности ЦРБ в пахотном горизонте соответственно составил 21 и 24%.

Влияние агроценотического эффекта на изменение активности ЦРБ в подпахотном горизонте под агросообществами было аналогично изменениям в слое 0–25 см. Фактор смешивания оказал наиболее существенное влияние на активность ЦРБ в слое 25–40 см под агросообществами подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и соя + гречиха сорта Деметра. Вклад агроценотического эффекта в величину активности ЦРБ в подпахотном горизонте под этими агросообществами соответственно составил 26 и 24%. Увеличение активности ЦРБ в подпахотном горизонте под агросообществами соя + гречиха сорта Крылатая и соя + гречиха сорта Деметра, обусловленное фактором смешивания, было менее выраженным и характеризовалось меньшей величиной вклада этого фактора в разрушение целлюлозы, соответственно составлявшей 7 и 11%. Так же как в пахотном горизонте, агроценотический эффект не оказал никакого влияния на активность ЦРБ в

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур, активностью ЦРБ и содержанием гумуса ($R_{крит}$ = 0.67)

Показатель	Урожайность зерновых, ц/га	Активность ЦРБ		Содержание гумуса	
		%			
		Апах	Аподпах	Апах	Аподпах
Продуктивность сидератов, г сухого вещества/м^2	0.75*	0.98*	0.82*	0.76*	0.62
Урожайность зерновых, ц/га		0.68*	0.74*	0.54	0.34

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между агроценотическими эффектами показателей урожайности, активностью ЦРБ и содержанием гумуса ($R_{крит}$ = 0.88)

Показатель	Урожайность зерновых, ц/га	Активность ЦРБ		Содержание гумуса	
		%			
		Апах	Аподпах	Апах	Аподпах
Продуктивность сидератов, г сухого вещества/м^2	0.93*	0.94*	0.27	0.57	0.76
Урожайность зерновых, ц/га		0.98*	0.41	0.24	0.87

слое 25–40 см под агроценозом гречиха сорта Крылатая + гречиха сорта Деметра.

Для оценки связи между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур с активностью ЦРБ и содержанием гумуса, а также для степени зависимости между агроценотическими эффектами этих показателей были рассчитаны коэффициенты корреляции (табл. 4, 5).

Продуктивность сидератов в опыте была достоверно связана с урожайностью последующих зерновых культур и активностью ЦРБ в обоих горизонтах. При этом продуктивность сидератов образовывала более тесную связь с активностью ЦРБ в пахотном горизонте по сравнению с величинами этого показателя в слое 25–40 см. Урожайность зерновых культур по сравнению с продуктивностью сидератов образовывала менее тесные связи с активностью ЦРБ в почвах, и величина коэффициента корреляции урожайности зерновых культур с активностью ЦРБ в подпахотном горизонте была несколько больше по отношению к соответствующему показателю для слоя 0–25 см.

Содержание гумуса в пахотном горизонте образовывало значимую связь с продуктивностью сидератов. В остальных вариантах связь показателей урожайности с содержанием гумуса не была достоверной.

Такие особенности зависимости активности ЦРБ от продуктивности сидератов и урожайности зерновых культур, по-видимому, можно объяснить тем, что если в первый год поступление сидератов в почву явилось непосредственной причиной возрастания активности ЦРБ, то во второй год на урожайность зерновых культур повлияла активность этих бактерий в почвах, являющаяся следствием последействия запашки сидератов. Поэтому связь между продуктивностью сидератов и активностью ЦРБ была более выраженной по сравнению с зависимостью урожайности зерновых культур от активности этих бактерий. К тому же зависимость урожая зерновых культур не полностью зависела от продуктивности сидератов, т.к. коэффициент корреляции между этими показателями составлял 0.75, из чего следовало, что урожайность зерновых линейным образом была связана с продуктивностью сидератов на 56.3% ($0.75^2 \times 100\%$).

Примерно такие же тенденции обнаружены при рассмотрении характера зависимости показателей урожайности с содержанием гумуса, хотя эти зависимости были менее тесными по сравнению со связями между активностью ЦРБ и показателями урожайности. Следует также отметить, что как в слое 0–25, так и 25–40 см между активностью ЦРБ и содержанием гумуса были установлены достоверные зависимости, которые характеризовались коэффициентами корреляции, соответственно равными 0.77 и 0.69.

Величины агроценотических эффектов продуктивности сидеральных агросообществ и урожайностей зерновых культур были тесно связаны

между собой, о чем свидетельствовала значимая на 5%-ном уровне величина коэффициента корреляции между этими показателями (табл. 5). Величины агроценотических эффектов сидеральных агросообществ и урожайностей зерновых культур были достоверно связаны с активностью ЦРБ в пахотном горизонте, тогда как зависимости этих показателей от активности ЦРБ в слое 25–40 см были недостоверными. Корреляционные связи между агроценотическими эффектами показателей урожая и содержания гумуса во всех случаях не были значимыми.

Величина коэффициента корреляции между агроценотическими эффектами активности ЦРБ и содержания гумуса в пахотном горизонте была недостоверной (0.44), а в слое 25–40 см – значимой (0.91).

Учитывая значимость прямой связи между величинами активности ЦРБ и содержания гумуса как в слое 0–25, так и 25–40 см, а также достоверность зависимости между агроценотическими эффектами этих свойств в подпахотном горизонте можно заключить, что эти свойства достаточно сильно связаны между собой и следует ожидать, что наиболее высокой активности ЦРБ будет соответствовать наиболее высокое содержание гумуса. Таким образом, чем больше активность ЦРБ, тем выше качество исследованных почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было показано, что применение для сидерации смешанных агросообществ по сравнению с чистыми посевами культур позволяет значительно увеличить численность агрономически ценной микрофлоры и содержание гумуса в почве.

В проведенном опыте уровень активности целлюлозоразлагающих бактерий (ЦРБ) и содержания гумуса зависел от состава использованных сидеральных агросообществ, что определялось направленностью и величиной влияния агроценотического эффекта на их продуктивность.

Влияние агроценотического эффекта в разных сидеральных агросообществах на урожайность последующей зерновой культуры, активность ЦРБ и содержание гумуса проявлялось неодинаковым образом. Наиболее существенно возросла активность ЦРБ и увеличилось содержание гумуса как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах, а также произошло увеличение урожайности зерновых культур под влиянием агроценотического эффекта в бинарных сидеральных смесях гречихи сорта Крылатая и гречихи сорта Деметра с подсолнечником.

Между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур и активностью ЦРБ в почве как пахотного, так и подпахотного горизонтов были установлены связи, достоверные на 5%-ном уровне значимости. Зависимости между показателями урожайности и содержанием гумуса в почвах оказались менее выражены и в большинстве случаев были недостоверными. Было также показано, что агроценотические эффекты продуктивности сидеральных агросообществ и урожайности зерновых культур оказались тесным образом связаны как между собой, так и с влиянием фактора смешивания на активность ЦРБ в пахотном горизонте. При этом в остальных случаях агроценотические эффекты продуктивности сидеральных агросообществ и урожайности зерновых культур не образовывали достоверных связей с агроценотическими эффектами активности ЦРБ и содержания гумуса в почве.

Установленная между величинами активности ЦРБ и содержания гумуса тесная зависимость позволила заключить, что чем больше активность ЦРБ, тем выше качество исследованных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лошаков В.Г., Иванов Ю.Д., Николаев В.А.* Плодородие дерново-подзолистых почв и продуктивность зерновых севооборотов при длительном использовании пожнивной сидерации // Изв. ТСХА. 2004. № 3. С. 3–14.
2. *Гребенников А.М.* Влияние смешивания посевов на микробиологическую активность почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Вып. 61. М., 2008. С. 75–82.
3. *Кузнецова О.Ю., Гребенников А.М.* Рекультивация земель и улучшение качества ее проектирования // Землеустр-во, кадастр и мониторинг земель. № 1. 2009. С. 42–45.
4. *Гребенников А.М.* Использование сидерации смешанными агросообществами для повышения плодородия типичных черноземов // Плодородие. 2011. № 2. С. 30–32.
5. *Гребенников А.М.* Фитосанитарный аспект повышения плодородия черноземов сидеральными смесями // Земледелие. № 3. 2011. С. 24–26.
6. *Лебедева И.И., Королева И.Е., Гребенников А.М.* Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Вып. 71. М., 2013. С. 16–26.
7. *Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А.* Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Вып. 83. М., 2016. С. 77–102.
8. *Бабьева И.П., Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М.* Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 445 с.

9. *Паринкина О.М., Клюева Н.В., Петрова Л.Г.* Биологическая активность и эффективное плодородие почв // Почвоведение. 1993. № 9. С. 76–81.

10. *Постников П.А., Колобков Е.В.* Воздействие зеленых удобрений на микробиологическую активность почвы и урожайность зерновых культур // Использование органических удобрений и биоресурсов в современном земледелии. Владимир, 2002. С. 340–342.

11. *Никонорова А.К.* Механизм влияния сидеральных культур на развитие и споруляцию гриба *Helminthosporium sativum* // Микол. и фитопатол. 2000. Т. 34. Вып. 1. С. 48–51.

12. *Березин А.М., Чупрова В.В., Волошин Е.И.* Влияние сидератов на плодородие чернозема выщелоченного и урожайность зерновых культур в условиях Красноярской лесостепи // Агрохимия. 1994. № 11. С. 16–24.

13. *Гребенников А.М.* Обеспеченность культур элементами минерального питания в смешанных посевах // Агрохимия. 2004. № 5. С. 26–35.

14. *Гребенников А.М.* Влияние смешивания посевов на вынос элементов минерального питания надземной массой растений в сидеральных сообществах // Агрохимия. 2005. № 6. С. 26–35.

15. *Гребенников А.М.* Содержание подвижного фосфора и обменного калия в типичных черноземах ЦЧО под смешанными посевами // Агрохимия. 2009. № 5. С. 13–21.

16. *Гребенников А.М.* Методические аспекты оценки агроценотического эффекта в сидеральных агросообществах для воспроизводства плодородия типичных черноземов ЦЧЗ // Землеустр-во, кадастр и мониторинг земель. 2010. № 9. С. 79–89.

17. *Валько В.П., Щур А.В.* Особенности биотехнологического земледелия. Минск: БГАТУ, 2011. 196 с.

18. *Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К.* Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Верс. 1.0 Коллектив. монография. Иваново: ПресСто, 2021. 260 с.
https://doi.org/0.51961/9785604637401

19. *Гребенников А.М.* Воспроизводство почвенного плодородия. Сидерация черноземов смешанными агросообществами. Saarbrucken: Palmarium academic publishing, 2012. 396 p.

20. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.

21. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

22. *Гребенников А.М.* Оценка взаимовлияния культур в смешанных посевах // Агрохимия. 2003. № 1. С. 68–73.

Effect of Binary Sideral Mixtures with Buckwheat on the Activity of Cellulose-Destroying Bacteria and the Quality of Arable Chernozems

A. M. Grebennikov

Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Institute"
Pyzhevsky per. 7, Moscow 109017, Russia

E-mail: gream1956@gmail.com

It was studied the use of sideral binary mixtures of 2 varieties of buckwheat among themselves, as well as with soy and sunflower on the activity of cellulose-destroying bacteria (CDB) and humus content in the arable and sub-arable horizons of typical heavy loamy chernozems. It is shown that the use of mixed agricultural communities for sideration in comparison with pure crops can significantly increase the number of agronomically valuable microflora and humus content. The activity of CDB has increased most significantly and the humus content has increased both in arable and sub-arable horizons, and there has also been an increase in the yield of grain crops under the influence of the agrocenotic effect in the crops of binary sideral mixtures of buckwheat of the Winged variety and buckwheat of the Demeter variety with sunflower. Relationships were established between the productivity of siderates, the yield of grain crops and the activity of CDB in the soil of both arable and sub-arable horizons, reliable at a 5% significance level. The dependences between the yield indicators and the humus content in the soils were less pronounced and in most cases were unreliable. The close relationship established between the values of CDB activity and humus content allowed us to conclude that the greater the CDB activity, the higher the quality of the studied soils.

Key words: binary sideral mixtures, siderate productivity, grain yield, agrocenotic effect, microbial activity, humus content, soil quality.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 20–28

Плодородие почв

УДК 631.416:631.828.2:631.67:635.21

СЕРА В НЕОРОШАЕМЫХ И ОРОШАЕМЫХ КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ И ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ СЕРНЫХ УДОБРЕНИЙ (НА ФОНЕ NPK) ПОД КАРТОФЕЛЬ[§]

© 2023 г. М. Г. Меркушева[1,*], Л. Л. Убугунов[1], Л. Н. Болонева[1], И. Н. Лаврентьева[1]

[1]Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

*****E-mail: merkusheva48@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.11.2022 г.
После доработки 07.12.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

Установлено, что в связи с низким содержанием гумуса и малой биологической активностью целинных каштановых почв Западного Забайкалья валовое количество серы невысокое. Распределение серы по профилю – постепенно убывающее с некоторой аккумуляцией ее в карбонатном горизонте. Длительное орошение из-за увеличения содержания гумуса и биологической активности способствовало повышению количества серы, практически нарастающего с глубиной профиля. При орошении в слое 0–20 см запас подвижных сульфатов был больше в 3 раза, чем на целине (7.3 и 2.4 кг/га соответственно); в слое 0–50 см – в 1.3 раза, в слое 0–100 см – в 2.9 раза. По содержанию и запасам подвижной серы каштановые почвы в слое 0–20 см отнесены к низкообеспеченным. После 3-х лет применения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемый картофель содержание всех форм серы в почве повысилось в зависимости от размера дозы. Выявлена следующая закономерность: с увеличением дозы возрастали количество $S_{орг}$ в почве и обогащенность ею гумуса, сужалось соотношение C : $S_{орг}$. Установлен отрицательный баланс серы в контроле и в фоновом варианте. Внесение наименьшей дозы S15 уже сформировало положительный баланс, но учитывая, что каштановые почвы обеднены подвижной серой, необходимо применение дозы S30 (на фоне NPK) с соблюдением норм полива.

Ключевые слова: каштановые почвы, орошение, сера, миграция, удобрение, картофель, формы и баланс серы

DOI: 10.31857/S0002188123030080, **EDN:** KNZXKJ

ВВЕДЕНИЕ

Поступление серы в почву происходит из 3-х основных источников: выветривание минералов, атмосферное осаждение и разложение органических веществ (растительных остатков и гумуса) [1, 2]. В почве сера находится в 2-х формах – органической и неорганической. Бóльшая часть серы в почве состоит из органических фракций (до 98%). Органическую серу можно разделить на восстановленную, серу эфиров серной кислоты, а также связанную с углеродом и не идентифицированные органические соединения. Часть органической серы в виде серосодержащих аминокислот входит в состав гуминовых веществ. Массовая доля аминокислот в гуминовых веществах составляет 6–10% [3].

Соотношения C : N : P или C : N : S связаны не только со структурой растительных и микробных сообществ, но и с экофизиологическими факторами в соответствующих экосистемах [4, 5]. Установлено, что $S_{орг}$ входит в состав органического вещества почв со средним соотношением C : N : S равным примерно 130 : 10 : 1.3 [6]. Содержание серы в фульвокислотах и гуминовых кислотах в сумме составляет ~1/2 общего ее количества в слое 0–20 см [7]. В гумусе пропорции соотношения N : S равны (8–12) : 1 [3]. Минерализация $S_{орг}$ осуществляется биологическим и биохимическим путем и наиболее интенсивно проходит при оптимальной для микроорганизмов влажности и температуре, скорость ее зависит от реакции и характера использования почв и примерно такая же, как и общая минерализация органического вещества почвы [3]. В то же время согласно концепции [8], минерализация $S_{орг}$ может проходить

[§]Работа выполнена по теме НИР (Госзадание 121030100228-4, 121030900138-8).

независимо от минерализации углерода, азота и фосфора.

Неорганическая сера в почве представлена сульфатами почвенного раствора, адсорбированными сульфатами и серой минералов. При выветривании серосодержащих минералов в почву поступают сульфаты и сульфиды. Наиболее доступная растениям сульфатная форма составляет 10–25% от общего содержания серы [9]. Почвенный сульфат может происходить из атмосферного осаждения, добавления удобрений или минерализации почвенной органической серы [10, 11]. Основная часть сульфатов, поступивших на поверхность почвы, в течение года способна оставаться в исходной форме, что свидетельствует о сорбционном механизме удержания серы в верхнем профиле почвы [12].

Скорость круговорота серы зависит от микробного сообщества и его метаболической активности [13], при котором происходят основные преобразования: иммобилизация, мобилизация и минерализация. Иммобилизация или ассимиляция S в микробных клетках полностью зависит от микробной популяции. Однако короткие жизненные циклы микроорганизмов приводят к быстрому обороту и рециркуляции S в почве. Сама микробная биомасса является наиболее активной и легкодоступной формой почвенной органической серы. Иммобилизация происходит в органических и минеральных слоях почвы, и иммобилизованная сера обычно включается в органическое вещество посредством ковалентной связи. Сульфат, добавленный в почву, быстро адсорбируется или трансформируется в низкомолекулярные органические соединения S, особенно в сложные эфиры, такие как фульвовая кислота, что приводит к удержанию его в почве. Органическая сера имеет положительную связь почти со всеми фракциями серы, за исключением адсорбированной и доступной S [14]. Мобилизация контролирует минерализацию S после того, как растворимая органическая S преобразуется в неорганическую. Доступность серы зависит от сочетания многих физико-химических свойств почвы и динамики ее почвенных форм [15]. Установлена линейная корреляция между содержанием доступной серы и карбонатами в почвах [16].

Современные химические и спектроскопические исследования [13] показали, что в сельскохозяйственных почвах большая часть почвенной серы (>95%) присутствует в виде сульфатных эфиров или серы с углеродной связью (сульфонаты или серусодержащие аминокислоты), которые могут являться биодоступными для растений, вероятно, из-за взаимного превращения углеродносвязанной серы и сульфатного эфира серы в неорганический сульфат почвенными микробами. В дополнение к этой минерализации связанных форм серы почвенные микробы также ответственны за быструю иммобилизацию сульфата, сначала сульфатных эфиров, а затем связанной с углеродом серы.

В естественных условиях пополнение запасов серы в почвах происходит очень медленно, особенно в аридных условиях с дефицитом влаги. Однако применение серных удобрений (на фоне NPK) может повышать скорость образования органической серы, что связано с увеличением накопления серных соединений в корневой фитомассе, а также с возрастанием их содержания в микробной биомассе [17–20]. Содержание серы в микробной биомассе разных типов почв Забайкалья также характеризовалось зависимостью от этих факторов и варьировало от 0.7 до 3.6 г/м^2 [21].

При оценке способности почв обеспечивать растения серным питанием пользуются понятием “критический уровень”, обозначающим такое количество серы в почве, ниже которого снижается продуктивность растений из-за ее дефицита. Например, пороговая концентрация сульфатной серы в почвах составляет для злаков 0.8 мг/100 г и для люцерны – 1.2 мг/100 г почвы [22]. В настоящее время в России пахотные почвы недостаточно обеспечены подвижными формами серы [23]. Ее содержание в почвах близко к критическому уровню – 6.3–6.4 мг/кг, а в целом ряде регионов – 1.5–2.0 мг/кг.

Для почвенно-климатических условий сухостепной зоны Западного Забайкалья сера в системе почва–растение изучена фрагментарно. Определен аминокислотный состав растительных остатков, поступающих в каштановые почвы, а также содержание и распределение свободных аминокислот в неорошаемых и орошаемых каштановых почвах Забайкалья, в т.ч. метионина [24]. Изучены содержание и фракционный состав серы, ее запасы и распределение в основных типах аллювиальных почв бассейна р. Селенги на территории Монголии, дана агрохимическая оценка ресурсов серы и эффективность серных удобрений на пойменных лугах [25].

Дефицит серы в почвах или недостаточное применение серосодержащих удобрений под картофель являются одними из основных причин его вырождения. Механизм повышения урожая клубней и их качества состоит в том, что этот элемент способствует лучшему поступлению из почвы и удобрений N, P, K и других элементов [26]. Такие исследования для картофеля в условиях Западного Забайкалья отсутствуют. Поэтому цель работы – изучение влияния орошения и возрастающих доз серных удобрений под орошаемый картофель на содержание, распределение и запасы серы в каштановых почвах, а также на ее фракционный состав.

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 [27]. Установлено, что длительное орошение вызвало некоторое перераспределение гранулометрических фракций, снижение содержания обменных катионов и увеличение количества карбонатов, гумуса и азота. Каштановая почва опытного участка слабо обеспечена подвижной формой азота, калия, серы 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^2, повторность четырехкратная.

Посадку картофеля производили во 2-й половине мая по схеме 27×70 см, уборку осуществляли в конце 1-й–начале 2-й декады сентября. Макроудобрения вносили ежегодно: азотные – в виде аммиачной селитры, фосфорные – двойного суперфосфата, калийные – хлористого калия 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 вносили одноразово в расчете на 3 года. Орошение проводили поливной нормой 300 м^3/га 5–7 раз за вегетационный период в зависимости от погодных условий сезона.

Влияние норм полива на устойчивость орошаемых почв Забайкалья к вымыванию питательных веществ из удобрений ограничено единичными исследованиями [28]. В этой связи нами были проведены модельные опыты в полевых условиях. Испытывали 2 уровня минеральных удобрений: средний – N120P60K120S30 и высокий – N240P120K240S60 при норме полива 350 и 700 м^3/га на каштановой супесчаной почве с большим коэффициентом фильтрации (2.6 м/сут). Определение фракционного состава серы осуществляли по методике Айдиняна [29] в слое 0–20 см каштановой почвы в четырехкратной повторности после 3-х лет внесения возрастающих доз серных удобрений. Содержание валовой (общей) серы определяли весовым методом после разложения почвы смесью кислот. Подвижная сера, вытесняемая 0.2 M KCl, является наиболее легкоусвояемой растениями формой. Именно ее содержание используется агрохимслужбой нашей страны для диагностики потребности растений в серных удобрениях. Минеральная форма (экстрагент – 0.2 M HCl) характеризует содержание в почвах всей минеральной серы, включая подвижную. Резервная форма показывает количество элемента, находящегося в органической части почвы, и обычно определяется по разности между валовым содержанием и минеральной формой.

Полученные данные статистически обработаны в среде электронной таблицы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое (общее) количество серы в каштановых супесчаных почвах невысокое, что связано с малой концентрацией органических веществ (1.5–2% гумуса). Распределение серы по профилю – постепенно убывающее на целине (рис. 1а) 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 [22], каштановые почвы в слое 0–20 см отнесены к низкообеспеченным, хотя при орошении в нижележащих слоях этот показатель возрастает до среднего и высокого уровня (рис. 1б).

Интенсивность биологических и биохимических процессов в каштановых почвах лимитируется их низкой влагообеспеченностью. Орошение супесчаных каштановых почв в течение длительного времени способствовало изменению запасов $S_{общ}$ по сравнению с целиной за счет усиления микробиологической активности (рис. 2а), особенно это было выражено в карбонатных горизонтах. Например, запасы серы в орошаемой почве в карбонатных слоях 40–60 и 60–80 см превышали ее запасы в 1.9 и 1.7 раза в соответствующих слоях целины. В нижележащих горизонтах орошаемой почвы отмечено возрастание содержания серы и особенно существенно с увеличением глубины горизонта. Запасы $S_{общ}$ в каштановых почвах составили (кг/га): целина: в слое 0–20 см – 660, 0–50 см – 1550, 0–100 см – 2800; орошаемая пашня: соответственно 600, 1780, 2760.

Из-за высокой миграционной способности подвижные сульфаты могут вымываться при орошении почв, особенно в отсутствии растительного покрова, что влияет на величину их запасов. В то же время орошение, повышая микробиологическую активность, может способствовать аккумуляции серы в микробобиомассе и корневых остатках. Например, при орошении в слое 0–20 см запас подвижных сульфатов был больше в 3 раза, чем на целине (7.3 и 2.4 кг/га соответственно); в слое 0–50 см – в 1.3 раза, в слое 0–100 см – в 2.9 раза (рис. 2б). Такое превышение связано с наличием карбонатного горизонта с глубины 40 см и до конца профиля, который является био-

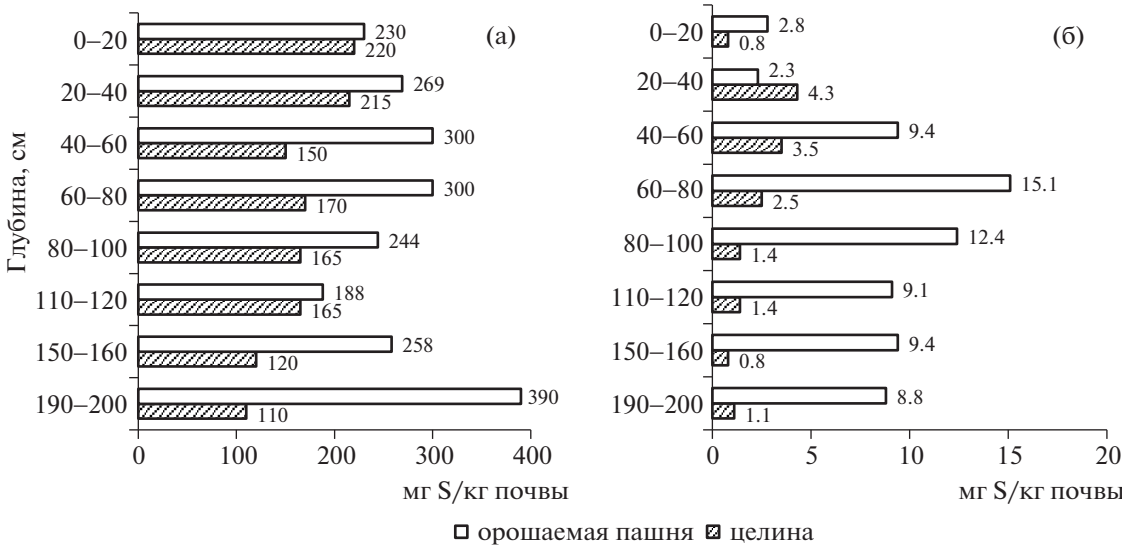

Рис. 1. Содержание и распределение общей (а) и подвижной (б) серы в профиле неорошаемых и орошаемых каштановых почв.

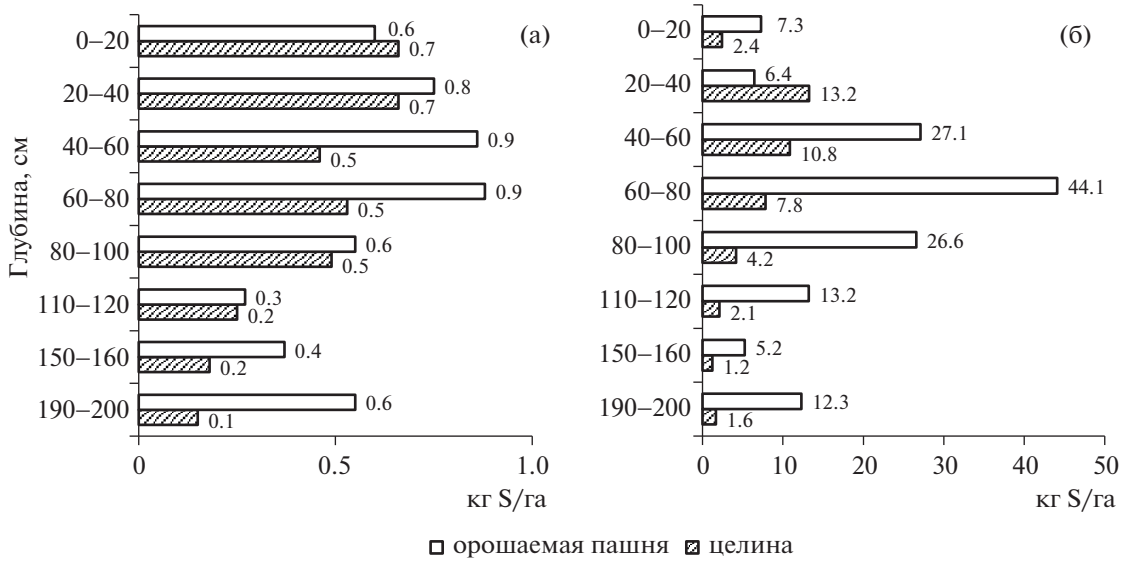

Рис. 2. Запасы общей (а) и подвижной (б) серы в профиле неорошаемых и орошаемых каштановых почв.

геохимическим барьером для мигрирующих легкоподвижных соединений. В целом же запасы подвижных сульфатов в каштановых почвах в слое 0–20 см, согласно градации [22], отнесены к низким.

Большинство сульфатов хорошо растворимы в воде и передвигаются с током почвенной влаги. Они слабо удерживаются (адсорбируются) глинистыми и другими почвенными минералами, особенно при низких показателях pH. Адсорбированные почвой сульфаты представляют собой важный резерв серы для питания растений, особенно в нижних горизонтах почвенного профиля (глубже 30 см), имеющих кислую реакцию среды. Потери серы из почвы в основном происходят за счет вымывания сульфат-ионов из корнеобитаемой зоны при выпадении большого количества осадков и при орошении. Размеры потерь серы от вымывания зависят от почвенно-климатических условий: ежегодные потери обычно составляют от 5 до 60 кг S/га. По сравнению с незасеянной почвой под хорошо развитыми посевами сельскохозяйственных культур вымывание сульфат-ионов, как правило, идет менее интенсивно.

Несоблюдение технологии орошения вызывает не только негативные изменения свойств почв, но и приводит к непродуктивному перерасходу воды и минеральных удобрений. Анализ данных

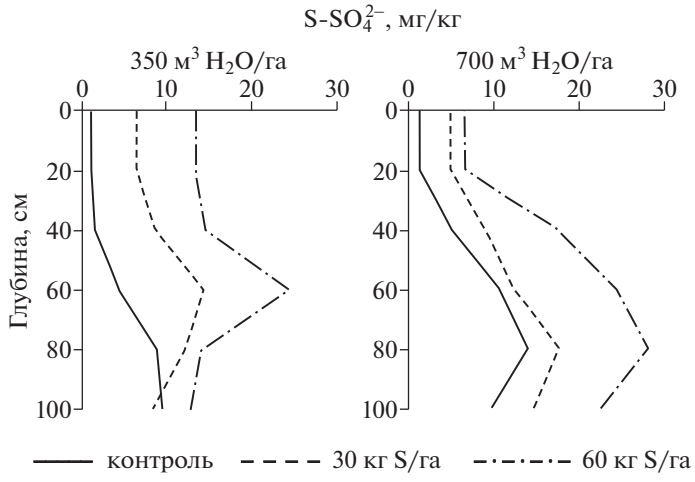

Рис. 3. Влияние норм полива и доз серных удобрений на содержание и распределение $S\text{-}SO_4$ в каштановой почве, мг/кг.

по вымыванию питательных веществ из почвы показал, что факторы, влияющие на интенсивность этого процесса, располагаются в следующем убывающем порядке: орошение и количество выпадающих осадков, гранулометрический состав почвы, в частности поглотительная способность почв в отношении таких анионов, как PO_4^{-3} и SO_4^{-2} [30], дозы, формы и сроки внесения удобрений, характер использования угодья, агротехника выращивания культуры, длительность периода вегетации, урожайность.

Согласно полученным данным, внесение серных удобрений увеличивало содержание сульфатиона в почве в зависимости от размера дозы при норме полива 350 м^3/га (рис. 3). Миграция $S\text{-}SO_4$ за пределы как корнеобитаемого слоя, так и карбонатного горизонта практически отсутствовала. Известно, что карбонат кальция служит геохимическим барьером против вымывания важных элементов, в т.ч. и серы [31]. Воздействие же поливной нормы воды (700 м^3/га) на каштановой супесчаной почве снижало накопление серы в пахотном горизонте и усиливало ее вымывание за пределы слоя.

Проведенными наблюдениями за динамикой содержания подвижной серы в почве выявлено, что в контроле она присутствовала в незначительном количестве в течение всех вегетационных сезонов. Внесение фоновых удобрений (N120P60K120) способствовало некоторой мобилизации почвенных ресурсов серы, и содержание подвижных форм элемента слабо возрастало, но обеспеченность ими почвы продолжала оставаться на низком уровне (рис. 4).

Применение серных удобрений несколько увеличивало содержание подвижной серы. Например, в мае увлажненного сезона обеспеченность ею орошаемой каштановой почвы в вариантах с S60 и S120 была высокой. Далее, по причинам потребления ее растениями и миграции в нижележащие слои содержание доступной для растений формы данного питательного элемента резко снижалось. К концу вегетации растений при сокращении потребления элемента картофелем отмечено незначительное повышение количества подвижной серы.

Возрастание доз серного удобрения способствовало повышению обеспеченности подвижной серой до среднего уровня (6–12 мг/кг) в первую половину вегетационного периода засушливого сезона. В вариантах S60 и S120 под воздействием поливов отмечена ее небольшая миграция на глубину 20–40 см во 2-й половине вегетации картофеля.

Динамика содержания подвижной серы в слое 0–20 см орошаемой каштановой почвы во влажный сезон была в основном однотипной во всех вариантах опыта: повышение ее количества в весенне-раннелетний период при возрастании доз, снижение к середине вегетации из-за интенсивного потребления серы растениями и некоторое увеличение к концу вегетации.

Таким образом, выявлено, что содержание подвижной серы в орошаемой каштановой почве повышается при внесении возрастающих доз серных удобрений только в начале вегетационного периода, далее оно уменьшается. Избыточное количество внесенной серы мигрирует в нижележащие слои почвы и особенно заметно это проявлялось во влажный год. Поэтому нерационально внесение на орошаемых супесчаных каштановых почвах серы в дозах, превышающих ее вынос урожаем, т.к. она постепенно вымывается из верхней корнеобитаемой части профиля в нижележащие слои.

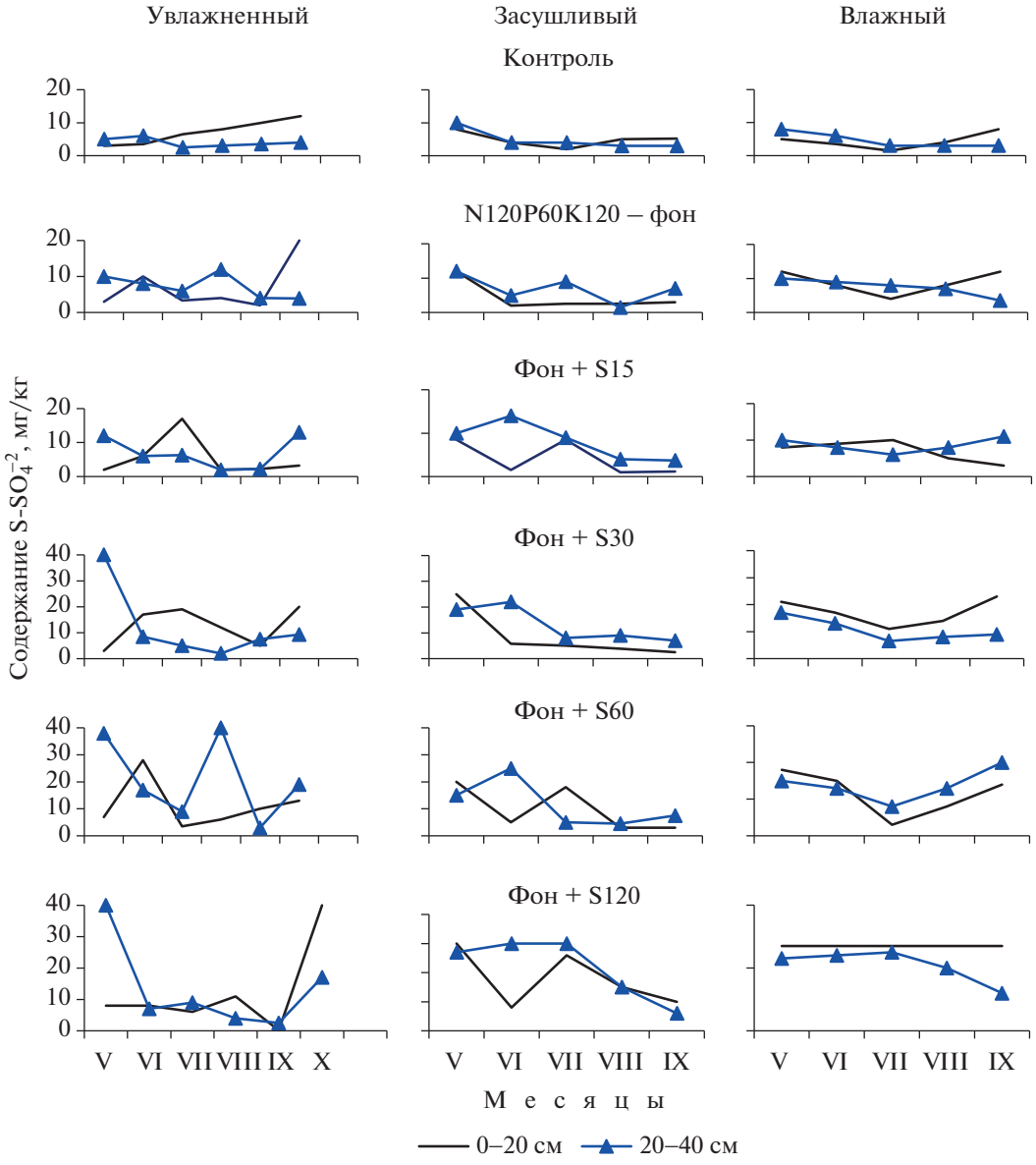

Рис. 4. Динамика содержания подвижной серы в орошаемой каштановой почве под картофелем в зависимости от возрастающих доз серных удобрений.

После 3-х лет внесения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) содержание всех форм серы в орошаемой каштановой почве повысилось (табл. 1), но уровень их накопления определялся размером дозы. Использование доз S15 и S30 увеличило концентрацию всех форм серных соединений по сравнению с контролем и фоном, тогда как между собой они не различались. То же самое отмечено и для доз S60 и S120, т.е. достоверное увеличение их количеств происходило до определенного предела интервалов, а с существенным повышением дозы снова возрастало. Сера удобрений распределялась по фракциям в зависимости от размера дозы. Содержание резервной формы серы имело высокую корреляцию с другими формами (r = 0.91–0.99), т.е. увеличение дозы серных удобрений способствовало возрастанию содержания всех форм серы.

Поскольку органическая сера является доминирующей в составе серных соединений в почвах, то отдельно рассмотрим ее связь с органическим веществом, гумусом и органическим азотом. Сульфатная форма серы образуется в качестве побочного продукта в процессе минерализации органического вещества почвы с участием микроорганизмов. Процесс иммобилизации представляет собой включение сульфатной формы серы в микробную биомассу почвы. Наиболее простым

Таблица 1. Содержание соединений серы (S) в орошаемой каштановой почве после 3-х лет внесения возрастающих доз серных удобрений под картофель, мг/100 г

Вариант	Общая		Подвижная		Минеральная		Резервная	
	M ± m	*V*, %	M ± m	*V*, %	M ± m	*V*, %	M ± m	*V*, %
Контроль	17.6 ± 0.5	4.5	0.19 ± 0.01	9.1	1.63 ± 0.06	6.6	15.8 ± 0.5	5.8
N120P60K120 – фон	17.0 ± 0.3	2.9	0.18 ± 0.01	14.7	1.75 ± 0.14	13.4	15.0 ± 0.3	3.3
Фон + S15	19.0 ± 0.6	5.9	0.22 ± 0.01	12.0	1.75 ± 0.13	12.6	17.0 ± 0.8	8.3
Фон + S30	19.5 ± 0.5	4.1	0.24 ± 0.01	8.3	1.84 ± 0.08	7.6	17.4 ± 0.8	1.7
Фон + S60	21.7 ± 1.2	10.0	0.28 ± 0.01	6.2	2.10 ± 0.14	11.4	19.3 ± 0.6	5.0
Фон + S120	22.3 ± 0.9	7.2	0.29 ± 0.01	6.0	2.25 ± 0.20	15.5	19.5 ± 0.6	5.6
HCP_{05}, мг/100 г	0.88		0.01		0.13		1.20	

Таблица 2. Содержание $S_{орг}$ в орошаемой каштановой почве (слой 0–20 см) при внесении возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под картофель

Вариант	$S_{общ}$	$S_{орг}$	C : $S_{орг}$	N : $S_{орг}$	Содержание $S_{орг}$ в гумусе,%
	мг/кг				
Контроль	170	152	61	7.5	1.0
N120P60K120 (фон)	166	147	63	7	0.9
Фон + S15	181	161	57	7.5	1.0
Фон + S30	192	171	54	8	1.1
Фон + S60	207	184	50	8.5	1.2
Фон + S120	225	199	46	7.5	1.3
HCP_{05}	2	1			

способом для определения того, происходит ли в почве чистая (нетто) минерализация или чистая иммобилизация серы, служат показатели соотношения углерода к сере. Процесс высвобождения серы – перехода в сульфатную форму в основном происходит при соотношении C : S в органическом веществе менее чем 200 : 1; а иммобилизация серы обычно происходит в тех случаях, когда соотношение C : S превышает 400 : 1 [2]. Применение возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемые агроценозы картофеля выявило следующую направленность в изменении содержания $S_{орг}$ в почве: с увеличением дозы повышалось ее количество в почве, возрастала обогащенность гумуса серой и сужалось соотношение C : $S_{орг}$ (табл. 2).

Следовательно, применение возрастающих доз серных удобрений способствует усилению минерализации $S_{орг}$. Отношение N : $S_{орг}$ уменьшалось только при не внесении серных удобрений.

Ранее было отмечено, что соотношение C : N : S в почвах составляет (<100–194) : 10 : (1–1.6) или в среднем 130 : 10 : 1.3 [6]. Сделанный нами расчет этого показателя иным способом, в котором содержание серы принимается за единицу, выявил, что соотношение элементов в целине составляло 35.4 : 3.6 : 1, в орошаемой почве – 40.0 : 4.8 : 1. Это характерно для аридных условий каштановой зоны Забайкалья, где даже длительное орошение не способствует быстрому повышению уровня плодородия почв без применения минеральных удобрений.

По нашим данным (табл. 3), баланс серы в зависимости от возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) существенным образом отличался от азотного, фосфорного и калийного. Отрицательный баланс серы был в контроле и в фоновом варианте. Внесение наименьшей дозы S15 уже сформировало положительный баланс, но учитывая, что каштановые почвы обеднены подвижной серой, рекомендуется применение дозы S30. Высокие дозы снижают рентабельность производства картофеля в орошаемых условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, валовое количество серы в каштановых супесчаных почвах Западного Забайкалья невысокое, что связано с низким содержанием гумуса. Распределение серы по профилю – постепенно убывающее на целине и практически нарастающее с глубиной профиля на длительно орошаемой пашне.

Орошение, повышая биологическую активность, способствует аккумуляции серы в микробобиомассе и корневых остатках. Например, при

Таблица 3. Баланс серы в зависимости от возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемый картофель (среднее за 3 года)

Вариант	Внесено S	Вынос S	Баланс, +/–	Интенсивность баланса, %
	кг/га			
Контроль	0	13.7	–13.7	0
N120P60K120 (фон)	0	16.1	–16.1	0
Фон + S15	15	17.7	+2.7	84.7
Фон + S30	30	19.2	+10.8	156
Фон + S60	60	20.3	+39.7	296
Фон + S120	120	23.0	+97.0	522

орошении в слое 0–20 см запас подвижных сульфатов был больше в 3 раза, чем на целине (7.3 и 2.4 кг/га соответственно); в слое 0–50 см – в 1.3 раза, в слое 0–100 см – в 2.9 раза. Это превышение связано с наличием карбонатного горизонта с глубины 40 см и до конца профиля, который является биогеохимическим барьером для мигрирующих сульфатов.

По содержанию и запасам подвижной серы каштановые почвы в слое 0–20 см отнесены к низкообеспеченным, хотя при орошении в нижележащих слоях эти показатели возрастали до среднего и высокого уровня. Запасы серы в орошаемой почве в карбонатных слоях 40–60 и 60–80 см превышали в 1.9 и 1.7 раза соответствующие показатели целины.

Внесение серных удобрений увеличивало содержание сульфат-иона в почве в зависимости от размера дозы при норме полива 350 м^3/га. Миграция S–SO_4 за пределы как корнеобитаемого слоя, так и карбонатного горизонта практически отсутствовала. Воздействие же поливной нормы воды (700 м^3/га) снижало накопление серы в пахотном горизонте и усиливало ее вымывание за пределы слоя.

Показано, что содержание подвижной серы в орошаемой каштановой почве повышалось при внесении возрастающих доз серных удобрений под картофель только в начале вегетационного периода. После 3-х лет применения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемый картофель содержание всех форм серы в почве повысилось, однако уровень их накопления определялся размером дозы. Выявлена следующая направленность в изменении содержания $S_{орг}$ в почве: с увеличением дозы повышалось ее количество в почве, возрастала обогащенность гумуса серой и сужалось соотношение C : $S_{орг}$.

Установлен отрицательный баланс серы в контроле и в фоновом варианте. Внесение наименьшей дозы S15 уже сформировало положительный баланс, но учитывая, что каштановые почвы обеднены подвижной серой, необходимо применение дозы S30 с соблюдением норм полива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rai A., Singh A.K., Mischra R., Shahi B., Rai V., Kumari N., Kumar V., Gangwar A., Sharma R.B., Rajput J., Kumari N., Kumar S., Kumar A., Anal A.K.D.A., Rai S., Sharma S., Bahuguna A., Arvind, Kumar A., Singh S.* Sulphur in soils and plants: An overview // Inter. Res. J. Pure Appl. Chem. 2020. V. 21. Is. 10. P. 66–70.
2. *Миккельсен Р., Нортон Р.* Сера в почвах и серосодержащие удобрения // Вестн. Международ. ин-та питания раст. 2014. № 3. С. 6–9.
3. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 376 с.
4. *Sterner R.W., Elser J.J.* Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 2002. 439 p.
5. *Sasaki T., Yoshihara Y., Jamsran U., Ohkuro T.* Ecological stoichiometry explains larger-scale facilitation processes by shrubs on species coexistence among understory plants // Ecol. Engin. 2010. V. 36. P. 1070–1075.
6. *Freney F.R., Williams C.H.* The sulphur cycle in soil // The Global Biogeochemical Sulphur Cycle. Scope Report No. 19. J. Chichester, England: Wiley and Sons, 1983. P. 129–202.
7. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968. 428 с.
8. *McGill W.B., Cole C.V.* Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter // Geoderma. 1981. V. 26. P. 267–286.
9. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н.* Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 340 с.
10. *Degryse F., Ajiboye B., da Silva R.C., Baird R., McLaughlin M.J.* Transformations of sulphate and elemental sulphur in soil // Conference: ASA, CSSA, SSSA Annual Meetings – Tampa, USA. 2013.
11. *Degryse F., Baird R., Andelcovich I., McLaughlin M.J.* Long-term fate of fertilizer sulfate- and elemental S in co-granulated fertilizers // Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2021. V. 120. P. 31–48.
12. *Фокин А.Д., Гозный С.В.* Миграция сульфатов и возможные уровни их накопления в почвах подзолистого типа // Агрохимия. 1982. № 5. С. 72–77.
13. *Kertesz M.A., Mirleau P.* The role of soil microbes in plant sulphur nutrition // Annual Meeting of the Society-for-Experimental-Biology. Aug 2004. J. Experiment. Bot. 2004. V. 55 (404). P. 1939–1945.

14. *Rai A., Singh S.* Forms of sulphur in some black soils of Varanasi district of Uttar Pradesh // J. Exp. Biol. Agricult. Sci. 2018. V. 6. P. 983–989.

15. *Uchoa S.C.P., Victor H.A., Freire F.M.* Effect of sulphur rates and incubation time on the dynamics of sulphur forms in soil // Revista brasileira de ciencia do solo. 2013. V. 37(3). P. 678–687.

16. *Chen B., Shan X.Q., Shen D.Q., Mou S.F.* Nature of the HCl-soluble sulfate in the sequential extraction for sulfur speciation in soils // Fresen. J. Analyt. Chem. 1997. V. 3. Is. 7. P. 941–945.

17. *Слюсарев В.Н.* Сера в почвах Северо-Западного Кавказа (агроэкологические аспекты). Краснодар: КубГАУ, 2007. 230 с.

18. *Dail D.B., Fitzgerald I.W.S.* Cycling in soil and stream sediment: Influence of season and in silu concentrations of carbon, nitrogen and sulfur // Soil Biol. Biochem. 1999. V. 31. № 10. P. 1395–1404.

19. *Kozlowska I.* Wplyw nawozenia siarka I wapnowania na zmiany we wlasciwosciach bizykochemicznych I chemicznych gleby. I. Siarka w glebie // Ann. UMCS.E. 2001. V. 56. P. 115–124.

20. *Kopec M., Gondek K.* The effect of long-term fertilization on the sulphur content in soil and in the mountain meadow sward (Gzarny Potok) // Rostl. Vyroba. 2002. V. 48. № 12. P. 525–530.

21. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Чимитдоржиева Г.Д., Абашеева Н.Е., Убугунова В.И., Лаврентьева И.Н., Корсунова Ц.Д.-Ц.* Органическое вещество почв Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. 296 с.

22. *Смирнов Ю.А.* Повышение урожаев и качества сельскохозяйственной продукции при использовании серных удобрений. Обзорн. информация. М., 1985. 61 с.

23. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 5. С. 39–47.

24. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л.* Свободные аминокислоты в неорошаемых и орошаемых каштановых почвах Забайкалья // Агрохимия. 1997. № 2. С. 31–36.

25. *Убугунов Л.Л.* Сера в аллювиальных почвах бассейна Селенги // Почвоведение. 2000. № 6. С. 716–722.

26. *Аристархов А.Н.* Агрохимия серы. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.

27. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н.* Содержание, запасы и формы калия в каштановых почвах Забайкалья в зависимости от орошения и возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) под картофель // Агрохимия. 2020. № 3. С. 3–10.

28. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М.* Биопродуктивность почв сенокосов и пастбищ сухостепной зоны Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 515 с.

29. *Айдинян Р.Х., Иванова М.С., Соловьева Т.Г.* Методы извлечения и определения различных форм серы в почвах и растениях. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1968. 22 с.

30. *Пейве Я.В.* Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.

31. *Крупенников И.А.* Типизация антропогенных процессов деградации черноземов // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1509–1517.

Sulfur in Non-Irrigated and Irrigated Chestnut Soils and Evaluation of Application of Increasing Doses of Sulfur Fertilizers (with NPK) for Potatoes

M. G. Merkusheva[a,#], L. L. Ubugunov[a], L. N. Boloneva[a], and I. N. Lavrentieva[a]

[a] *Institute of General and Experimental Biology SB RAS ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

[#] *E-mail: merkusheva48@mail.ru*

It was found that due to the low humus content and low biological activity of virgin chestnut soils of Western Transbaikalia, the gross amount of sulfur is low. The distribution of sulfur along the profile is gradually decreasing with some accumulation of it in the carbonate horizon. Prolonged irrigation due to an increase in humus content and biological activity contributed to an increase in the amount of sulfur, which practically increases with the depth of the profile. When irrigated in a layer of 0–20 cm, the stock of mobile sulfates was 3 times larger than in virgin soil (7.3 and 2.4 kg/ha, respectively); in the 0–50 cm layer – 1.3 times, in the 0–100 cm layer – 2.9 times. According to the content and reserves of mobile sulfur, chestnut soils in a layer of 0–20 cm are classified as low-income. After 3 years of using increasing doses of sulfur fertilizers (against the background of NPK) for irrigated potatoes, the content of all forms of sulfur in the soil increased depending on the dose size. The following pattern was revealed: with an increase in the dose, the amount of S_{org} in the soil and the enrichment of humus with it increased, the ratio C : S_{org} narrowed. A negative sulfur balance was established in the control and in the background version. The introduction of the lowest dose of S15 has already formed a positive balance, but given that chestnut soils are depleted of mobile sulfur, it is necessary to apply a dose of S30 (against the background of NPK) in compliance with irrigation standards.

Key words: chestnut soils, irrigation, sulfur, migration, fertilizer, potatoes, sulfur forms and balance.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 29–42

Удобрения

УДК 631.8:631.445.24(470.53)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ В УСЛОВИЯХ ПРЕДУРАЛЬЯ

© 2023 г. М. Т. Васбиева[1,*], В. Р. Ямалтдинова[1]

[1]Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства ПФИЦ УрО РАН
614532 с. Лобаново, Пермский р-н, Пермский край, ул. Культуры, 12, Россия

*****E-mail: vasbievamt15@gmail.com*

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.
После доработки 31.03.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

В длительном полевом опыте, заложенном в 1968 г., проведена оценка эффективности применения органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Установлено, что в климатических условиях Предуралья органическая система удобрения по влиянию на урожайность сельскохозяйственных культур уступала минеральной и органо-минеральной системам удобрения. В отдельных ротациях севооборотов более эффективной была органо-минеральная, в других – минеральная система удобрения. Рассмотрена эффективность применения удобрений в зависимости от условий увлажнения вегетационного периода. Рассчитан баланс органического углерода и основных элементов питания в почве. Длительное возделывание сельскохозяйственных культур без применения удобрений привело к потере из почвы >10 т органического углерода, ≈2300 кг азота, 780 кг фосфора и 2700 кг калия. Высокие отрицательные балансы основных элементов питания в контрольном варианте привели к ухудшению показателей плодородия почвы. Показано, что применение всех систем удобрения обеспечило увеличение содержания подвижных соединений фосфора и калия в почве относительно исходного уровня в 1.2–3.0 раза. При использовании органической и органо-минеральной систем удобрения отмечено поддержание содержания органического углерода на исходном уровне (1.3%). При использовании минеральной системы удобрения поддержание содержания органического углерода на исходном уровне отмечено только при более высокой насыщенности пашни NPK. Минеральная система удобрения привела к подкислению почвы.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, продуктивность севооборота, баланс органического углерода и элементов питания, ГТК, КИУ, плодородие почвы.

DOI: 10.31857/S0002188123030110, **EDN:** KOFNDW

ВВЕДЕНИЕ

Уровень применения удобрений в севообороте, обеспечивающий максимальную продуктивность культур и положительный баланс элементов питания, – важный нормативный материал при разработке мероприятий для сохранения плодородия почв [1]. Длительные опыты являются уникальной основой для исследования эффективности удобрений, их влияния на почвенное плодородие, урожайность и качество сельскохозяйственных культур [2]. Большое разнообразие почвенных и климатических условий страны, большая вариабельность показателей плодородия почв в пространстве и времени требуют всесторонних исследований в каждом отдельном регионе в течение длительного времени.

Цель работы – оценка влияния длительного применения органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения на продуктивность сельскохозяйственных культур с учетом агроклиматических ресурсов региона, баланс углерода и элементов питания и агрохимические свойства дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном стационарном полевом опыте, заложенном в 1968 г. на базе опытного поля Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН. В опыте изучали следующие системы удобрения: органическую (насыщенность 1 га пашни навозом 10 и 20 т/га/год),

минеральную, в которой дозы удобрений рассчитаны по эквивалентному содержанию питательных веществ в навозе при дозах 10 и 20 т/га, органо-минеральную, где с насыщенностью навозом 5, 10 и 20 т/га/год были внесены минеральные удобрения эквивалентно содержанию питательных веществ в навозе. Повторность четырехкратная, размещение делянок рендомизированное. Опыт заложен в 2-х последовательных во времени закладках. Общая площадь делянки 115.5 м^2. Исследование проводили в полевом 8-польном парозернопропашном севообороте с чередованием культур: пар чистый–озимая рожь–яровая пшеница с подсевом клевера–клевер 1 года пользования (**г.п.**), клевер 2 г.п.–ячмень–картофель–овес. Изученная схема в опыте сложилась во 2-й ротации севооборота (1977–1978 гг.), поэтому результаты исследования приведены за последние 5 ротаций (2–6-я ротации).

Навоз КРС вносили в севообороте в 2 приема: под рожь и картофель (разовые дозы составили 20, 40 и 80 т/га). Минеральные удобрения, рассчитанные по эквивалентному содержанию в навозе, распределяли в зависимости от их количества, внесенного под озимую рожь, пшеницу, ячмень, картофель и овес. Клевер не удобряли, учитывали последействие. За 5 ротаций севооборота с навозом при насыщенности пашни навозом 10 т/га/год в почву поступило: N – 1400, P – 950, K – 2070 кг/га (N35P25K50 в год), при насыщенности 20 т/га – 2800, 1900 и 4140 кг/га (N70P50K100 в год) соответственно. Солому в опыте после уборки отчуждали. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Минеральные удобрения под яровые зерновые и картофель вносили весной перед посевом, под озимые культуры дробно – осенью и весной в подкормку.

Опытный участок расположен на дерново-мелкоподзолистой тяжелосуглинистой почве с содержанием $C_{орг}$ в среднем в 2-х закладках 1.3%, pH_{KCl} 5.5, $H_г$ – 3.1 смоль(экв)/кг, S – 15.6 смоль(экв)/кг, подвижного P_2O_5 и обменного K_2O (по Кирсанову) – 162 и 173 мг/кг соответственно.

Почвообразующая порода почвы в опыте – желто-бурая некарбонатная покровная глина. Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния, которое увеличивается с глубиной, как и сумма поглощенных оснований [3, 4].

Исследования проводили в IV агроклиматическом районе Пермского края. В физико-географическом отношении район находится в подзоне южной тайги и хвойно-широколиственных лесов [5]. В соответствии с почвенно-экологическим районированием территория Пермского края относится к Вятско-Камской почвенной провинции [6]. Климат – умеренно-континентальный с холодной, продолжительной, снежной зимой и теплым коротким летом. Сумма средних суточных температур >10°C составляет 1700–1900°C. Длительность периода активной вегетации с температурой >10°C в среднем 115 сут, с температурой >15°C – 60 сут. Район относится к зоне достаточного увлажнения: ГТК = 1.4, осадков за год выпадает 470–500 мм, испаряемость с поверхности почвы составляет ≈340 мм.

Расчет баланса органического углерода проводили по методике, предложенной Лыковым [7]. Баланс углерода рассчитывали как разность между статьями его прихода (гумификации пожнивно-корневых остатков и органических удобрений) и расхода (минерализации при возделывании сельскохозяйственных культур, паровании полей). Потери определяли по выносу азота урожаем сельскохозяйственных культур. Коэффициенты использования элементов питания из удобрений (**КИУ**) рассчитывали разностным способом. Основные агрохимические показатели почвы определяли в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продуктивность сельскохозяйственных культур без применения удобрений в ротациях севооборота варьировала от 25.2 до 29.2 ц к.е. и в среднем за 5 ротаций (40 лет) составила 27.8 ц к.е. (табл. 1). Применение органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения достоверно повысило продуктивность севооборота во всех вариантах опыта на 15–30%. Наибольшая продуктивность получена при применении минеральной и органо-минеральной систем удобрения. Аналогичные результаты получены и в других длительных опытах [2, 8]. При органической системе удобрения полученная продуктивность севооборота была достоверно меньше относительно других систем удобрения. Наибольшее увеличение продуктивности на 8.5 ц к.е. отмечено в варианте с максимальным насыщением пашни удобрениями “навоз 20 т + NPK эквивалентно навозу”. В отдельных ротациях севооборотов более эффективной была органо-минеральная, в других – минеральная система удобрения, что в первую очередь было связано с метеорологиче-

Таблица 1. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность полевого 8-польного севооборота (среднее 2-х закладок, 1977–2017 гг.), ц к.е./га/год

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций	Отклонение
	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я		
Контроль	28.3	29.1	25.2	29.2	27.3	27.8	–
Навоз 10 т/га	32.9	34.1	29.6	33.2	30.7	32.1	4.3
Навоз 20 т/га	34.8	35.8	29.9	34.7	32.5	33.5	5.7
NPK эквивалентно 10 т навоза	35.1	35.0	31.5	34.5	35.1	34.2	6.4
NPK эквивалентно 20 т навоза	35.8	35.3	34.5	35.5	37.3	35.7	7.9
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	35.9	34.4	30.6	35.1	35.0	34.2	6.4
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	33.9	35.7	32.8	37.5	36.7	35.3	7.5
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	35.5	35.0	34.8	38.7	37.4	36.3	8.5
$НСР_{05}$	1.4	1.0	1.3	1.0	1.7	–	0.7

скими условиями вегетационных периодов в разные годы проведения опыта.

В среднем за 5 ротаций урожайность зерна озимой ржи при применении различных систем удобрения возросла на 21–28, яровой пшеницы – на 14–52, ячменя – на 10–13, овса – на 17–25, клубней картофеля – на 24–58% (табл. 2). Наиболее отзывчивыми на применение удобрений среди всех культур в севообороте были яровая пшеница и картофель. В вариантах NPK эквивалентно 20 т навоза, навоз 10 т + NPK эквивалентно навозу и навоз 20 т + NPK эквивалентно навозу урожайность данных культур возрастала на 40–60%, в отдельных ротациях урожайность культур в этих вариантах увеличивалась на 70–80%. Для яровой пшеницы минеральная система удобрения была более эффективной, чем органическая или органо-минеральная. Для картофеля минеральная и органо-минеральная системы удобрения по эффективности были равнозначными и обеспечивали прибавку урожая на 15–20% больше, чем органическая система удобрения. Яровой ячмень был наименее отзывчивым среди зерновых культур на применение удобрений в климатических условиях Среднего Предуралья, прибавки урожайности не зависели от системы удобрения и не превышали в среднем за 5 ротаций 13%, в отдельные ротации – 23%. Полученные данные о невысокой эффективности систем удобрения на ячмене связаны с размещением культуры после хорошего предшественника [9]. Клевер оставляет в почве большое количество органических остатков, азота, улучшает ее агрофизические свойства, чем обеспечивает хорошее развитие последующей культуры.

Урожайность сена клевера лугового 1-го г.п. зависела от урожайности покровной культуры (в среднем в ротациях $r = -0.7$). Хорошее развитие покровной культуры приводило к ослаблению и изреживанию всходов клевера лугового. Подобные результаты получены в работе [10]. Только в вариантах с органической системой удобрения, где была получена наименьшая прибавка урожайности яровой пшеницы, отмечено достоверное увеличение урожайности сена клевера на 0.2–0.4 т/га, в остальных вариантах показано снижение урожайности данной культуры. Наблюдали увеличение урожайности сена клевера 2-го г.п. на 0.1–0.5 т/га во всех вариантах опыта по сравнению с вариантом без удобрений.

Изменения погодных условий существенно влияют на урожайность возделываемых культур и продуктивность севооборота. По данным [11], изменчивостью погодных условий объясняется 25–60% изменений эффективности удобрений в Нечерноземной зоне. В первую очередь эффективность удобрений существенно зависит от условий увлажнения вегетационного периода культуры. Поэтому была сделана оценка влияния гидротермического коэффициента Селянинова (**ГТК**) вегетационного периода на урожайность возделываемых в севообороте культур (табл. 3). За время проведения опыта (1978–2017 гг.) на избыточно увлажненные годы (ГТК > 1.3) пришлось 45%, годы с нормальным увлажнением (ГТК = 1.0–1.3) – 40% и засушливые годы (ГТК < 1.0) – 15% (рис. 1).

Таблица 2. Влияние длительного применения удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур (среднее 2-х закладок), т/га

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций
	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	
Озимая рожь						
Контроль	3.0	2.5	2.8	3.1	3.2	2.9
Навоз 10 т/га	3.2	3.7	3.1	3.6	3.8	3.5
Навоз 20 т/га	3.6	4.0	3.1	3.7	4.1	3.7
NPK эквивалентно 10 т навоза	3.4	3.7	3.0	3.4	4.0	3.5
NPK эквивалентно 20 т навоза	3.7	3.9	3.2	3.6	4.2	3.7
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	3.5	3.8	3.1	3.3	4.1	3.6
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	3.6	4.0	3.2	3.4	4.2	3.7
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	3.6	3.7	3.2	3.3	4.4	3.6
$НСР_{05}$	0.3	0.4	0.2	0.2	0.5	0.2
Яровая пшеница						
Контроль	1.5	1.8	2.4	2.3	2.5	2.1
Навоз 10 т/га	1.7	2.0	2.9	2.8	2.8	2.4
Навоз 20 т/га	1.9	2.1	3.3	2.8	3.0	2.6
NPK эквивалентно 10 т навоза	2.2	2.2	3.3	2.9	3.4	2.8
NPK эквивалентно 20 т навоза	2.5	2.2	4.3	3.5	3.4	3.2
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	2.1	1.8	3.2	3.1	3.2	2.7
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	2.3	2.0	3.7	3.5	3.5	3.0
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	2.5	2.0	4.4	3.8	3.3	3.2
$НСР_{05}$	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2
Клевер 1-го г.п. (сено 16%)						
Контроль	2.9	7.0	4.3	4.9	3.3	4.5
Навоз 10 т/га	3.3	6.9	5.1	5.0	3.2	4.7
Навоз 20 т/га	2.9	7.2	5.0	5.9	3.5	4.9
NPK эквивалентно 10 т навоза	2.3	6.7	4.6	5.4	3.1	4.4
NPK эквивалентно 20 т навоза	2.0	6.3	4.3	5.0	3.1	4.2
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	2.8	7.0	4.7	5.2	3.5	4.6
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	2.1	5.7	4.5	5.3	3.4	4.2
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	1.7	5.2	4.2	5.2	3.4	3.9
$НСР_{05}$	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.2
Клевер 2-го г.п. (сено 16%)						
Контроль	2.6	3.9	1.5	3.4	3.0	2.9
Навоз 10 т/га	2.5	4.3	1.5	4.0	3.0	3.1
Навоз 20 т/га	2.4	3.9	1.7	3.7	3.3	3.0
NPK эквивалентно 10 т навоза	2.5	4.3	1.5	4.1	3.3	3.1
NPK эквивалентно 20 т навоза	2.7	3.9	1.7	4.1	3.8	3.2

Таблица 2. Окончание

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций
	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	2.5	4.5	1.5	4.1	3.7	3.3
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	2.6	4.3	1.6	4.1	3.9	3.3
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	2.9	4.6	1.5	4.1	3.9	3.4
$НСР_{05}$	0.4	0.1	$F_ф < F_т$	0.4	0.5	0.2
Ячмень						
Контроль	3.3	3.3	3.0	2.3	3.6	3.1
Навоз 10 т/га	3.2	3.8	3.5	2.4	3.8	3.4
Навоз 20 т/га	3.4	3.8	3.7	2.5	3.8	3.5
NPK эквивалентно 10 т навоза	3.6	3.7	3.3	2.4	3.8	3.4
NPK эквивалентно 20 т навоза	3.6	3.7	3.2	2.6	4.1	3.4
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	3.5	3.9	3.4	2.5	3.9	3.4
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	3.6	3.7	3.2	2.7	3.8	3.4
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	3.7	3.9	3.4	2.8	3.5	3.5
$НСР_{05}$	$F_ф < F_т$	0.3	$F_ф < F_т$	0.2	0.2	0.1
Картофель						
Контроль	15.7	18.0	12.9	19.5	14.2	16.1
Навоз 10 т/га	21.4	19.6	17.3	23.1	18.0	19.9
Навоз 20 т/га	22.8	23.2	14.2	24.1	18.8	20.6
NPK эквивалентно 10 т навоза	20.2	20.7	21.7	24.9	25.3	22.5
NPK эквивалентно 20 т навоза	23.7	21.8	23.4	25.0	26.7	24.1
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	23.6	20.3	18.6	26.5	24.8	22.8
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	20.7	22.8	22.3	28.1	26.5	24.1
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	24.7	21.6	23.6	29.2	27.7	25.4
$НСР_{05}$	2.7	2.2	3.5	2.1	3.6	1.2
Овес						
Контроль	3.7	2.1	2.1	2.5	1.6	2.4
Навоз 10 т/га	4.6	2.5	2.2	3.0	1.6	2.8
Навоз 20 т/га	4.6	2.5	2.5	3.2	1.8	2.9
NPK эквивалентно 10 т навоза	4.6	2.7	2.5	3.3	1.8	2.9
NPK эквивалентно 20 т навоза	4.2	2.8	2.8	3.2	2.1	3.0
Навоз 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	4.6	2.3	2.5	3.1	1.6	2.8
Навоз 10 т/га + + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	4.1	2.8	2.6	3.5	1.9	3.0
Навоз 20 т/га + + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	3.8	2.8	2.6	3.4	2.2	3.0
$НСР_{05}$	0.5	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2

Таблица 3. Влияние условий увлажнения вегетационного периода на урожайность сельскохозяйственных культур

ГТК	Озимая рожь	Яровая пшеница	Клевер 1-го и 2-го г.п.	Ячмень	Картофель	Овес
Без удобрений*						
Избыточно увлажненные	2.8	2.0	3.5	3.4	17.5	2.5
Нормально увлажненные	2.9	2.4	3.0	3.3	12.9	2.5
Засушливые	3.1	1.8	2.7	2.4	12.1	2.0
Органическая система удобрения**						
Избыточно увлажненные	0.4	0.4	0.3	0.2	4.8	0.5
Нормально увлажненные	0.8	0.6	0.4	0.4	2.9	0.6
Засушливые	1.2	0.3	0.1	0.4	2.8	0.1
Минеральная система удобрения**						
Избыточно увлажненные	0.5	0.9	0.3	0.4	7.3	0.5
Нормально увлажненные	0.7	1.2	0.0	0.3	9.7	0.9
Засушливые	1.6	0.5	0.0	0.3	2.5	0.4
Органо-минеральная система удобрения**						
Избыточно увлажненные	0.5	0.9	0.4	0.3	8.4	0.4
Нормально увлажненные	0.7	1.3	0.2	0.4	8.6	0.8
Засушливые	1.7	0.2	0.2	0.4	4.3	0.4

*Урожайность культур.
**Прибавки урожайности к контрольному варианту.

Исследование показало, что возделывание озимой ржи без применения удобрений обеспечивало получение более высокой урожайности зерна в засушливых условиях. Максимальная прибавка урожайности зерна озимой ржи при любой системе удобрения также была получена в условиях недостаточного увлажнения (ГТК = = 0.7–1.0) и составила 1.2–1.7 т/га. В годы с умеренным увлажнением (ГТК = 1.0–1.3) урожайность данной культуры при применении удобрений возрастала на 0.7–0.8 т/га, при повышенном увлажнении (ГТК > 1.3) – на 0.4–0.5 т/га. Полученные результаты связаны с сильным полеганием посевов озимой ржи при сильном увлажнении. Аналогичные результаты отмечены в работах [11, 12].

Урожайность яровой пшеницы в варианте без удобрений была на 20–30% больше в годы с нормальным увлажнением, чем в годы с избыточным увлажнением или в засушливых условиях. Эффективность удобрений для данной культуры была также больше в годы с нормальным увлажнением вегетационного периода. При этом эффективность минеральной и органо-минеральной систем была в 2 раза больше, чем органической.

Урожайность ярового ячменя и овса без применения удобрений в годы с недостаточным увлажнением снижалась на 25–40% и была на одном уровне как при нормальном, так и избыточном увлажнении. Применение органической, минеральной или органо-минеральной систем удобрения в севообороте обеспечивало небольшую (0.2–0.4 т/га), но достоверную прибавку урожайности ярового ячменя независимо от условия увлажнения вегетационного периода. Максимальная эффективность удобрений для овса была получена в годы с умеренным увлажнением. Прибавки урожайности данной культуры были больше при применении органо-минеральной или минеральной систем удобрения, чем органической системы.

При возделывании картофеля без удобрений наибольшая урожайность клубней получена в годы с избыточным увлажнением (ГТК >1.3), урожайность культуры была на 35–45% больше, чем при умеренном увлажнении или в засушливых условиях. При органической системе удобрения максимальная прибавка урожайности культуры также была получена при избыточном увлажнении (4.8 т/га). При применении органо-минеральной системы удобрения наибольшие прибавки урожайности (8.4–8.6 т/га) были получены как в годы с избыточным, так и нормальным увлажнением. Минеральная система удобрения обеспечила в годы с нормальным увлажнением прибавку урожайности почти 10 т/га.

Максимальная урожайность сена клевера без применения удобрений была получена в годы с избыточным увлажнением. Наибольшие прибавки

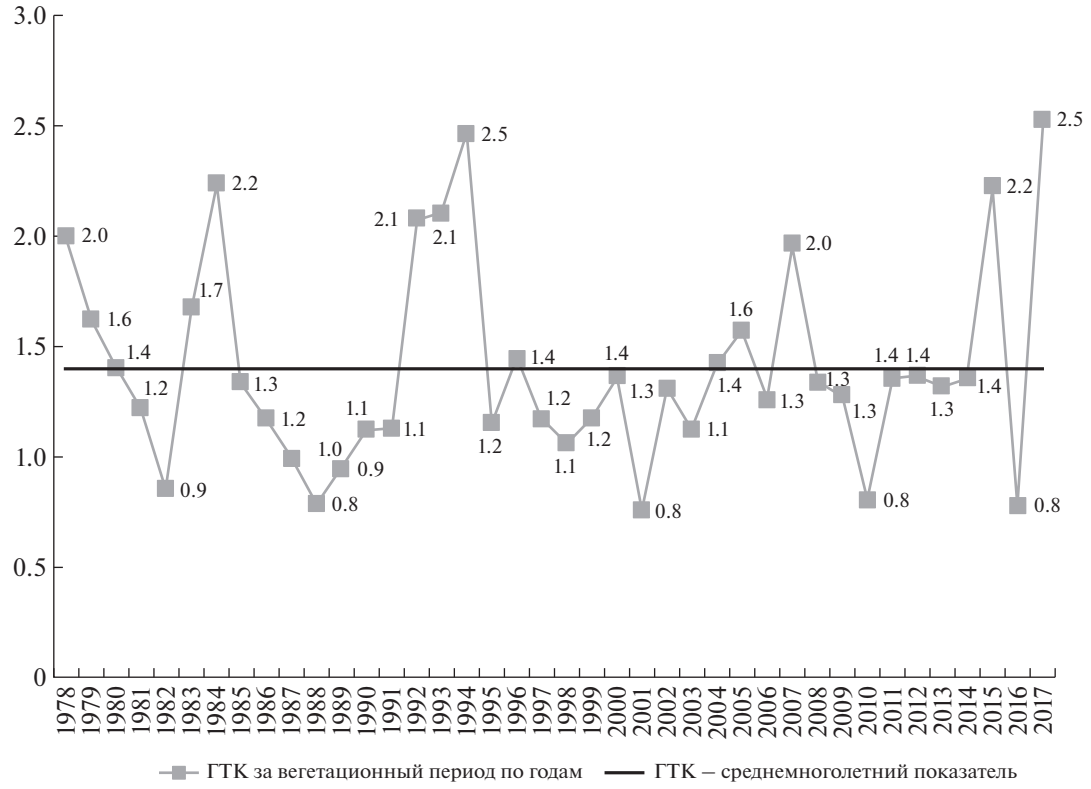

Рис. 1. Гидротермический коэффициент вегетационных периодов сельскохозяйственных культур в годы проведения опыта.

урожайности сена при использовании удобрений получены также при избыточном увлажнении.

При выявлении корреляционных связей между климатическими показателями вегетационных периодов культур (сумма активных температур >5, 10°С, сумма осадков и ГТК) и эффективностью различных систем удобрения установлены достоверные слабые и очень слабые зависимости (табл. 4). Для каждой культуры и системы удобрения выявлены свои особенности. Рссчитанные невысокие величины коэффициентов корреляции могут быть связаны с тем, что за 40 лет исследования на долю засушливых периодов пришлось всего 15%, на каждую культуру в севообороте с учетом 2-х закладок опыта пришлось 2 засушливых года. Сумму активных температур, сумму осадков и ГТК рассчитывали от момента посева до уборки культуры.

При органической системе удобрения установлены обратные слабые ($r = -0.3–0.4$) корреляционные зависимости между суммой осадков, ГТК вегетационного периода и прибавкой урожайности озимой ржи, прямые слабые ($r = 0.3–0.4$) – для картофеля. Для яровой пшеницы и овса выявлены слабые и очень слабые ($r = 0.2–0.3$) корреляционные связи между прибавкой урожайности и суммой активных температур (>5, 10°С).

При применении минеральной и органо-минеральной систем удобрения установлены обратные слабые ($r = -0.3$) корреляционные зависимости между суммой осадков, ГТК и прибавкой урожайности озимой ржи, прямые слабые и очень слабые ($r = 0.2–0.3$) связи – для яровой пшеницы, овса, клевера и картофеля. Выявлены прямые слабые и очень слабые ($r = 0.2–0.3$) корреляционные связи между суммой активных температур (10°С) и прибавкой урожайности озимой ржи, обратные слабые ($r = 0.3–0.4$) – для яровой пшеницы и овса. Между урожайностью или прибавками урожайности ярового ячменя (при любой системе удобрения) и климатическими показателями корреляционные связи не установлены.

Возможно, на результаты, полученные при статистическом анализе урожайных данных для клевера лугового, могло повлиять то, что их урожайность зависела не столько от погодных условий, а условий развития всходов под покровной культурой.

Кроме того, более высокие корреляционные связи между урожайностью культур и климатическими показателями могут быть получены при

Таблица 4. Закономерности изменения (коэффициент корреляции) урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от агрометеорологических условий

Метеорологические условия	Озимая рожь	Яровая пшеница	Клевер 1-го г.п.	Клевер 2-го г.п.	Ячмень	Картофель	Овес
Без удобрений (контрольный вариант)							
Сумма активных температур >5°С	0.5	0.1*	–0.1*	–0.1*	0.0*	–0.1*	–0.1*
Сумма активных температур >10°С	0.4	0.1*	–0.1*	–0.1*	–0.0*	–0.2*	–0.1*
Сумма осадков, мм	–0.3*	0.2*	0.2*	0.2*	0.1*	0.0*	0.1*
ГТК	–0.5	0.2*	0.3*	0.5	0.1*	–0.1*	0.2*
Органическая система удобрений**							
Сумма активных температур >5°С	–0.1*	–0.4	0.0*	0.2	0.0*	0.1*	–0.2*
Сумма активных температур >10°С	0.1*	–0.3	–0.1*	0.3	0.0*	0.1*	–0.3
Сумма осадков, мм	–0.4	0.0*	0.1*	0.2*	–0.2*	0.4	0.1*
ГТК	–0.3	0.1*	0.0*	0.1*	–0.2*	0.3	0.1*
Минеральная система удобрений**							
Сумма активных температур >5°С	0.1*	–0.4	–0.1*	0.1*	–0.1*	–0.1*	–0.3
Сумма активных температур >10°С	0.2	–0.4	–0.1*	0.2*	–0.1*	0.0*	–0.4
Сумма осадков, мм	–0.3	0.3	0.1*	0.1*	0.0*	0.2	–0.2*
ГТК	–0.3	0.3	0.1*	0.4	0.0*	0.1*	–0.1*
Органо-минеральная система удобрения**							
Сумма активных температур >5°С	0.2*	–0.4	–0.1*	0.3	–0.1*	–0.1*	–0.2*
Сумма активных температур >10°С	0.3	–0.4	–0.1*	0.3	–0.1*	0.0*	–0.2
Сумма осадков, мм	–0.3	0.4	0.1*	0.2	–0.1*	0.4	–0.2
ГТК	–0.3	0.4	0.3	0.5	–0.1*	0.2	–0.2*
Корреляция урожайности с климатическими показателями в целом в опыте							
Сумма активных температур >5°С	0.5	–0.2	–0.1*	0.0*	0.0*	–0.1*	–0.2
Сумма активных температур >10°С	0.5	–0.2	–0.1*	0.0*	0.1*	–0.1*	–0.2
Сумма осадков, мм	–0.5	0.3	0.2	0.2	0.1*	0.2	0.1*
ГТК	–0.6	0.3	0.3	0.5	0.1*	0.1*	0.1*

*Коэффициент корреляции несущественный.
**Корреляционные связи рассчитывали с полученной прибавкой урожайности культуры.

рассмотрении не вегетационного периода культуры в целом, а обеспеченности теплом и влагой их “критических периодов” развития.

Существенное значение для обоснования наиболее эффективных уровней применения удобрений и направленного регулирования почвенного плодородия имеют расчеты баланса органического вещества и элементов минерального питания. Анализ использования удобрений и средств химической мелиорации почв в период интенсивной химизации (1971–1995 гг.) показал, что благодаря их внесению в дозах, превышающих вынос питательных веществ урожаями сельскохозяйственных культур, баланс питательных веществ в земледелии страны был положительным, что способствовало резкому повышению плодородия почв в России, особенно в Нечерноземной зоне [13]. Начиная с 1990-х гг., применение удобрений сократилось. Баланс питательных веществ в земледелии стал складываться со значительным превышением выноса над их поступлением в почву. В Пермском крае с 1966 по 1990 г. насыщенность пашни минеральными удобрениями варьировала от 30 до 97 кг д.в./га, органическими – от 2.0 до 4.3 т/га/год. За последние 20 лет насыщенность пашни минеральными удобрениями составила 10–14 кг д.в., органическими – 0.9–1.4 т/га. Возмещение выноса элементов питания в последние годы составило не более 15%. Нарушение баланса питательных веществ в земледелии приводит к снижению плодородия почвы и урожайности сельскохозяйственных культур.

По данным нашего исследования, в варианте без применения удобрения минерализация органического вещества в почве превысила процессы гумификации в 2 раза, получен отрицательный баланс углерода в почве (–260 кг/га/год) (табл. 5). За 5 ротаций севооборота было потеряно органического углерода >10 т/га. Отрицательный баланс органического углерода получен при применении минеральной системы удобрения и органо-минеральной с невысоким насыщением пашни наво-

Таблица 5. Баланс органического углерода в полевом 8-польном севообороте, т/га (среднее 2-х закладок, 1977–2017 гг.)

Варианты опыта	Приход	Расход	Баланс	
			за ротацию	в год
Контроль	1.8	3.9	–2.1	–0.26
Навоз 10 т/га	4.3	4.2	0.1	0.01
Навоз 20 т/га	6.6	3.9	+2.7	+0.33
NPK эквивалентно 10 т навоза	2.0	4.4	–2.4	–0.30
NPK эквивалентно 20 т навоза	2.0	4.1	–2.1	–0.26
Навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	3.1	4.5	–1.4	–0.18
Навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	4.3	4.3	0.0	0.00
Навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	6.6	3.3	+3.3	+0.41

зом (навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу). Нулевой баланс получен в вариантах с насыщением пашни органическими удобрениями 10 т/га/год (навоз 10 т/га, навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу). Только при высоком насыщении пашни навозом 20 т/год сформировался положительный баланс органического углерода (+330 и +410 кг/га/год).

Среднегодовой вынос азота урожаем сельскохозяйственных культур в контрольном варианте составил ≈60, фосфора – 20 и калия 65 кг/га (табл. 6). При внесении навоза среднегодовой вынос N, P_2O_5 и K_2O увеличился на 15–35%, использовании минеральных удобрений – на 15–40%, при органо-минеральной системе удобрения – на 20–50%. В большей степени наблюдали увеличение потребления азота и калия. Это подтвердил и расчет хозяйственного выноса на 1 т основной продукции (табл. 7). Существенно возрастал при использовании удобрений хозяйственный вынос N и K_2O 1 т зерна озимой ржи, яровой пшеницы и овса, в меньшей степени увеличивался вынос 1 т зерна ячменя и 1 т сена клевера. Для картофеля вынос основных элементов питания в вариантах опыта варьировал незначительно.

Положительный баланс азота и калия сложился в вариантах навоз 20 т/га, NPK эквивалентно 20 т навоза, "навоз 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу, навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. Отрицательный баланс азота и калия в остальных вариантах составил ≈20–35 кг/га/год, компенсация выноса составила 60–80%. Во всех вариантах складывался нулевой или положительный баланс фосфора.

Наиболее высокая интенсивность баланса азота, фосфора и калия (193, 378 и 210% соответственно) отмечена в варианте навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. Однако в этом случае получены самые низкие коэффициенты использования NPK из удобрений. В отдельных ротациях севооборотов КИУ N варьировал от 7 до 27, P_2O_5 – от 4 до 12 и K_2O – от 16 до 18% (в среднем за 5 ротаций КИУ составили 17, 7 и 17% соответственно). Наиболее высокий КИУ азота, фосфора и калия получен при внесении NPK эквивалентно 10 т навоза и внесении навоза 5 т/га + + NPK эквивалентно навозу, полученные коэффициенты в среднем за 5 ротаций были близки к нормативным литературными данным [14]. В отдельных ротациях севооборотов в этих вариантах коэффициент использования азота из удобрений варьировал от 25 до 60, P_2O_5 – от 5 до 20 и K_2O – от 30 до 70%. Снижение коэффициентов использования элементов питания из удобрений при увеличении их доз отмечено в работах [15, 16]. Коэффициенты использования растениями азота и калия из удобрений были в 2–10 раз больше, чем фосфора, что объясняется хорошей растворимостью азотных и калийных удобрений в воде. Наиболее полное использование азота и калия растениями из удобрений подтверждено результатами исследований других авторов [17].

Сложившиеся балансы органического углерода и элементов питания в вариантах опыта согласуются с агрохимическими показателями почвы, установившимися к концу 6-й ротации севооборота. В почве контрольного варианта отмечена тенденция к снижению содержания органического углерода ($\mathbf{C_{орг}}$) с момента закладки опыта в 1968 г. с 1.33 до 1.15%. Поддержание содержания органического углерода на исходном уровне отмечено при внесении навоза 10 и 20 т/га, NPK эквивалентно навозу 20 т/га. Минеральные удобрения могут поддерживать уровень содержания органического вещества в почве благодаря росту количества поступающего органического материала с пожнивными остатками, увеличению разнообразия, численности и активности почвенных микроорганизмов [18–20]. Достоверное увеличение

Таблица 6. Баланс основных элементов питания в полевом 8-польном севообороте, кг/га (среднее 2-х закладок, 1977–2017 гг.)

Вариант	Поступление элемента в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос азота в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса	Коэффициент использования азота из удобрений
			всего	в среднем в год		
	кг/га				%	
Азот*						
Контроль	685	2332	–1647	–41	29	–
Навоз 10 т/га	2136	2763	–627	–16	77	30
Навоз 20 т/га	3544	2903	641	16	122	20
NPK эквивалентно 10 т навоза	2121	2949	–828	–21	72	43
NPK эквивалентно 20 т навоза	3541	3124	418	10	113	28
Навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	2238	2942	–705	–18	76	39
Навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	3654	3188	467	12	115	29
Навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	6440	3329	3111	78	193	17
Фосфор**						
Контроль	60	778	–718	–18	8	–
Навоз 10 т/га	1010	891	119	3	113	12
Навоз 20 т/га	1955	960	996	25	204	10
NPK эквивалентно 10 т навоза	1010	905	105	3	112	13
NPK эквивалентно 20 т навоза	1950	938	1012	25	208	8
Навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	1038	922	116	3	113	15
Навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	2022	986	1036	26	205	11
Навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	3918	1038	2880	72	378	7
Калий**						
Контроль	130	2659	–2529	–63	5	–
Навоз 10 т/га	2199	3298	–1099	–27	67	31
Навоз 20 т/га	4268	3574	694	17	119	22
NPK эквивалентно 10 т навоза	2202	3584	–1382	–35	61	45
NPK эквивалентно 20 т навоза	4226	3729	496	12	113	26
Навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	2288	3638	–1350	–34	63	45
Навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	4407	3913	494	12	113	29
Навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	8549	4064	4485	112	210	17

*С удобрениями, семенами и клевером.
** С удобрениями и семенами.

содержания органического углерода больше исходного уровня отмечено в варианте с максимальной насыщенностью удобрениями – навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу, его содержание возросло на 15%.

Содержание подвижных соединений фосфора в почве контрольного варианта за время проведения опыта уменьшилось незначительно, содержание обменных соединений калия снизилось на 20%. При сложившемся высоком отрицательном балансе данных элементов за 5 ротаций запасы подвижных соединений фосфора в почве снизились всего на 30 кг, а обменных соединений калия – на 80 кг. Это свидетельствовало о том, что в почве происходила мобилизация фосфора и калия из труднодоступных и необменных форм или потребление подвижных форм элементов из подпахотного горизонта. Применение удобрений обеспечило увеличение содержания подвижных соединений фосфора в почве в 1.5–3.0 и обменных форм калия – в 1.2–2.2 раза, их количество повышалось пропорционально увеличению насыщенности пашни удобрениями.

Максимальное достоверное увеличение содержания общего и минерального азота в почве (в 1.2–1.3 раза) отмечено в вариантах с высоким насыщением удобрениями (навоз 20 т/га, NPK эквивалентно навозу 20 т/га, навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу) [21]. По данным [22], на среднесуглинистых почвах, обладающих повышенной емкостью катионного обмена, установлена определяющая роль в питании растений и продуктивности сельскохозяйственных культур нитратного азота, накапливающегося в ранний период вегетации культур. Внесенные минеральные удобрения перед посевом обеспечивали более высокие запасы нитратного азота в почве, что могло быть одной из причин наиболее высокой эффективности минеральной и органо-минеральной систем удобрения в опыте в сравнении с органической системой (табл. 9).

В 1-й ротации севооборота в опыте было проведено известкование (по 1.0 $H_г$), было отмечено существенное улучшение показателей кислотности почвы. Положительное влияние наблюдали в течение 2-х ротаций, с 3-й ротации отмечено увеличение гидролитической кислотности и снижение показателя pH_{KCl}. В 3–6-й ротациях севооборота в контрольном варианте гидролитическая кислотность варьировала в пределах 2.8–3.1 смоль(экв)/кг почвы и стала близка к исходной величине ($H_г$ при закладке опыта до известкования – 3.1, после известкования – 2.4). Показатель pH_{KCl} снизился до 4.9 (pH_{KCl} при закладке

Таблица 7. Хозяйственный вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами 1 т основной продукции, кг (среднее 2-х закладок за 5 ротаций севооборота)

Вариант	Озимая рожь			Пшеница			Клевер 1-го г.п.			Клевер 2-го г.п.			Ячмень			Картофель			Овес		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Контроль	23	9	26	25	10	23	22	4	28	27	6	29	25	10	22	3	1	5	25	10	28
Навоз 10 т/га	26	10	30	28	10	27	24	5	28	26	6	33	26	9	26	3	1	5	28	11	33
Навоз 20 т/га	25	10	30	29	10	28	23	5	30	28	6	33	29	11	31	3	1	5	26	11	33
NPK эквивалентно 10 т навоза	27	10	37	31	10	27	23	5	29	26	6	33	25	9	23	3	1	5	29	10	35
NPK эквивалентно 20 т навоза	29	10	35	33	9	31	23	4	30	25	6	34	24	10	24	3	1	5	31	10	33
Навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	27	10	33	30	10	32	23	4	28	27	6	34	26	10	27	3	1	5	29	10	36
Навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	30	10	36	33	10	34	24	5	31	26	6	36	27	10	27	3	1	5	32	11	37
Навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	30	10	37	36	11	38	24	5	32	26	6	32	27	10	29	3	1	5	34	12	43

Таблица 8. Влияние длительного применения удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы (среднее 2-х закладок, конец 6-й ротации)

Вариант	$C_{орг}$, %	pH_{KCl}	$H_г$, смоль(экв)/кг	P_2O_5	K_2O
				мг/кг	
Контроль	1.15	4.9	2.8	153	142
Навоз 10 т/га	1.33	5.2	2.4	220	212
Навоз 20 т/га	1.41	5.4	2.1	272	228
NPK эквивалентно 10 т навоза	1.26	4.7	3.4	216	225
NPK эквивалентно 20 т навоза	1.31	4.6	3.7	245	320
Навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	1.30	4.9	3.0	227	233
Навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	1.38	4.9	2.9	269	277
Навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	1.53	4.8	3.3	472	387
$НСР_{05}$	0.15	0.2	0.5	30	35

Таблица 9. Влияние длительного применения удобрений на динамику запасов нитратного и аммонийного азота в фазах развития растений яровой пшеницы (0–20 см), кг/га (7-я ротация)

Вариант	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$
	кущение		колошение		перед уборкой	
Контроль	6.0	43.0	5.5	27.5	13.0	56.0
Навоз 10 т/га	9.0	36.0	6.0	33.0	19.0	67.0
Навоз 20 т/га	9.0	35.5	5.0	46.5	20.0	70.0
NPK эквивалентно 10 т навоза	10.0	39.5	4.8	35.0	20.0	45.0
NPK эквивалентно 20 т навоза	24.0	54.5	6.5	43.5	25.5	58.5
Навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу 5 т/га	10.5	40.0	6.3	32.0	27.5	53.5
Навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га	18.0	40.0	6.3	42.5	30.0	74.5
Навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу 20 т/га	29.5	51.0	10.5	30.5	26.0	64.0
$НСР_{05}$	3.5	4.5	1.0	8.0	4.0	$F_ф < F_т$

опыта до известкования – 5.5, после известкования – 6.0). Подкислению почвы способствовал вынос урожаем сельскохозяйственных культур кальция, магния, калия. Подкисление почвы могло быть также связано с климатическими изменениями в регионе и загрязнением окружающей среды, выпадением кислотных дождей [23, 24]. Применение минеральной системы удобрения привело к существенному подкислению почвы, в отдельные ротации отмечено увеличение гидролитической кислотности до 4.0–4.5 смоль(экв)/кг почвы, показатель pH_{KCl} снижался до 4.5. Применение органической системы удобрения обеспечивало улучшение показателей кислотности почвы. Соответственно органо-минеральная система удобрения занимала промежуточное положение по влиянию на показатели гидролитической и обменной кислотности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования в длительном опыте показали, что применение на дерново-подзолистой почве органической системы удобрения (насыщенность пашни навозом 10 и 20 т/га/год) обеспечило увеличение продуктивности полевых культур в севообороте в среднем за 5 ротаций на 15–20%, минеральной (эквивалентно навозу) и органо-минеральной систем удобрения – на 25–30%. Наиболее отзывчивыми на применение удобрений в севообороте были яровая пшеница и картофель. Для яровой пшеницы минеральная система удобрения была более эффективной, чем органическая или органо-минеральная системы. Для картофеля минеральная и органо-минеральная системы удобрения по эффективности были равнозначными и обеспечивали прибавку урожая на 15–20% больше, чем органическая система. Яровой ячмень был наименее отзывчивым среди

культур на применение удобрений, прибавки урожайности не зависели от системы удобрения и не превышали 13% в среднем за 5 ротаций, что было связано с его размещением после хорошего предшественника в севообороте – клевера. Урожайность сена клевера лугового в большей степени зависела от развития и урожая покровной культуры.

Урожайность сельскохозяйственных культур и эффективность применения удобрений зависела от условий увлажнения вегетационного периода. Более высокая урожайность озимой ржи и эффективность применения удобрений для данной культуры получена в более засушливых условиях (ГТК = 0.7–1.0), что объясняется высокой полегаемостью культуры. Яровая пшеница обеспечивала более высокие урожаи без применения удобрений в годы с нормальным увлажнением (ГТК = = 1.0–1.3), овес хорошо себя показывал как в годы с нормальным, так избыточным увлажнением (ГТК >1.3). Максимальная эффективность удобрений для обеих яровых зерновых культур получена при умеренном (нормальном) увлажнении вегетационного периода. Эффективность применения удобрений для ярового ячменя не зависела от условий увлажнения вегетационного периода. Картофель и клевер без применения удобрений обеспечивали более высокую урожайность в годы с избыточным увлажнением. Максимальные прибавки урожайности картофеля от удобрений получены в годы с нормальным и избыточном увлажнением, клевера – при избыточном увлажнении.

Возделывание сельскохозяйственных культур без применения удобрений в течение 40 лет привело к потере из почвы >10 т органического углерода, ≈2300 кг азота, 780 кг фосфора и 2700 кг калия. Высокие отрицательные балансы элементов питания привели к снижению показателей плодородия: отмечено снижение содержания органического углерода на 14%, содержания обменных соединений калия на 20%, ухудшение кислотности почвы относительно исходного уровня. Потери обменных и подвижных соединений элементов питания могли быть еще больше, т.к. в почве происходили постоянные процессы их восполнения из более труднодоступных и необменных форм. Применение всех систем удобрения обеспечило увеличение подвижных соединений фосфора в почве относительно исходного уровня в 1.5–3.0 и обменных форм калия – в 1.2–2.2 раза, их количество повышалось пропорционально увеличению насыщенности пашни удобрениями. Наблюдали достоверное увеличение запасов нитратного азота в почве в начальные фазы развития растений при использовании минеральной и органо-минеральной систем удобрения. Поддержание содержания органического углерода в почве на исходном уровне отмечено при внесении навоза 10 и 20 т/га, NPK эквивалентно навозу 20 т/га. Применение минеральной системы удобрения привело к существенному подкислению почвы, при применении органической системы отмечено улучшение показателей кислотности.

Максимальная продуктивность культур в севообороте, достоверное увеличение содержания органического углерода больше исходного уровня, наибольшее увеличение содержания подвижных соединений фосфора и обменных форм калия отмечено при максимальной насыщенности пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу). Однако в этом случае получены самые низкие коэффициенты использования NPK из удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лапа В.В., Ивахненко Н.Н., Бавтрук А.А.* Продуктивность зернотравянопропашного севооборота и плодородие дерново-подзолистой супесчаной почвы при применении различных систем удобрения // Агрохимия. 2009. № 6. С. 22–31.
2. *Sychev V.G., Naliukhin A.N., Shevtsova L.K., Rukhovich O.V., Belichenko M.V.* Influence of fertilizer systems on soil organic carbon content and crop yield: results of long-term field experiments at the geographical network of research stations in Russia // Euras. Soil Sci. 2020. V. 53. № 12. P. 1794–1808. https://doi.org/10.1134/S1064229320120133
3. *Глазовская М.А., Кречетов П.П., Черницова О.В.* Общие закономерности накопления и возобновления запасов элементов-органогенов в дерново-подзолистых почвах хвойно-широколиственных лесов // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1430–1439.
4. *Коротаев Н.Я.* Почвы Пермской области. Пермь: Кн. изд-во, 1962. 278 с.
5. Агроклиматические ресурсы Пермской области / Под ред. Е.В. Григорчук. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 156 с.
6. *Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В.* Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 252 с.
7. *Лыков М.К.* К методике расчетного определения гумусового баланса почвы в интенсивном земледелии // Изв. ТСХА. 1979. № 3. С. 21–34.
8. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Козлова А.В., Макшакова О.В., Волошин С.П., Хромова О.М., Панкратенкова И.В.* Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2012. № 2. С. 37–46.
9. *Борисоник З.Б.* Ячмень яровой. М.: Колос, 1974. 255 с.

10. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Влияние систем удобрения в севообороте на продуктивность серых лесных почв // Владимир. земледелец. 2011. № 1. С. 15–23.
11. *Федосеев А.П.* Погода и эффективность удобрений. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 144 с.
12. *Сычев В.Г.* Основные ресурсы урожайности сельскохозяйственных культур и их взаимосвязь. М.: ЦИНАО, 2003. 228 с.
13. *Сычев В.Г. Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13. https://doi.org/10.31857/S0002188120060125
14. *Анспок П.И., Штиканс Ю.К., Визла Р.Р.* Справочник агрохимика Нечерноземной полосы. Л.: Колос, 1981. 328 с.
15. *Плотников А.М., Кабдунова Г.С.* Баланс элементов питания и продуктивность зернопарового севооборота при применении минеральных удобрений // Пробл. агрохим. и экол. 2018. № 1. С. 38–41.
16. *Дзюин Г.П., Дзюин А.Г.* Коэффициенты использования азота, фосфора и калия из минеральных удобрений, навоза и почвы культурами севооборота // Международ. журн. эксп. образ-я. 2016. № 5. Ч. 1. С. 83–90.
17. *Дуйшембиев Н.Д., Ахматбеков М.А., Мамбетов К.М.Ш.Б., Жайнакова Г.Л.Б., Эмил У.У.* Коэффициенты использования элементов питания растениями в севообороте, при длительном применении удобрений // Вестн. Кыргыз. нац. аграр. ун-та им. К.И. Скрябина. 2018. № 2 (47). С. 51–58.
18. *Завьялова Н.Е., Косолапова А.И., Сторожева А.Н.* Влияние возрастающих доз полного минерального удобрения на органическое вещество и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2014. № 6. С. 20–28.
19. *Семенов В.М., Когут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
20. *Christopher S.F., Lal R.* Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils // Critic. Rev. Plant Sci. 2007. V. 26. P. 45–64. https://doi.org/10.1080/07352680601174830
21. *Ямалтдинова В.Р., Завьялова Н.Е., Фомин Д.С., Васбиева М.Т.* Влияние систем удобрений на показатели плодородия дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья // Рос. сел.-хоз. наука. 2020. № 1. С. 29–32. https://doi.org/10.31857/S2500-2627-2020-1-29-32
22. *Окорков В.В.* К вопросу о равноценности питания растений нитратным и аммонийным азотом // Агрохимия. 2021. № 12. С. 3–14. https://doi.org/10.31857/S0002188121120103
23. *Шамрикова Е.В. Соколова Т.А., Забоева И.В.* Кислотно-основная буферность органогенных горизонтов подзолистых и болотно-подзолистых почв республики Коми // Почвоведение. 2003. № 7. С. 797–807.
24. *Veremeenko S.I. Furmanets O.A.* Changes in the agrochemical properties of dark gray soil in the Western Ukrainian forest-steppe under the effect of long-term agricultural use // Euras. Soil Sci. 2014. V. 47. P. 483–490. https://doi.org/10.1134/S106422931405024X

Efficiency of Application of Organic, Organo-Mineral and Mineral Fertilizer Systems on Sod-Podzolic Heavy Loamy Soil in Sis-Urals

M. T. Vasbieva[a,#] and V. R. Yamaltdinova[a]

[a]Perm Federal Scientific Center, Ural Branch of the RAS
ul. Kultury, 12, Permskij kraj, s. Lobanovo 614532, Russia
[#]E-mail: vasbievamt15@gmail.com

In a long-term field experiment, laid down in 1968, an assessment of the effectiveness of the use of organic, mineral and organo-mineral fertilizer systems on sod-podzolic heavy loamy soil was carried out. It was found that in the climatic conditions of the Urals, the organic fertilizer system was inferior to the mineral and organo-mineral fertilizer systems in terms of its effect on crop yields. In some rotations of crop rotations, the organo-mineral fertilizer system was more effective, in others – the mineral fertilizer system. The effectiveness of the use of fertilizers depending on the conditions of humidification of the growing season is considered. The balance of organic carbon and basic nutrients in the soil is calculated. Long-term cultivation of agricultural crops without the use of fertilizers led to the loss of >10 tons of organic carbon, ≈2300 kg of nitrogen, 780 kg of phosphorus and 2700 kg of potassium from the soil. High negative balances of basic nutrients in the control variant led to a deterioration in soil fertility indicators. It is shown that the use of all fertilizer systems provided an increase in the content of mobile phosphorus and potassium compounds in the soil relative to the initial level by 1.2–3.0 times. When using organic and organo-mineral fertilizer systems, the maintenance of organic carbon content at the initial level (1.3%) was noted. When using a mineral fertilizer system, the maintenance of the organic carbon content at the initial level was noted only at a higher saturation of the arable land with NPK. The mineral fertilizer system has led to acidification of the soil.

Keywords: sod-podzolic soil, crop rotation productivity, balance of organic carbon and nutrients, HTC, FUR, soil fertility.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 43–52

Удобрения

УДК 633.14:631.82

ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТАЮЩИХ УРОВНЕЙ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА КАЧЕСТВО РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ ЗЕРНА ОЗИМОЙ РЖИ

© 2023 г. А. В. Пасынков[1], Е. Н. Пасынкова[1,*]

[1]Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства "Белогорка" – филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха
188338 п. Белогорка, Гатчинский р-н, Ленинградская обл., Россия

*****E-mail: pasynkova.elena@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.10.2022 г.
После доработки 11.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

Представлены экспериментальные данные изменения основных показателей качества различных фракций зерна озимой ржи, выращенного на фоне возрастающих уровней минерального питания. Исследования показали отсутствие каких-либо статистически значимых зависимостей массы 1000 зерен определенной (конкретной) фракции зерна озимой ржи от уровня минерального питания. При этом зависимость массы 1000 зерен от толщины зерновки максимально точно (по величине R^2) описывалась уравнением 2-го порядка. В отличие от массы 1000 зерен содержание белка и пентозанов, а также величина показателя "число падения" существенно зависели как от уровня минерального питания, так и от толщины зерновки. При этом максимально точно зависимости содержания белка и пентозанов от уровня минерального питания и толщины зерновки отражают уравнения 2-го, а показателя числа падения – 3-го порядка.

Ключевые слова: озимая рожь, уровень минерального питания, фракционирование, решета, масса 1000 зерен, белок, число падения, пентозаны.

DOI: 10.31857/S0002188123030109, **EDN:** KOCLMK

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с государственным стандартом (ГОСТ Р 53049-2008. Рожь. Технические условия) наиболее важными показателями технологических качеств зерна озимой ржи служат "число падения" и натура. Хотя содержание белка и пентозанов, а также масса 1000 зерен не регламентируются ГОСТом Р 53049-2008, определяющим пригодность зерна озимой ржи для хлебопечения, данные показатели в большинстве случаев статистически значимо связаны с "числом падения" [1–7].

Одним из способов регулирования (повышения или снижения) показателей технологических качеств зерна озимой ржи может служить его фракционирование на стандартных решетах с продолговатыми отверстиями [8, 9].

Необходимо отметить, что выполненные ранее исследования [8–13] по выявлению эффективности фракционирования зерна озимой ржи для целей семеноводства и продовольственного использования проводились на одном уровне минерального питания. Не претендуя на полноту изложения данных, имеющихся в научной литературе по данному вопросу, было сделано предположение, что вопросы изменения урожайности и технологических качеств зерна озимой ржи при разделении его на фракции остаются малоизученными. Особенно для выяснения интервала варьирования технологических качеств и их изменений, происходящих под действием различных уровней минерального питания и изменяющихся гидротермических условий в период вегетации. Выяснение зависимостей урожайности и технологических качеств зерна озимой ржи от относительной доли фракций и уровня минерального питания позволит оптимизировать дозы минеральных удобрений и азотных подкормок в период вегетации [14].

Исследования по изучению изменения фракционного состава зерна озимой ржи, выращенного на фоне возрастающих уровней минерального питания, показали, что в контрастные по увлажнению годы изменение урожайности зерна происходило за счет перераспределения относительной доли фракций (%). При этом относительная доля фракций в урожае зерна озимой ржи в текущем (конкретном) году не зависела от уровня минерального питания. С увеличением толщины

зерновки от ее минимальных величин относительная доля фракции в урожае зерна возрастала, однако каждое последующее возрастание толщины зерновки замедляло темпы ее роста и, достигнув точки экстремума, она начинала снижаться. Урожайность (ц/га) всех фракций увеличивалась одновременно с возрастанием уровня минерального питания и толщины зерновки, однако темпы роста урожайности каждой фракции существенно различались в зависимости от размера зерновки. При этом минимальные прибавки урожая зерна по сравнению с предыдущей дозой минеральных удобрений отмечены у самой мелкой и самой крупной фракций, максимальные – у средней фракции зерна 2.2–2.4 мм [14].

Следующий этап исследований – изучение изменений качества различных фракций зерна озимой ржи, выращенного на фоне возрастающих уровней минерального питания. В результате проведения исследований появляется реальная возможность сознательно управлять в желаемом направлении величиной основных показателей качества зерна не только в период вегетации, регулируя уровень минерального питания применением удобрений и азотных подкормок, но и в послеуборочный период, т.к. известно, что различные фракции зерна озимой ржи существенно различаются по биохимическому составу и технологическим качествам [8, 9, 12, 13].

Цель работы – выявить изменения технологических качеств различных фракций зерна короткостебельного сорта озимой ржи, выращенного на фоне возрастающих уровней минерального питания.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование по разделению зерна озимой ржи на фракции проведены с допущенным к использованию короткостебельным сортом Фаленская 4 (совместной селекции Зонального НИИСХ Северо-Востока и Фаленской государственной селекционной станции). Зерно озимой ржи было получено в лаборатории агрохимии Зонального НИИСХ Северо-Востока при проведении полевого опыта [15] на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве и внесении возрастающих доз минеральных удобрений. При фракционировании были использованы образцы зерна озимой ржи, полученные в 6-ти основных вариантах: без удобрений, (NPK)30, (NPK)60, (NPK)90, (NPK)120 и (NPK)150. При проведении полевого опыта фосфорно-калийные ($P_{сд}$ и $K_{кх}$) во всех вариантах и азотные удобрения ($N_{аа}$) в дозах N30 и N60 вносили до посева, а в вариантах с внесением доз азота N90, N120 и N150 – дробно, в 2 срока: N90 (N60 до посева + N30 весной) и N120 (N60 до посева + N60 весной) или в 3 срока: N150 (N60 до посева + N60 весной + N30 трубкование). Более детально условия и методика проведения опыта, откуда отбирали образцы зерна озимой ржи для фракционирования и основные работы по разделению его на фракции, а также некоторые результаты по изменению фракционного состава зерна озимой ржи, выращенного на фоне возрастающих уровней минерального питания, опубликованы ранее в работах [14, 15].

Гидротермические условия в период посев–окончание осенней и в период возобновление весенней вегетации–трубкование существенно не различались и характеризовались избыточным увлажнением (ГТК по Г.Т. Селянинову 1.56–1.84 и 1.52–1.78 соответственно). Гидротермические условия, сложившиеся в период трубкование–цветение, наоборот, существенно различались. В первый год этот период характеризовался избытком влаги (ГТК = 2.12), во второй – недостаточным (ГТК = 1.01), а в третий – нормальным увлажнением (ГТК = 1.38). В репродуктивный период в первый и во второй годы сложились засушливые условия (ГТК = 1.02 и 1.14 соответственно), а в третий – наблюдали резкий недостаток влаги (ГТК = 0.75). Более подробно характеристика гидротермических условий межфазных и всего периода вегетации и их влияние на уровень урожайности и фракционный состав зерна озимой ржи представлены ранее в работе [14].

Определение массы 1000 зерен исходных образцов зерна озимой ржи и выделенных из них фракций проведено в соответствии с ГОСТ 10842-89 “Метод определения массы 1000 зерен или семян”, содержание белка – ГОСТ 10846-91 “Метод определения белка”, показателя “число падения” – ГОСТ 27676-88 “Метод определения “числа падения”, а содержание пентозанов – в соответствии с методом, опубликованным в работе [16]. Статистическая обработка экспериментальных данных проведена методом множественного регрессионного анализа (линейного, полинома половинной степени, 2-го и 3-го порядка) с использованием пакета статистических программ “Statistica 6” (Stat–Soft Inc., США). Основным критерием оценки точности полученных уравнений множественной регрессии принята величина коэффициента детерминации (R^2) [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведение 3-летних исследований по фракционированию зерна озимой ржи на стандартных решетах с продолговатыми отверстиями показало, что величина массы 1000 зерен различных фракций варьировала в сравнительно широких пределах: 11.2–42.9 г, содержание белка ($N_{общ} \times 5.7$)

Таблица 1. Масса 1000 зерен различных фракций зерна озимой ржи, г (среднее за 3 года)

Вариант	Фракция, мм						
	1.5–1.7	1.7–2.0	2.0–2.2	2.2–2.4	2.4–2.6	2.6–2.8	2.8–3.0
000	11.5	17.1	21.5	25.5	30.5	35.8	40.2
111	12.0	16.8	21.8	26.4	30.7	36.0	42.0
222	11.8	16.9	21.3	25.7	30.3	35.1	41.0
333	12.0	17.0	21.7	26.3	31.2	36.0	42.7
444	11.7	16.9	21.2	25.6	30.4	35.4	40.4
555	11.9	17.3	21.4	26.4	30.9	36.2	41.0
Среднее	11.8	17.0	21.5	26.0	30.7	35.7	41.2
2005 г.	11.6	16.8	21.2	25.7	29.8	34.6	41.3
2006 г.	11.7	17.0	21.8	26.8	31.9	36.6	42.4
2007 г.	12.1	17.2	21.5	25.5	30.2	36.0	39.9

Таблица 2. Зависимость показателей технологических качеств зерна озимой ржи (Y) от уровня минерального питания (X_1, код. ед.) и толщины зерновки (X_2, мм) (среднее за 3 года)

Показатель (Y)	Уравнение регрессии ($n = 42$)	R^2	ТЭ
Масса 1000 зерен, г	$Y = -28.029 + 22.759X$	0.993*	–
	$Y = -2.054 + 4.825X_2^2$	0.998*	
Содержание белка, % сухого вещества	$Y = 16.546 + 0.249X_1 + 0.036X_1^2 - 6.131X_2 + 1.496X_2^2 - 0.110X_1X_2$	0.892*	–
Содержание пентозанов, %	$Y = 7.087 + 0.024X_1^2 - 3.993X_2 + 0.838X_2^2 - 0.072X_1X_2$	0.478*	–
“Число падения”, сек	$Y = -994.914 - 0.242X_1^3 + 1278.921X_2 - 457.825X_2^2 + 51.135X_2^3$	0.869*	$ТЭ_1т = 2.26$ $ТЭ_2т = 3.74$

Примечание. X_1 (кодированных единиц): 0 – без удобрений, 1 – (NPK)30, 2 – (NPK)60, 3 – (NPK)90, 4 – (NPK)120, 5 – (NPK)150; $ТЭ_1т$ и $ТЭ_2т$ – соответственно 1-я и 2-я точки экстремума толщины зерновки, мм

и пентозанов – 9.86–12.80 и 1.33–3.91% соответственно, а “число падения” – 67–180 сек (табл. 1, 3–5). Полученные данные подтвердили известное положение о том, что различия по любым признакам и свойствам между сортами одной культуры всегда существенно меньше, чем между контрастными фракциями внутри одного сорта [18].

Так как при проведении фракционирования зерна озимой ржи изученные показатели технологических качеств изменялись в одном и том же направлении, ниже приводится их анализ по усредненным данным за годы проведения исследования. Статистическая обработка полученных данных методом множественного регрессионного анализа показала, что во все годы проведения исследований уровень минерального питания (X_1, код. ед.: 0 – без удобрений, 1 – (NPK)30, 2 – (NPK)60 ... 5 – (NPK)150) оказывал существенное влияние на содержание белка и пентозанов в зерне различных фракций, а также на величину показателя “число падения”, но не оказывал достоверного влияния на массу 1000 зерен (табл. 1, 2).

При этом зависимость массы 1000 зерен от толщины зерновки (X_2, мм) максимально точно (по величине R^2) описывалась уравнением 2-го порядка. С увеличением толщины зерновки масса 1000 зерен возрастала, при этом каждое последующее возрастание толщины зерновки в большей степени повышало массу 1000 зерен по сравнению с предыдущей ($+X_2^2$). Необходимо отметить, что и линейная зависимость между этими показателями статистически значима, но характеризуется несколько меньшей величиной R^2 (табл. 1, 2, рис. 1).

При фракционировании зерна озимой ржи зависимости содержания сырого белка и пентозанов от уровня минерального питания (X_1, код. ед.) и толщины зерновки (X_2, мм) по годам и в среднем за годы проведения исследования максимально точно (по величине R^2) отражали уравнения 2-го порядка, т.к. коэффициенты корреля-

Таблица 3. Содержание белка в зерне различных фракций, % (среднее за 3 года)

Вариант	Фракция, мм						
	1.5–1.7	1.7–2.0	2.0–2.2	2.2–2.4	2.4–2.6	2.6–2.8	2.8–3.0
000	10.2	10.2	10.3	10.5	10.5	11.1	11.3
111	10.9	10.5	10.5	10.6	11.0	11.3	11.4
222	10.8	10.3	10.2	10.4	10.8	11.0	11.7
333	11.1	10.8	10.6	10.7	11.0	11.5	11.8
444	11.3	10.7	10.7	10.8	11.1	11.6	11.9
555	11.7	11.3	11.3	11.4	11.5	11.9	11.9
Среднее	11.0	10.6	10.6	10.8	11.0	11.4	11.7
2005 г.	10.8	10.4	10.3	10.3	10.3	10.6	10.8
2006 г.	11.3	11.0	11.2	11.2	11.6	12.0	12.1
2007 г.	10.9	10.4	10.4	10.7	11.0	11.6	12.1

Таблица 4. Содержание пентозанов в зерне различных фракций, % (среднее за 3 года)

Вариант	Фракция, мм						
	1.5–1.7	1.7–2.0	2.0–2.2	2.2–2.4	2.4–2.6	2.6–2.8	2.8–3.0
000	2.74	2.31	2.33	2.41	2.40	2.34	2.57
111	2.90	2.52	2.11	2.52	2.28	2.45	2.77
222	2.25	2.06	1.78	2.03	2.08	1.85	2.18
333	2.89	2.57	2.07	2.40	1.92	2.04	2.39
444	2.71	2.48	2.28	1.93	1.96	1.99	2.26
555	2.62	2.27	2.07	1.99	2.14	2.09	2.55
Сред.	2.69	2.37	2.11	2.21	2.13	2.13	2.45
2005 г.	3.33	2.71	2.45	2.64	2.53	2.37	2.77
2006 г.	2.30	2.24	1.90	2.09	1.98	2.05	2.19
2007 г.	2.42	2.16	1.98	1.91	1.89	1.96	2.40

Таблица 5. “Число падения” у различных фракций зерна озимой ржи, сек (среднее за 3 года)

Вариант	Фракция, мм						
	1.5–1.7	1.7–2.0	2.0–2.2	2.2–2.4	2.4–2.6	2.6–2.8	2.8–3.0
000	94	150	151	146	145	116	91
111	113	154	153	136	124	120	89
222	102	125	134	142	134	132	84
333	105	128	125	138	128	103	97
444	95	120	138	136	123	101	81
555	81	114	120	124	95	84	67
Среднее	98	132	137	137	125	109	85
2005 г.	117	142	155	143	121	110	91
2006 г.	75	107	114	117	115	87	76
2007 г.	104	146	142	151	139	131	87

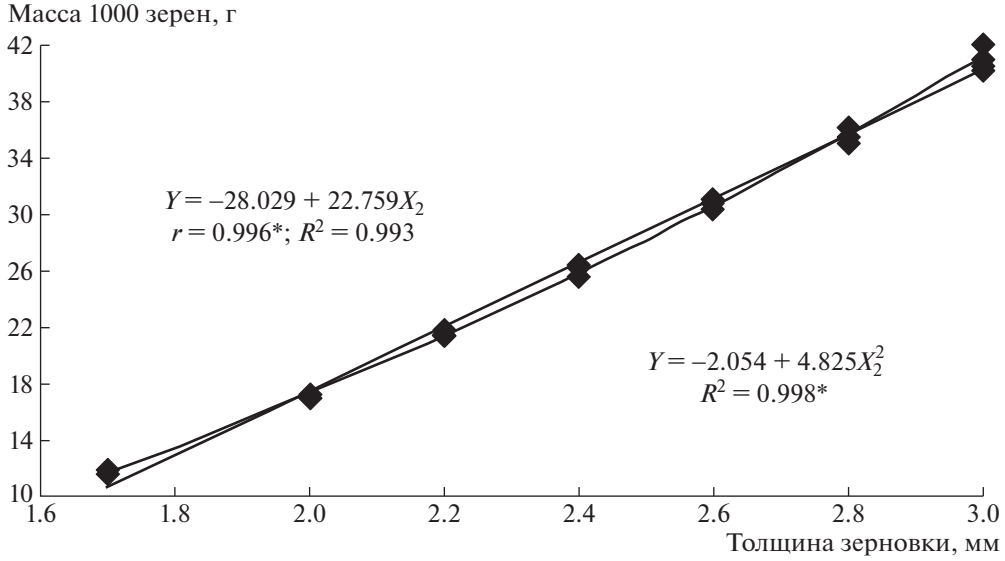

Рис. 1. Зависимость массы 1000 зерен (Y, г) от толщины зерновки (X_2, мм) (среднее за 3 года): $n = 42$, 0.996* – статистически значимо при $p < 0.05$; средняя толщина зерновок во фракции 1.7 мм – варьирование от 1.5 до 1.7 мм, 2.0–1.7–2.0, 2.2–2.0–2.2, 2.4–2.2–2.4, 2.6–2.4–2.6, 2.8–2.6–2.8, 3.0–2.8–3.0 мм, $n = 42$ – общее число наблюдений. То же в табл. 3–6 и на рис. 2.

ции линейных уравнений незначимы на принятом в агрохимических исследованиях уровне значимости ($p < 0.05$), а уравнений половинной степени хотя и значимы, но имеют более низкие их величины, чем уравнения 2-го порядка (табл. 2–4, рис. 2а, б).

На рис. 2 в пределах полученных экспериментальных данных по величине изученных показателей качества зерна озимой ржи представлены графические изображения их зависимостей (Y) (или поверхности отклика функции) от возрастающих уровней минерального питания (X_1, код. ед.) и толщины зерновки (X_2, мм). Анализ уравнений и их графических изображений показал, что с усилением уровня минерального питания содержание белка в зерне различных фракций зерна озимой ржи возрастало. При этом каждое последующее увеличение доз удобрений приводило к более высокой белковости зерна по сравнению с предыдущей ($+X_1 + X_1^2$). С увеличением толщины зерновки содержание белка снижалось, однако каждое последующее увеличение толщины зерновки замедляло темпы роста белковости зерна и, достигнув минимальных величин при размерах решет 1.7–2.0 или 2.0–2.2 мм, содержание белка начинало возрастать ($-X_2 + X_2^2$). Следует отметить, что при одновременном возрастании доз удобрений и толщины зерновки темпы роста белковости зерна снижались ($- X_1X_2$).

Данные, представленные на рис. 2а показали, что минимальное содержание белка (не >10.5%) наблюдается в зерне мелких (1.5–1.7, 1.7–2.0 мм) и средней фракции (2.0–2.2 мм) в контрольном варианте (без внесения удобрений) и при внесении минеральных удобрений не более 60 кг д.в./га. Максимальное содержание белка отмечено в зерне самой мелкой фракции (1.5–1.7 мм) при внесении максимальной дозы удобрений (NPK)150 и у самой крупной фракции (2.8–3.0 мм) во всех вариантах с их применением (11.5–12.0%).

Данные, представленные на рис. 2б, показали, что минимальное содержание водорастворимых пентозанов (2.0–2.2%) отмечено в вариантах с внесением доз минеральных удобрений в интервале (NPK)60–(NPK)150 у средних фракций зерна озимой ржи (2.0–2.2 и 2.4–2.6 мм). Максимальное содержание пентозанов (2.6–2.8%) отмечено в варианте без внесения удобрений у самой мелкой и самой крупной фракций, а также на фоне внесения максимальной дозы удобрений у самой мелкой фракции.

Известно, что величина показателя “число падения” (**ЧП**) существенно снижается в условиях избыточного увлажнения в предуборочный период. Кроме условий увлажнения его величина также зависит от содержания белка в зерне: в большинстве случаев, чем больше его содержание, тем меньше величина данного показателя [1–6]. Различия в гидротермических условиях весенне-летних периодов вегетации привели к формированию существенно различающихся исходных образцов зерна озимой ржи по величине ЧП.

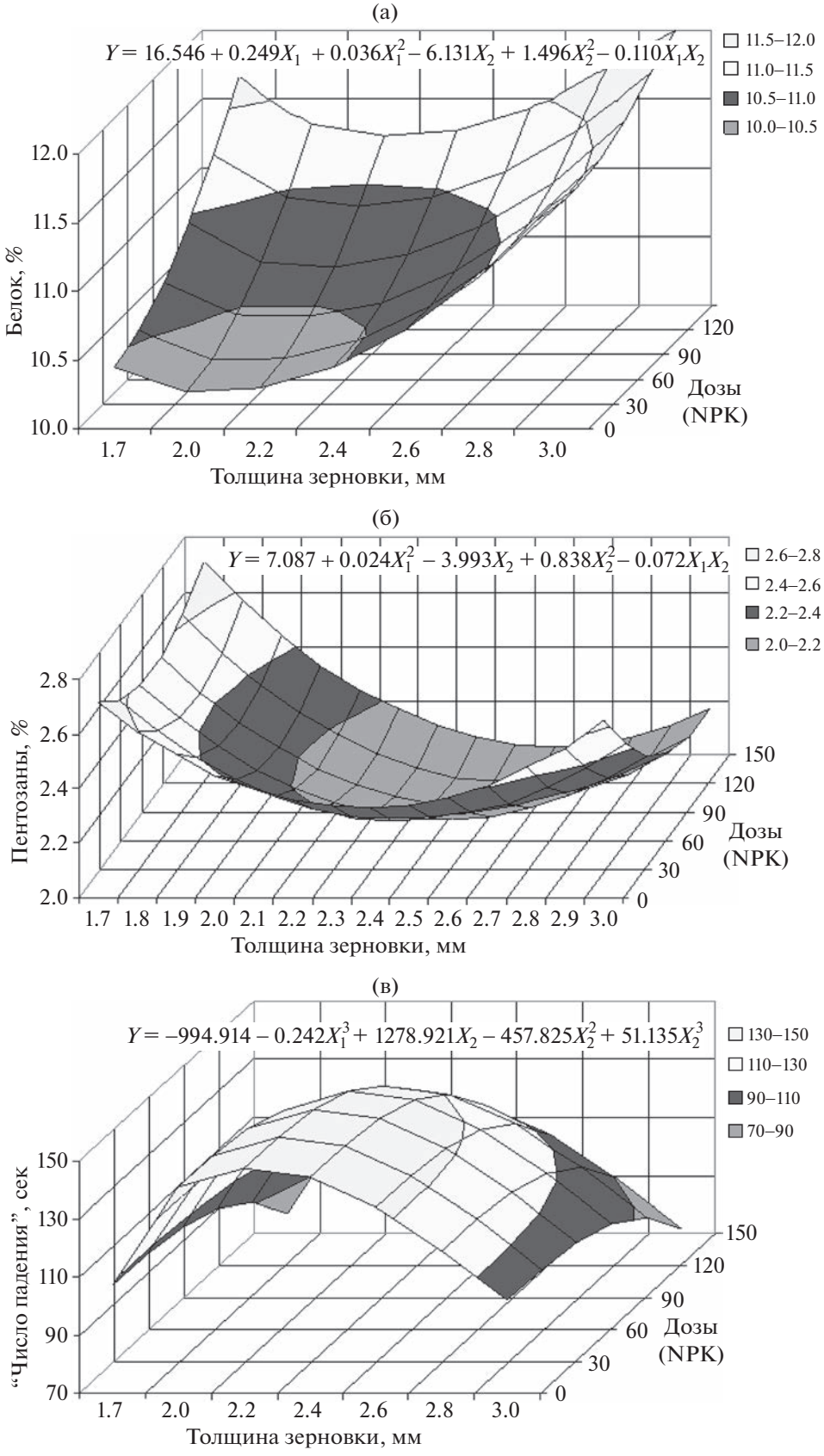

Рис. 2. Зависимость содержания: (а) – белка (*Y*, %), (б) – пентозанов (*Y*, %), (в) – величины "числа падения" (*Y*, сек) от уровня минерального питания (X_1, код. ед.) и толщины зерновки (X_2, мм) (среднее за 3 года).

Согласно ГОСТ 16990-88, в 1-й и 2-й годы проведения исследования по его величине зерно озимой ржи соответствовало III классу (80–140 сек), в 3-й год в 2-х вариантах из 6-ти – III классу, а в оставшихся 4-х вариантах – II классу (140–200 сек) качества (табл. 5, 6).

Фракционирование зерна озимой ржи показало, что во все годы минимальным ЧП характеризовались мелкие и крупные, а максимальным – средние фракции зерна (рис. 2в). Аналогичное явление наблюдали и при проведении исследований с сортом озимой ржи Кировская 89. При этом самые мелкие фракции также характеризовались более высоким ЧП, чем самые крупные [8, 9].

Проведение статистической обработки полученных экспериментальных данных показало, что зависимости показателя ЧП от толщины зерновки по годам и в среднем за годы исследования (табл. 2, рис. 2в) наиболее точно (по величине R^2) отражают уравнения 3-го порядка, т.к. коэффициенты корреляции (r) линейных уравнений и уравнений половинной степени в данном случае статистически незначимы при $p < 0.05$, а уравнений 2-го порядка хотя и значимы, но имеют более низкие величины, чем уравнения 3-го порядка.

С возрастанием уровня минерального питания величина показателя ЧП снижалась. При этом каждая последующая доза удобрений приводила к еще большему снижению величины данного показателя по сравнению с предыдущей ($-X_1^3$). Максимальное же снижение его величины наблюдали при внесении максимальных доз минеральных удобрений (NPK)120 и (NPK)150 (табл. 5, рис. 2в).

С увеличением толщины зерновки от ее минимальных величин ЧП возрастало, однако каждое последующее увеличение толщины зерновки приводило к меньшему его возрастанию по сравнению с предыдущей ($X_2 - X_2^2$) и достигнув первой точки экстремума (2.26 мм) или размеров решет 2.2–2.4 мм, ЧП начинало снижаться. Однако в дальнейшем, каждое последующее увеличение толщины зерновки (>2.26 мм) сопровождалось меньшим снижением ЧП ($-X_2^2 + X_2^3$) и, достигнув 2-й точки экстремума при размерах решет 3.74 мм, ЧП должно возрастать. Как видим, 2-я точка экстремума по величине ЧП находится вне пределов полученных экспериментальных данных.

Итак, исследование показало, что зависимости показателей качества зерна озимой ржи от толщины зерновки при изменении гидротермических условий имели однонаправленный характер. По этой причине фракционирование средних образцов, отобранных от однородных крупных партий и проведение соответствующих анализов позволит определить содержание белка и пентозанов, величину показателя ЧП и массы 1000 зерен (при желании и более широкий спектр показателей) всех выделенных фракций, а статистическая обработка – вид зависимостей перечисленных выше показателей качества от толщины зерновки.

Затем, за счет правильного подбора и установки верхних и (или) нижних решет на зерноочистительных машинах вторичной очистки можно изменить (повысить или снизить) интересующие производителя показатели качества у конкретной партии зерна до регламентируемых ГОСТами или требуемых потребителями кондиций [8, 9]. При этом необходимо иметь в виду, что изменение отдельных показателей качества зерна будет связано с уменьшением веса партии, причем, чем в большей степени будет изменяться (повышаться или снижаться) величина конкретного показателя качества, тем меньше выход зерна или семян [19].

Так как фракции зерна озимой ржи различались по их относительной доле в ежегодном урожае [14], то вполне логичным является определение средневзвешенной величины изученных показателей технологических качеств: массы 1000 зерен, содержания белка и пентозанов, а также показателя ЧП [8, 9].

ГОСТ 10842-89 “Метод определения массы 1000 зерен или семян” регламентирует, что допускаемые расхождения между 2-мя результатами ее определения не должны превышать 6%. Следует отметить, что в государственных стандартах нашей страны используется понятие “допускаемое расхождение” (табл. 6), показывающее максимальную аналитическую ошибку при определении какого-либо показателя – в рассмотренном случае массы 1000 зерен, содержания белка и показателя ЧП.

Средневзвешенные величины массы 1000 зерен варьировали в интервале 27.7–29.9 в 1-й год проведения исследования, 26.0–29.2 и 23.0–23.9 г во 2-й и 3-й годы соответственно. Допускаемые расхождения между массой зерновки исходных образцов и их средневзвешенных величин по годам исследования находились в пределах 1.64–1.81, 1.55–1.69 и 1.36–1.43 г соответственно. Как видим, во всех случаях расхождения между экспериментальными и средневзвешенными величинами массы зерновки не превышали допускаемых расхождений (6%), регламентируемых ГОСТом 10842-89.

ГОСТ 10846-91 “Метод определения белка” регламентирует, что допускаемые расхождения при контрольных определениях общего азота не должны превышать $0.04 + 0.045X$ где X – среднее арифметическое первоначального и контрольного определений (в рассматриваемом случае, соот-

Таблица 6. Экспериментальные (исходные) и средневзвешенные величины основных показателей качества зерна озимой ржи

Вариант	2005 г.	2006 г.	2007 г.	Среднее за 3 года	2005 г.	2006 г.	2007 г.	Среднее за 3 года
	Экспериментальные данные							
	Масса 1000 зерен, г				Содержание общего азота, %			
000	27.3	26.2	22.7	25.4	1.68	2.00	1.69	1.79
111	27. 9	25.9	23.9	25.9	1.79	2.06	1.76	1.87
222	27.4	26.9	23.3	25.9	1.77	2.03	1.75	1.85
333	30.2	27.3	23.6	27.0	1.84	2.11	1.79	1.91
444	28.3	27.0	23.2	26.2	1.86	2.12	1.91	1.96
555	29.9	28.2	23.1	27.1	2.00	2.18	1.96	2.05
	Средневзвешенные величины							
000	27.7	26.0	23.0	25.6	1.79	1.93	1.76	1.83
111	27.8	27.4	23.9	26.4	1.85	1.98	1.83	1.89
222	27.7	26.7	23.5	26.1	1.75	1.94	1.81	1.83
333	29.9	28.2	23.5	27.2	1.85	2.02	1.83	1.90
444	28.7	27.3	23.0	26.4	1.78	2.04	1.93	1.92
555	29.1	29.3	23.1	27.1	1.92	2.09	2.03	2.01
	Допускаемые расхождения							
000	1.6	1.6	1.4	1.5	0.12	0.13	0.12	0.12
111	1.7	1.6	1.4	1.6	0.12	0.13	0.12	0.12
222	1.7	1.6	1.4	1.6	0.12	0.13	0.12	0.12
333	1.8	1.6	1.4	1.6	0.12	0.13	0.12	0.13
444	1.7	1.6	1.4	1.6	0.12	0.13	0.13	0.13
555	1.8	1.7	1.4	1.6	0.13	0.14	0.13	0.13
	Экспериментальные данные							
	Содержание пентозанов, %				“Число падения”, сек			
000	2.30	2.62	1.95	2.29	119	119	156	131
111	2.44	2.28	2.16	2.29	126	119	165	137
222	2.63	1.77	1.87	2.09	126	122	146	131
333	2.87	1.92	1.82	2.20	131	88	175	131
444	2.49	2.14	1.89	2.17	124	93	130	116
555	2.92	2.01	1.91	2.28	104	77	124	102
	Средневзвешенные величины							
000	2.24	2.73	2.07	2.38	134	121	165	142
111	2.51	2.32	2.31	2.40	139	116	148	135
222	2.54	1.64	1.94	1.99	120	124	153	134
333	2.73	1.84	1.88	2.22	113	107	157	126
444	2.43	2.00	1.92	2.08	141	103	130	125
555	2.77	1.77	1.80	2.11	115	88	117	108
	Отклонения*				Допускаемые расхождения			
000	0.06/2.6**	–0.11/–4.2	–0.12/–6.2	–	13***	12	16	14
111	–0.07/–2.9	–0.04/–1.8	–0.15/–6.9	–	13	12	16***	14
222	0.09/3.4	0.13/7.3	–0.07/–3.7	–	12	12	15	13
333	0.14/4.9	0.08/4.2	–0.06/–3.3	–	12***	10***	17***	13
444	0.06/2.4	0.14/6.5	–0.03/–1.6	–	13***	10	13	12
555	0.15/5.1	0.24/11.9	0.11/5.8	–	11	8***	12***	10

*Использованным методом определения пентозанов [16] допускаемые расхождения не регламентированы.
**0.06/2.6 – абсолютные и относительные отклонения, %.
***Указанные величины выходят за пределы допускаемых расхождений, регламентируемых государственным стандартом.

ветственно, исходные и средневзвешенные величины). Данные, представленные в табл. 6, показали, что, как и у массы 1000 зерен, во всех случаях расхождения между экспериментальными и средневзвешенными величинами содержания общего азота были меньше регламентируемых ГОСТом 10846-91 допускаемых расхождений.

ГОСТ 27676-88 "Метод определения ЧП" предусматривает, что при контрольном (повторном) определении данного показателя (в рассматриваемом случае – средневзвешенные величины) допускаются расхождения между ними и первоначальным определением не более 10% от их среднего арифметического. Средневзвешенные величины ЧП по годам исследования варьировали в пределах: 113–141 в первый год, 88–124 и 117–165 сек во 2-й и 3-й годы проведения исследования соответственно (табл. 6). Допускаемые расхождения между ЧП исходных образцов зерна озимой ржи и их средневзвешенных величин по годам находились в пределах 11–13, 8–12 и 12–17 сек соответственно. Как видим, в 1-й и 3-й годы в 3-х случаях и во 2-й год – в 2-х случаях из 6-ти (в сумме 8 из 18 или в 44.4% случаев), расхождения между экспериментальными и средневзвешенными величинами ЧП превышали регламентируемые ГОСТом 27676-88 допустимые расхождения. То есть во все годы практически в половине случаев наблюдали существенные расхождения между ЧП исходных образцов и их средневзвешенных величин, что при проведении фракционирования предполагает индивидуальный подход к каждой партии зерна озимой ржи с учетом экономической эффективности разделения зерна на фракции.

Средневзвешенные величины содержания пентозанов по годам исследования варьировали в пределах 2.24–2.77% в 1-й год проведения исследования, 1.64–2.73 и 1.80–2.31% во 2-й и 3-й годы соответственно (табл. 5). Отклонения между содержанием пентозанов в зерне исходных образцов и их средневзвешенных величин по годам варьировали в пределах – 0.07–0.15, 0.11–0.24 и 0.15–0.11% соответственно в абсолютном выражении или 2.9–5.1, 4.2–11.9 и 6.9–5.8% в относительных единицах. В отсутствии государственного стандарта России на "Метод определения пентозанов" при определении их содержания примененным методом [16] допускаемые расхождения не регламентированы. По этой причине в табл. 5 принят термин "отклонения" экспериментальных величин от средневзвешенных.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что зерно различных фракций озимой ржи неравноценно по содержанию белка и пентозанов, массе 1000 зерен и величине показателя "число падения". Исследование показало отсутствие каких-либо статистически значимых зависимостей массы 1000 зерен определенной (конкретной) фракции зерна озимой ржи от уровня минерального питания. При этом зависимость массы 1000 зерен от толщины зерновки максимально точно (по величине R^2) описывалась уравнением 2-го порядка. В отличие от массы 1000 зерен содержание белка и пентозанов, а также величина показателя "число падения" существенно зависели как от уровня минерального питания, так и от толщины зерновки. При этом максимально точно зависимости содержания белка и пентозанов от уровня минерального питания и толщины зерновки отражали уравнения 2-го, а показателя "число падения" – 3-го порядка.

2. Экспериментальные величины массы 1000 зерен и содержания белка исходных образцов зерна озимой ржи и их средневзвешенные величины (определенные с учетом доли каждой фракции в исходных образцах) практически не различались и находились в пределах допускаемых расхождений, регламентируемых соответствующими ГОСТами. Исключение составил показатель "число падения", у которого обнаружены существенные расхождения между "числом падения" исходных образцов зерна и их средневзвешенных величин, что при проведении фракционирования предполагает индивидуальный подход к каждой партии зерна озимой ржи с учетом экономической эффективности разделения зерна на фракции. Аналогичный (индивидуальный) подход может быть использован при введении ГОСТом допускаемых расхождений при определении пентозанов в случае обнаружения существенных отклонений между содержанием пентозанов в исходных образцах зерна озимой ржи и их средневзвешенных величин.

3. В случае подтверждения полученных зависимостей основных показателей качества зерна озимой ржи от уровня минерального питания и толщины зерновки при генотипических (сортовых) различиях полученные данные могут быть использованы в селекционном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Завалин А.А., Пасынков А.В.* Азотное питание и прогноз качества зерновых культур. М.: ВНИИА, 2007. 208 с.
2. *Krzysztof Marczewski, Henryka Rola, Jolanta Sumisławska, Andrzej Biskupski.* The effect of herbicides on technological quality of grain of winter rye cultivars // Polish J. Agron. 2012. № 8. P. 29–36.
3. *Гончаренко А.А., Ермаков С.А., Макаров А.В., Семенова Т.В.* Многократный дивергентный отбор на вязкость водного экстракта у озимой ржи // Докл. РАСХН. 2016. № 4. С. 3–8.

4. *Пономарева М.Л., Пономарев С.Н., Гильмуллина Л.Ф., Маннапова Г.С.* Изучение содержания пентозанов в зерне популяционных сортов озимой ржи различными методами // Достиж. науки и техн. АПК, 2016. Т. 30. № 12. С. 10–13.

5. *Шаболкина Е.Н., Бишарев А.А., Анисимкина Н.В., Беляева М.В.* Перспективы селекции озимой ржи на хлебопекарные цели // Зерн. хоз-во России. 2018. № 6 (60). С. 60–63. https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-6-59-63

6. *Пономарева М.Л., Пономарев С.Н.* Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи // Вавилов. журн. генет. и селекц. 2019. № 3 (23). С. 320–327. https://doi.org/10.18699/VJ19.426

7. *Шаболкина Е.Н., Бишарев А.А., Анисимкина Н.В., Беляева М.В.* Влияние водорастворимых пентозанов на хлебопекарные свойства озимой ржи // Зерн. хоз-во России. 2019. № 1 (61). С. 49–51. https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-61-1-49-51

8. *Пасынков А.В., Андреев В.Л., Завалин А.А., Пасынкова Е.Н.* Изменение показателей качества зерна озимой ржи при его фракционировании // Достиж. науки и техн. АПК, 2013. № 9. С. 36–40.

9. *Пасынков А.В., Пасынкова Е.Н.* Способ улучшения качества зерна озимой ржи // Наше сел. хоз-во. 2016. № 17 (145). С. 35–39.

10. *Исмагилов Р.Р., Нехороших М.С.* Полевая всхожесть и параметры растений озимой ржи в зависимости от размера семян // Межотрасл. ин-т науки и образ-я. 2014. № 5. С. 39–41.

11. *Исмагилов Р.Р., Нехороших М.С.* Качество семян озимой ржи в зависимости от места его формирования в колосе // Совр. пробл. науки и образ-я. 2014. № 6. С. 16–28.

12. *Исмагилов Р.Р., Гайсина Л.Ф., Нехороших М.С.* Содержание водорастворимых пентозанов в зерне ржи разной фракции // Вестн. БГАУ. 2015. № 1. С. 24–26

13. *Лаптева Н.К.* Фракционная технология подработки озимой ржи для формирования партий зерна с улучшенными хлебопекарными свойствами или с повышенным содержанием крахмала // Аграрн. вестн. Юго-Востока, 2009. № 3. С. 26–28.

14. *Пасынков А.В., Пасынкова Е.Н.* Изменение фракционного состава зерна озимой ржи, выращенного на фоне возрастающих уровней минерального питания // Агрохимия. 2022. № 1. С. 58–65. https://doi.org/10.31857/S0002188121110119

15. *Пасынков А.В., Светлакова Е.В., Котельникова Н.В.* Влияние длительного применения минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, продуктивность севооборота и качество зерна // Агрохимия. 2016. № 10. С. 38–47.

16. *Hashimoto S., Shogren M.D., Pomeranz Y.* Cereal pentosans: Their estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products // Cereal Chem. 1987. V. 64. P. 30–34.

17. *Иванова Т.И.* Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. М.: Агропромиздат, 1989. 235 с.

18. *Мухин В.П.* Получение радиомутантов сои для селекционного процесса. М.: ВЦНТИ, 1983. 22 с.

19. *Пасынкова Е.Н., Завалин А.А., Пасынков А.В., Котельникова Н.В.* Изменение показателей качества зерна пленчатого овса при фракционировании // Рос. сел.-хоз. наука. 2018. № 4. С. 16–20. https://doi.org/10.31857/S250026270000551-1

Effect of Increasing Levels of Mineral Nutrition on the Quality of Various Fractions of Winter Rye Grain

A. V. Pasynkov[a] and E. N. Pasynkova[a,#]

[a] *Leningrad Scientific Research Institute of Agricultural "Belogorka" – Branch of Federal Research Centre of Potato Named after A.G. Lorh Gatchinsky district, Leningrad region, p. Belogorka 188338, Russia*

[#] *E-mail: pasynkova.elena@gmail.com*

Data are presented on the change in the main quality indicators of various fractions of winter rye grain grown against the background of increasing levels of mineral nutrition. Studies have shown the absence of any statistically significant dependences of the weight of 1000 grains weight of a certain (specific) fraction of winter rye grain on the level of mineral nutrition. In this case, the dependence of the 1000 grains weight on the grain thickness was described as accurately as possible (by R^2) by a second–order equation. In contrast to the 1000 grains weight, the content of protein and pentosans, as well as the value of the falling number indicator, significantly depend both on the level of mineral nutrition and on the thickness of the grain. At the same time, the dependencies of the content of protein and pentosans on the level of mineral nutrition and the of the caryopsis reflect the equations of the second, and the falling number indicator, of the third order as accurately as possible.

Key words: winter rye, level of mineral nutrition, fractionation, sieves, 1000 grains weight, protein, falling number, pentosans.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 53–59

Удобрения

УДК 631.82/.86:631.416:631.559:633.2:631.582(470.1/.25)

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

© 2023 г. Н. Т. Чеботарев[1], О. В. Броварова[1,*]

[1]Институт агробиотехнологий им. А.В. Журавского Коми НЦ УрО РАН
Сыктывкар 167023, ул. Ручейная, 27, Россия
**E-mail: olbrov@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.11.2022 г.
После доработки 30.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

В полевом длительном опыте на дерново-подзолистой почве определена эффективность комплексного применения удобрений и их влияние на плодородие почвы и продуктивность однолетних трав в кормовом 6-польном севообороте. Показано, что совместное применение удобрений наиболее эффективно влияло на повышение плодородия дерново-подзолистой почвы и продуктивность викоовсяной смеси. Повышалось количество гумуса на 0.3–0.8%, подвижного фосфора – на 60–140 мг/кг, понижалась обменная и гидролитическая кислотности и содержание обменного калия в почве. Комплексное применение удобрений в высоких дозах, значительно повышало урожайность и качество однолетних трав.

Ключевые слова: почва, кормовой севооборот, органические и минеральные удобрения, гумус, обменная кислотность, продуктивность, сухое вещество, сырой протеин.

DOI: 10.31857/S0002188123030031, **EDN:** KNNMUP

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что плодородие почв определяет продуктивность агроценозов и поддержание экологического равновесия в природе [1, 2]. Увеличение продуктивности агроценозов дерново-подзолистых почв Севера невозможно без совершенствования воспроизводства плодородия почв, а также возделывания сельскохозяйственных культур, адаптированных к региональным почвенно-климатическим условиям [3–5].

Для Республики Коми (**РК**) характерны прохладное и короткое лето, поздние весенние и ранние осенние заморозки, что ослабляет рост растений и снижает потребление питательных веществ [4]. Пахотные угодья РК представлены в основном дерново-подзолистыми почвами, для которых характерно очень низкое естественное плодородие [6]. При резком сокращении объемов применения удобрений и химических мелиорантов они быстро подвергаются деградационным процессам, что сопровождается снижением содержания почвенного органического вещества (**ПОВ**), питательных веществ и ухудшением физико-химических свойств. Для широкого воспроизводства продуктивности агроценозов РК требуются: совершенствование технологий сохранения и воспроизводства плодородия почв, возделывание сельскохозяйственных культур, адаптированных к региональным почвенно-климатическим условиям [7–9], переход от зональной системы земледелия к адаптивно-ландшафтному земледелию и биологизированному кормопроизводству [8, 10–13].

В связи с недостаточными ресурсами органических удобрений и высокой стоимостью минеральных в повышении плодородия почв возрастает роль севооборотов с высокой насыщенностью однолетними и многолетними травами, позволяющими без значительных затрат повышать продуктивность культур [14–17] при высоком качестве сельскохозяйственной продукции [18]. Наиболее полно изучить возможность применения таких севооборотов и оценить влияние вносимых доз удобрений на их продуктивность и качество продукции, рациональное использование мате-

риальных ресурсов и возмещение в почву элементов питания и органического вещества позволяют длительные полевые опыты [15, 19–21], один из которых, заложенный на землях Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, послужил основой для проведения данного исследования. Изучение применения органических и минеральных удобрений в кормовом севообороте проводят более чем 40 лет [8, 15]. Такой подход является важным резервом обеспечения воспроизводства плодородия и продуктивности дерново-подзолистых почв в адаптивно-ландшафтной системе земледелия Республики Коми, сохранения и поддержания его гумусового статуса.

В связи с этим цель работы – изучение влияния комплексного применения удобрений на плодородие пахотных почв, продуктивность и качество культур в 6-польном кормовом севообороте в условиях европейского Севера и выявление закономерностей трансформации почв сельскохозяйственных угодий.

Задачи исследования: оценка продуктивности однолетних трав – 5-го поля кормового севооборота, применения органических и минеральных удобрений, почвенных параметров, а также анализ качества растениеводческой продукции (однолетних трав), его соответствия нормативам (содержание сухого вещества, сырого протеина, фосфора, калия и кальция), оценка изменения агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы при выращивании однолетних трав в 6-польном кормовом севообороте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексные исследования пахотных почв, их физико-химических особенностей, продуктивности однолетних трав выполняли на землях Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, где начиная с 1978 г., проводится длительный полевой опыт с удобрениями в кормовом севообороте согласно методике ВИУА им. Д.Н. Прянишникова и Географической сети опытов с удобрениями. Почва опытного участка – сильноподзолистая легкосуглинистая на покровных суглинках. На начало эксперимента (1978 г.) содержание гумуса варьировало в пределах 2.0–2.5%, pH_{KCl} 4.8–5.6, сумма поглощенных оснований – 10.3–16.8 ммоль/100 г почвы, содержание подвижных форм фосфора – 190–240, калия – 146–190 мг/кг почвы.

В 1978–2019 гг. изучали влияние различных доз минеральных удобрений (расчетная, 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 однолетних трав в 6-польном кормовом севообороте со следующим чередованием культур: картофель–однолетние травы + + многолетние травы–многолетние травы 1 года пользования (**г.п.**)–многолетние травы 2 г.п.–однолетние травы–картофель. Органические удобрения вносили осенью в период с 1977–2018 г. в чистом виде и на фоне действия минеральных удобрений. Также в 2018 г. для снижения обменной и гидролитической кислотности проведено известкование известняковой муки по полной гидролитической кислотности (8.0 т/га). Расчетные дозы NPK под однолетние травы на запланированный урожай (20.0 т/га) составили: N13P11K39 (1/3 дозы), N20P16K58 (1/2 дозы), N40P32K116 (полная расчетная доза). Площадь опытной делянки 100 м^2 (12.5 × 8 м), повторность опыта четырехкратная, площадь участка под опытом 4800 м^2.

Схема опыта, варианты:

1. Контроль без удобрений
2. N13P11K39(1/3 NPK)
3. N20P65K58 (1/2 NPK)
4. N40P32K116 (1 NPK)
5. ТНК 40 т/га (фон 1)
6. фон 1 + 1/3NPK
7. фон 1 + 1/2NPK
7. фон 1 + 1NPK
9. ТНК 80 т/га (фон 2)
10. фон 2 + 1/3NPK
11. фон 2 + 1/2NPK
12. фон 2 + 1NPK

Полевые и лабораторные исследования (фенологические наблюдения в фазах развития растений, учет урожая однолетних трав в фазе полного цветения вики, определение сухого вещества и сырого протеина (по результатам химического анализа растений) в урожае однолетних трав) выполняли по методикам, принятым в агрохимической службе и почвоведении, по рекомендациям [9, 13, 20, 21]. Отбор почвенных образцов в пахотном горизонте на опытных делянках проводили после уборки однолетних трав.

На станции химизации “Сыктывкарская” и Институте агробиотехнологий им. А.В. Журавского в растениях вики и овса определии: азот общий – фотоколометрическим методом, фосфор – по ГОСТу 26657-97 фотометрическим методом, калий – методом пламенной фотометрии после сухого озоления, кальций – трилонометрическим методом, сырой протеин – расчетным методом, нитратный азот – ионометрическим методом.

В образцах почв определение величины pH водной и солевых вытяжек проводили иономет-

рическим методом, обменной кислотности – по Соколову. Содержание фосфора определяли колориметрическим методом по Кирсанову, калия – методом пламенной фотометрии, обменных катионов кальция и магния – в ацетатно-аммонийной вытяжке (pH 7.0) с последующим определением на атомно-эмиссионном спектрофотометре ICP-Spectro ciros. Содержание гумуса определяли по Тюрину, фракционно-групповой состав гумуса – методом Тюрина в модификации Пономаревой–Плотниковой [9].

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение различных доз органических и минеральных удобрений и их совместное использование в длительных исследованиях оказало существенное влияние на агрохимические показатели дерново-подзолистой среднеокультуренной почвы (табл. 1). Длительное применение органических и минеральных удобрений и их совместное внесение в различной степени воздействовали на агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы.

Использование 3-х доз минеральных удобрений в течение длительного времени обеспечивало среднее содержание гумуса до 2.3–2.7%, совместное применение ТНК 40 т/га + 3 дозы NPK – 2.4–2.5%, ТНК 80 т/га + 3 дозы NPK – 2.3–2.7% и 2-х доз органических удобрений – 2.6%. В контрольном варианте среднее содержание гумуса составило 2.1%. Накопление гумуса в почве происходило прежде всего за счет трансформации органических удобрений, а также корне-пожнивных остатков культур, особенно бобово-злаковых травосмесей под действием почвенных микроорганизмов.

Исходная кислотность почвы (1978 г.) составляла 4.8–5.6. В течение длительного времени удавалось сохранить обменную кислотность на уровне 5.0–5.5, но к 2013 г. она повысилась до уровня pH_{KCl} 4.4–5.3, поэтому в 2018 г. было проведено известкование опытного участка по полной гидролитической кислотности (8.0 т/га), что позволило снизить обменную кислотность. Средняя обменная кислотность за годы исследования при применении 3-х доз NPK составила 4.9–5.0, 2-х доз ТНК – 5.2 ед. pH_{KCl}. Применение 3-х доз NPK на фоне ТНК 40 т/га снижало обменную кислотность до 4.9–5.0, на фоне ТНК 80 т/га она составила 5.2–5.3.

Органические и минеральные удобрения, а также корне-пожнивные остатки растений и их трансформация под воздействием почвенных микроорганизмов способствовали накоплению в почве подвижного фосфора. Наиболее значительные количества подвижного фосфора накапливались при совместном применении органических и минеральных удобрений (291–234 мг/кг почвы), а также при использовании двух доз ТНК (280 и 306 мг/кг почвы). В варианте без удобрений его количество составило 213 мг/кг почвы.

Обменный калий в почве накапливался в меньшей степени, чем подвижный фосфор. Наименьшее его количество отмечено в 2013 г. (66–98 мг/кг почвы), но после проведения известкования в 2019 г. его объемы повысились до 105–136 мг/кг. Незначительное накопление обменного калия в почве объяснялось его высоким выносом растениями и вымыванием по профилю почвы.

Научные исследования в течение 42 лет (7 ротаций севооборота – 1978–2019 гг.) показали высокую эффективность комплексного применения удобрений (табл. 2). Наибольшая средняя урожайность сухого вещества однолетних трав получена в варианте ТНК 80 т/га + 1 NPK и составила 4.9 т сухого вещества (**с.в.**)/га и на 96.4% превышала контроль (2.5 т с.в./га). В вариантах ТНК 40 т/га + 1/3 и 1/2 NPK урожайность была равна 3.7 и 4.0 т/га и на 48.0 и 60.1% превышала контрольный вариант, а при использовании ТНК 80 т/га + 1/3 NPK и 1/2 NPK урожайность трав равнялась 4.0 и 4.5 т с.в./га и на 68.2 и 80.2% превышала контроль.

Применение 3-х доз NPK (1/3, 1/2 и 1 NPK) повышало урожайность однолетних трав до 3.4–3.9 т/га (на 36.0–56.2% больше контроля) и была значительно меньше, чем при использовании комплексного применения удобрений.

Среднее содержание сухого вещества в продукции однолетних трав значительно различалось. С повышением доз минеральных удобрений оно снижалось на 1–3%. Наименьшее его количество отмечено в варианте ТНК 80 т/га + 1NPK и составило 19.5% тогда как в варианте без удобрений оно равнялось 22.5%.

Количество сырого протеина в однолетних травах варьировало от 10.8 до 14.7%. Наиболее значительное количество сырого протеина получено в продукции трав, выращенных при комплексном применении удобрений и было равно 12.1–14.7%, в контроле – 11.1%. Содержание фосфора изменялось от 0.33 до 0.39%, калия – от 2.3 до 3.0% и кальция – от 0.50 до 0.60%, в контроле – 0.31, 2.3 и 0.48% соответственно.

Нитратный азот важен для питания растений, но в то же время представляет опасность: в нашем

Таблица 1. Влияние органических и минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы, слой 0–20 см (1983–2019 гг.)

Вариант	Гумус, %								$H_г$, ммоль/100 г почвы							
	1	2	3	4	5	6	7	Среднее	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
Без удобрений (контроль)	2.1	2.0	2.1	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	3.1	3.2	3.4	3.3	3.2	4.0	5.4	3.6
1/3 NPK	2.3	2.3	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.3	3.7	3.6	3.6	3.6	3.5	3.7	5.1	3.8
1/2 NPK	2.5	2.4	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3	2.4	3.4	3.4	3.3	3.4	3.4	3.6	5.1	3.7
1 NPK	2.5	2.4	2.5	2.5	2.5	2.2	2.4	2.4	3.4	3.4	3.5	3.4	3.5	3.5	5.3	3.7
ТНК 40 т/га (фон 1)	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.8	3.2	2.6	3.7	3.5	3.3	3.3	3.4	3.4	4.8	3.6
Фон 1 + 1/3 NPK	2.4	2.4	2.5	2.4	2.4	2.7	2.6	2.5	3.7	3.5	3.3	3.3	3.3	3.0	5.0	3.6
Фон 1 + 1/2 NPK	2.4	2.4	2.5	2.4	2.5	2.6	2.8	2.5	3.4	3.5	3.6	3.5	3.5	3.1	5.1	3.7
Фон 1 + 1 NPK	2.1	2.2	2.3	2.2	2.3	2.4	3.0	2.4	3.9	3.6	3.5	3.6	3.5	3.0	4.9	3.7
ТНК 80 т/га (фон 2)	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.8	3.3	2.6	3.7	3.5	3.4	3.5	3.4	2.3	4.6	3.5
Фон 2 + 1/3 NPK	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.3	3.8	3.7	3.6	3.7	3.6	1.8	4.8	3.6
Фон 2 + 1/2 NPK	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6	2.9	2.8	2.7	3.9	3.6	3.2	3.4	3.3	1.6	4.6	3.4
Фон 2 + 1 NPK	2.3	2.5	2.6	2.5	2.5	2.8	2.6	2.5	3.6	3.5	3.4	3.4	3.5	1.5	4.7	3.4
$НСР_{05}$	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	–	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	–

Вариант	pH_{KCl}, ед.								P_2O_5, мг/кг почвы							
	1	2	3	4	5	6	7	Среднее	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
Без удобрений (контроль)	5.5	5.3	5.0	5.2	5.0	4.2	4.1	4.9	225	218	220	244	232	186	165	213
1/3 NPK	5.6	5.3	4.9	5.0	5.1	4.4	4.4	5.0	198	220	238	325	241	262	195	227
1/2 NPK	5.6	5.4	5.0	5.0	5.2	4.7	4.5	5.0	194	261	325	320	288	284	217	256
1 NPK	5.4	5.2	4.8	4.9	5.1	4.8	4.4	4.9	208	324	341	340	324	316	235	298
ТНК 40 т/га (фон 1)	5.2	5.2	5.3	5.2	5.3	5.5	4.5	5.2	225	345	360	354	341	328	187	306
Фон 1 + 1/3 NPK	5.3	5.2	5.0	5.0	5.1	5.4	4.4	5.0	230	355	388	371	366	341	204	322
Фон 1 + 1/2 NPK	5.2	5.1	4.9	4.9	5.0	5.4	4.5	5.0	210	287	319	294	320	357	242	290
Фон 1 + 1 NPK	4.8	4.9	5.0	4.9	5.1	5.3	4.6	4.9	190	255	324	317	315	388	254	292
ТНК 80 т/га (фон 2)	5.3	5.2	5.3	5.2	5.3	5.7	4.7	5.2	207	280	320	310	312	307	222	280
Фон 2 + 1/3 NPK	5.1	5.4	5.5	5.4	5.4	5.4	4.6	5.2	192	258	346	328	321	334	256	291
Фон 2 + 1/2 NPK	5.2	5.3	5.4	5.4	5.5	5.5	4.7	5.3	240	334	358	342	328	349	274	318
Фон 2 + 1 NPK	5.3	5.2	52	5.3	5.4	5.6	4.8	5.3	232	321	364	355	344	364	289	324
$НСР_{05}$	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	–	23	34	37	35	33	37	26	–

Вариант	K_2O, мг/кг почвы							
	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
Без удобрений (контроль)	133	126	122	131	125	81	49	110
1/3 NPK	125	148	137	142	140	158	66	131
1/2 NPK	136	182	164	156	155	167	70	147
1 NPK	207	188	174	177	164	185	89	169
ТНК 40 т/га (фон 1)	152	174	165	168	162	191	62	153
Фон 1 + 1/3 NPK	180	179	163	172	168	198	70	161
Фон 1 + 1/2 NPK	220	194	188	180	177	212	72	177
Фон 1 + 1 NPK	226	248	231	226	215	216	81	206
ТНК 80 т/га (фон 2)	181	195	188	182	177	204	67	171
Фон 2 + 1/3 NPK	215	245	226	217	210	211	82	201
Фон 2 + 1/2 NPK	226	288	275	246	231	221	87	225
Фон 2 + 1 NPK	233	258	266	255	248	228	98	267
$НСР_{05}$	23	25	20	18	18	23	8	–

Примечание. В графе 1 – 1983 г., 2 – 1989 г., 3 – 1995 г., 4 – 2001 г., 5 – 2007 г., 6 – 2013 г., 7 – 2019 г. То же в табл. 2.

Таблица 2. Влияние органических и минеральных удобрений на урожайность и качество однолетних трав

Вариант	Урожайность, т с.в./га									Сухое вещество, %							
	1	2	3	4	5	6	7	Среднее	Прибавка к контролю, %	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
Без удобрений (контроль)	3.2	2.1	2.4	2.5	2.8	2.2	2.6	2.5	–	20.2	25.8	21.9	22.4	18.8	23.4	25.2	22.5
1/3 NPK	4.2	3.1	29	3.7	3.6	2.6	2.9	3.4	36.0	20.7	23.9	21.3	21.7	18.0	23.7	25.3	22.1
1/2 NPK	3.8	4.0	4.0	3.9	3.6	2.9	3.4	3.6	44.0	17.6	23.2	20.3	20.8	16.4	23.6	24.4	20.9
1 NPK	3.8	3.9	4.4	4.2	4.2	3.3	3.9	3.9	56.2	16.2	22.3	20.2	21.3	17.5	22.2	24.0	20.5
ТНК 40 т/га (фон 1)	3.4	2.8	3.3	3.2	3.8	2.8	3.2	3.2	28.3	19.5	25.0	21.0	22.4	18.8	24.2	24.5	22.2
Фон 1 + 1/3 NPK	4.3	4.1	4.0	4.0	4.0	3.0	2.8	3.7	48.0	18.8	24.4	19.5	20.8	19.6	22.7	21.6	21.0
Фон 1 + 1/2 NPK	4.0	4.5	4.8	4.7	4.2	3.2	4.1	4.2	68.2	16.9	23.5	20.7	21.6	17.8	22.4	20.8	20.5
Фон 1 + 1 NPK	4.6	4.9	5.4	5.2	4.3	3.4	4.4	4.6	84.3	17.6	24.1	20.2	22.3	20.0	25.2	20.6	21.4
ТНК 80 т/га (фон 2)	2.2	3.7	4.0	3.9	4.1	3.3	3.6	3.5	40.2	19.1	24.8	22.0	20.6	18.6	22.2	19.8	21.0
Фон 2 + 1/3 NPK	3.1	3.9	4.5	4.4	4.2	3.5	4.2	4.0	60.1	18.2	23.3	20.4	20.7	20.7	22.2	18.8	20.6
Фон 2 + 1/2 NPK	3.4	4.6	5.6	5.3	4.3	3.8	4.4	4.5	80.2	17.8	23.1	19.2	19.6	17.2	22.4	17.6	19.6
Фон 2 + 1 NPK	3.5	5.3	5.8	5.6	4.5	4.1	5.6	4.9	96.4	16.5	23.1	19.4	19.1	16.1	21.8	20.3	19.5
HCP_{05}	0.42	0.54	0.56	0.45	0.43	0.39	0.37	–	–	1.82	2.54	2.14	2.25	1.86	2.34	2.56	–

Вариант	Сырой протеин, %								Фосфор, %							
	1	2	3	4	5	6	7	Среднее	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
Без удобрений (контроль)	7.5	10.0	12.5	12.1	11.9	11.4	12.2	11.1	0.25	0.31	0.28	0.31	0.34	0.33	0.32	0.31
1/3 NPK	9.4	11.9	13.1	13.2	11.5	11.6	13.8	12.1	0.35	0.33	0.29	0.33	0.37	0.36	0.35	0.34
1/2 NPK	11.2	13.1	14.4	14.1	13.7	12.0	14.6	13.3	0.50	0.33	0.31	0.28	0.45	0.41	0.43	0.39
1 NPK	11.9	13.1	15.0	14.6	11.4	11.2	16.3	13.3	0.46	0.33	0.34	0.33	0.40	0.39	0.42	0.38
ТНК 40 т/га (фон 1)	8.1	10.6	13.1	13.0	11.7	11.2	17.1	12.1	0.28	0.34	0.30	0.32	0.35	0.33	0.36	0.33
Фон 1 + 1/3 NPK	8.7	10.6	13.8	13.2	13.0	11.1	20.0	12.9	0.32	0.31	0.34	0.32	0.40	0.38	0.41	0.35
Фон 1 + 1/2 NPK	10.6	11.9	13.8	12.5	11.4	12.3	20.3	13.2	0.41	0.34	0.34	0.35	0.36	0.35	0.30	0.35
Фон 1 + 1 NPK	11.2	13.0	15.0	14.2	12.4	12.8	20.8	14.2	0.40	0.35	0.34	0.34	0.45	0.40	0.44	0.39
ТНК 80 т/га (фон 2)	10.6	10.6	12.5	10.9	11.4	12.4	19.9	12.6	0.32	0.32	0.36	0.32	0.40	0.38	0.38	0.35
Фон 2 + 1/3 NPK	10.0	10.6	13.1	10.8	13.0	12.0	182	10.8	0.30	0.34	0.33	0.33	0.45	0.39	0.41	0.36
Фон 2 + 1/2 NPK	10.0	131	14.4	13.2	11.0	13.5	20.3	13.6	0.33	0.34	0.33	0.34	0.38	0.37	0.38	0.35
Фон 2 + 1 NPK	12.5	13.7	14.4	14.3	13.6	14.0	20.3	14.7	0.41	0.35	0.34	0.35	0.43	0.41	0.42	0.39
HCP_{05}	1.2	1.3	2.0	1.3	1.3	1.2	2.1	–	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	–

Таблица 2. Окончание

Вариант	Калий, %								Кальций, %							
	1	2	3	4	5	6	7	Среднее	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
Без удобрений (контроль)	1.9	2.5	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.3	0.56	0.55	0.45	0.43	0.45	0.48	0.44	0.48
1/3 NPK	2.1	2.7	2.5	2.6	2.5	2.4	2.3	2.4	0.63	0.58	0.58	0.56	0.52	0.50	0.52	0.55
1/2 NPK	2.1	2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.5	0.73	0.60	0.56	0.58	0.56	0.54	0.54	0.59
1 NPK	2.4	2.9	3.0	2.8	2.58	2.7	2.7	2.8	0.80	0.62	0.54	0.56	0.58	0.57	0.56	0.60
ТНК 40 т/га (фон 1)	2.2	2.4	2.3	2.4	2.4	2.3	2.4	2.3	0.62	0.45	0.50	0.49	0.48	0.50	0.49	0.50
Фон 1 + 1/3 NPK	2.1	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.5	2.5	0.68	0.54	0.52	0.52	0.50	0.52	0.50	0.54
Фон 1 + 1/2 NPK	2.2	2.6	2.5	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	0.71	0.60	0.56	0.58	0.55	0.56	0.57	0.59
Фон 1 + 1 NPK	2.2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.5	2.5	0.75	0.58	0.57	0.57	0.58	0.59	0.58	0.60
ТНК 80 т/га (фон 2)	2.1	2.5	2.4	2.4	2.4	2.6	2.4	2.4	0.65	0.49	0.57	0.61	0.60	0.62	0.61	0.59
Фон 2 + 1/3 NPK	2.3	2.9	2.8	2.8	2.7	2.5	2.7	2.7	0.64	0.54	0.45	0.48	0.51	0.54	0.53	0.63
Фон 2 + 1/2 NPK	2.5	2. 8	2.7	2.7	2.8	2.7	2.7	2.7	0.65	0.58	0.52	0.52	0.53	0.56	0.54	0.56
Фон 2 + 1 NPK	2.5	3.0	3.1	3.0	3.0	3.1	3.0	3.0	0.65	0.62	0.56	0.60	0.58	0.61	0.60	0.60
$НСР_{05}$	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	–	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	–

исследовании количество нитратного азота варьировало от 34 до 194 мг/кг сырой массы, и это не представляло угрозы загрязнения нитратами биомассы однолетних трав, т.к. его ПДК составляет 500 мг/кг сырой массы, а содержание нитратного азота в биомассе растений было значительно меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате длительного (1978–2019 гг.) использования органических и минеральных удобрений в посевах однолетних трав установлено, что комплексное длительное применение удобрений положительно влияло на содержание гумуса в почве. При использовании NPK на фоне внесения торфо-навозного компоста (ТНК) в дозах 40 и 80 т/га повышалось количество гумуса в почве до 2.3–2.7%, в контроле – 2.1%. Минеральные удобрения повышали его количество до 2.3–2.4, органические – до 2.6%. Подобная закономерность отмечена и для обменной и гидролитической кислотности. Наиболее низкая обменная и гидролитическая кислотность установлена при внесении ТНК 80 т/га + 1 NPK и составила 5.2–5.3 ед. pH_{KCl} и 3.4–3.6 ммоль/100 г почвы соответственно. Подобная закономерность отмечена и для содержания подвижного фосфора, калия и кальция в почве.

Установлена высокая эффективность комплексного длительного применения удобрений. Наибольшая урожайность однолетних трав получена при совместном применении органических и минеральных удобрений (3.7–4.9 т сухого вещества/га) при использовании 3-х доз NPK – 3.4–3.9 т/га и 2-х доз ТНК (40 и 80 т/га) – 3.2 и 3.5 т сухого вещества/га.

Отмечено, что наиболее эффективно на качество однолетних трав влияло совместное применение органических и минеральных удобрений, особенно в высоких дозах. Совместное применение ТНК 80 т/га и 1 NPK снижало содержание сухого вещества до 19.5% (в контроле – 22.5%), повышало содержание сырого протеина в однолетних травах до 14.7% (в контроле – 11.1%), увеличивало содержание фосфора, калия и кальция в биомассе.

Установлено, что оптимальным приемом удобрения однолетних трав в кормовом севообороте Республики Коми является внесение ТНК 80 т/га (под картофель) и полной дозы NPK (N40P32K116), что позволяет получать максимальные урожаи трав высокого качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косолапов В.М.* Роль кормопроизводства в обеспечении продовольственной безопасности России // Адаптив. кормопроиз-во. 2010. № 1. С. 16–19.
2. *Чеботарев Н.Т.* Об эффективности использования удобрений при возделывании кормовых культур в условиях Республики Коми // Кормопроизводство. 2012. № 8. С. 32–33.
3. *Минеев В.Г.* Агрохимия. М.: Изд-во МГУ, 2006. 720 с.
4. *Заболоцкая Т.Г., Юдинцева И.И., Кононеко А.В.* Северный подзол и удобрения. Сыктывкар, 1978. 94 с.
5. *Войтович Н.В., Лобода Б.П.* Оптимизация минерального питания в агроценозах Центрального Нечерноемья. М.: НИИСХ ЦРНЗ, 2005. 193 с.
6. *Забоева И.В.* Почвы и земельные ресурсы Коми АССР / Под ред. Герасимова И.П. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1975. 344 с.
7. *Заболоцкая Т.Г.* Биологический круговорот элементов в агроценозах и их продуктивность. Л.: Наука, 1985. 179 с.
8. *Чеботарев Н.Т.* Об эффективности использования удобрений при возделывании кормовых культур в условиях Республики Коми // Кормопроизводство. 2012. № 8. С. 32–33.
9. *Пономарева В.В., Плотникова Т.А.* Гумус и почвообразование / Под ред. Орлова Д.С. Л.: Наука, 1980. 222 с.
10. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Козлова А.В., Макшакова О.В., Волошин С.П., Хромова О.М., Панкратенкова И.В.* Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2012. № 2. С. 37–46.
11. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Овчинникова М.Ф.* Плодородие и биологическая активность дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений и их последействии // Агрохимия. 2004. № 7. С. 5–10.
12. *Лапа В.В., Босак В.Н., Пироговская Г.В.* Влияние органо-минеральной системы удобрения на продуктивность севооборотов и баланс гумуса в дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2009. № 2. С. 40–44.
13. *Шоба С.А.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
14. *Изместьев В.М., Свечников А.К.* Влияние длительного применения минеральных удобрений на продуктивность кормовых севооборотов // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 1 (44). С. 29–34.
15. *Чеботарев Н.Т., Юдин А.А.* Динамика плодородия и продуктивности дерново-подзолистой почвы под действием длительного применения удобрений в условиях Республики Коми // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 2. С. 11–13.
16. *Чеботарев Н.Т., Шморгунов Г.Т., Лаптева Е.М., Ермолина В.И., Кормановская В.М.* Влияние длительного применения удобрений на содержание, фракционный состав и баланс гумуса в дерново-подзолистых почвах европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2009. № 10. С. 11–16.
17. *Бакина Л.Г., Дричко В.Ф., Небольсина З.П.* Влияние известкования на изменение состава гумуса дерново-подзолистых почв в зависимости от химических свойств их гуминовых кислот // Агрохимия. 2012. № 1. С. 14–23.
18. *Мухамадьяров Ф.Ф., Фигурин В.А., Ашихмин В.П., Коробицин С.Л., Кокурин Т.П., Халтурин В.С., Кодочигова В.В., Плетнев Н.А.* Методическое пособие по определению энергозатрат при производстве продовольственных ресурсов и кормов для условий Северо-Востока европейской части Российской Федерации. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1997. 62 с.
19. *Dymov A.A., Dubrovskiy Y.A., Startsev V.V.* Postagrogenic development of Retisols in the middle taiga subzone of European Russia (Komi Republic) // Land Degrad. Develop. 2018. V. 29. № 3. P. 495–505.
20. *Соколов А.В.* Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
21. *Воробьева Л.А.* Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

Effect of Long-Term Use of Organic and Miineral Fertilizers on the Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soils and Productiviny of Annual Grasses in the Fodder Crop Rotation of the European North

N. T. Chebotarev[a] and O. V. Brovarova[a,#]

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

[#] *E-mail: olbrov@mail.ru*

In a field long-term experiment on sod-podzolic soil, the effectiveness of the complex application of fertilizers and their effect on soil fertility and productivity of annual grasses in the feed 6-pole crop rotation was determined. It is shown that the combined use of fertilizers most effectively affected the increase in the fertility of sod-podzolic soil and the productivity of the vico-oat mixture. The amount of humus increased by 0.3–0.8%, mobile phosphorus – by 60–140 mg/kg, the exchange and hydrolytic acidity and the content of exchangeable potassium in the soil decreased. The complex application of fertilizers in high doses significantly increased the yield and quality of annual grasses.

Key words: soil, fodder crop rotation, organic and mineral fertilizers, humus, metabolic acidity, productivity, dry matter, crude protein.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 60–69

Регуляторы роста растений

УДК 631.811.98:631.559:633.11

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ БАКТЕРИЙ И ДОЗЫ ПРЕПАРАТА *Bacillus subtilis* 10-4 НА РОСТОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ

© 2023 г. С. Р. Гарипова[1,2,], Л. И. Пусенкова[1,*], О. В. Ласточкина[3], К. А. Федорова[1,3], М. А. Дедова[1], О. В. Маркова[2], В. Д. Матюнина[2], Р. А. Юлдашев[3]**

[1]Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН 450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 19, Россия

[2]Уфимский университет науки и технологий 450076 Уфа, ул. З. Валиди, 32, Россия

[3]Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН 450054 Уфа, просп. Октября, 71, Россия

**E-mail: l.pusenkova@mail.ru*

***E-mail: garipovasvetlana@gmail.com*

Поступила в редакцию 06.11.2022 г.
После доработки 22.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

Инокуляция семян сельскохозяйственных культур селекционными штаммами ростстимулирующих бактерий является экологичным, низкозатратным способом повышения их урожайности, но может зависеть от некоторых биотехнологических факторов, влияющих на их физиологическую активность. К ним относятся условия культивирования бактерий и доза внесения препарата. В работе анализировали эффективность инокуляции яровой пшеницы сорта Башкирская 28 разными препаратами штамма *Bacillus subtilis* 10-4: 1 – водной суспензией клеток бактерий, смытых с картофельно-глюкозного агара (КГА), 2 – жидкой культурой, содержащей клетки с экзометаболитами, полученной при культивировании бактерий в картофельно-глюкозном отваре (КГО), 3 – жидкой культурой бактериальных клеток, выросших в бобово-глюкозном отваре (БГО). При этом оценивали ростстимулирующий эффект от внесения высокой дозы (10^8 кл./мл) и малой дозы (10^4–10^5 кл./мл) бактерий в инокулюме. При сравнении препаратов, полученных с картофельно-глюкозной среды, выявлено, что положительный ростовой эффект (увеличение числа корней растений пшеницы) вызвали только высокая доза клеток препарата в КГА и обе дозы препарата в КГО, но высокая доза препарата в КГО тормозила прорастание семян до 74% (в контроле 100%). При сравнении препаратов, полученных при культивировании бактерий в КГО и БГО, выявлено, что наилучший ростовой эффект (суммарная длина корней и высота побега) был больше контроля у растений, инокулированных малой дозой препарата в КГО и большой дозой препарата в БГО. Стимулирующий эффект малой дозы препарата в БГО был меньше и распространялся только на корневую систему. Результаты лабораторных экспериментов совпали с эффективностью изученных препаратов в полевых условиях. Применение препарата, полученного в БГО и внесенного в дозе 10^8 кл./мл, и препарата, полученного в КГО и внесенного в дозе 10^5 кл/мл, увеличивало урожай зерна в 1.6–1.7 раза при снижении интенсивности листостебельных болезней на 32 и 11% по сравнению с необработанным контролем. Препарат, полученный в БГО и внесенный в малой дозе, не обеспечил ни прибавки урожая, ни защитного эффекта по сравнению с контролем. Обсуждены возможные причины действия препаратов штамма *B. subtilis* 10-4, связанные с продукцией им фитогормонов в зависимости от состава среды, и с различной адаптивной способностью бактерий при культивировании на богатой и менее богатой азотом средах.

Ключевые слова: инокуляция, концентрация бактерий, пшеница, рост, среда культивирования бактерий, урожайность, эндофитные бактерии

DOI: 10.31857/S0002188123030055, **EDN:** KNPCCF

ВВЕДЕНИЕ

Применение рост-стимулирующих бактерий (***PGPB***) для повышения стрессоустойчивости и продуктивности растений пшеницы является сложившейся практикой агробиотехнологии. Особое место среди микробных препаратов зани-

мают средства на основе эндофитных бактерий, которые колонизируют внутренние ткани растений, оказывая на растение-хозяина иммуномодулирующее и стресспротекторное действие [1]. Вклад PGPB в эти процессы связан с их способностью к синтезу веществ с антибиотической активностью, биосурфактантов, сидерофоров, хелаторов, фитогормонов, с участием в реакциях, индуцирующих системную устойчивость растений к заболеваниям и толерантности к абиотическим стрессам [2–4]. Инокуляция эндофитными бактериями может способствовать повышению урожая пшеницы до 43% за счет снижения болезней, увеличения всхожести, выживаемости, улучшению структурных показателей продуктивности растений [5].

Спорообразующие бактерии рода *Bacillus* удобны для защиты растений и стимуляции их роста. Эти бактерии могут быть использованы как протравители посевного зерна с целью профилактики болезней и увеличения всхожести, так и для подавления болезней во время вегетативной фазы роста растений. Они обладают, с одной стороны, высокой выживаемостью спор в неблагоприятных условиях, с другой стороны – способностью к активному росту и синтезу разнообразных физиологически активных соединений [6].

Одним из перспективных эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* является штамм 10-4, который в полевых экспериментах по инокуляции сахарной свеклы [7], картофеля [8], фасоли [9, 10] оказывал положительное влияние на урожай определенных культур и их устойчивость к болезням. Взаимодействие штамма *B. subtilis* 10-4 с растениями пшеницы было ранее исследовано только в лабораторных условиях: при моделировании комбинации засухи и поражения фузариозными (*Fusarium culmorum*) корневыми гнилями на сорте Омская 35 [11], при моделировании засухи на устойчивом и чувствительном к дефициту влаги сортах Экада 70 и Салават Юлаев [12, 13], а также в условиях засоления на сорте Башкирская 26 [14]. В этих экспериментах было продемонстрировано стресспротекторное действие штамма, связанное с его способностью повышать активность антиоксидантных ферментов, снижать уровень развития окислительного стресса и укреплять клеточные стенки растений, повышая их барьерные свойства. Взаимодействие штамма *B. subtilis* 10-4 с сортом яровой пшеницы Башкирская 28 изучено впервые.

Сорт мягкой яровой пшеницы Башкирская 28 был получен индивидуальным отбором из гибридной популяции от скрещивания сортов Омская 20 и Приокская, который в 2005–2007 гг. по ряду хозяйственных признаков превзошел эталонный сорт Омская 35 [15]. Растения этого сорта формировали более высокий урожай и более крупное зерно и по сравнению с эталонным сортом Симбирцит в условиях дерново-подзолистой почвы в 2011–2012 гг. [16]. В лабораторных условиях растения сорта Башкирская 28 по сравнению с сортом Омская 35 отличались повышенной транспирацией и гидравлической проводимостью как в стрессовых, так и нормальных условиях [17]. В условиях имитации засухи этот сорт формировал максимальное количество проростков в фенофазе кущения и был отнесен к засухоустойчивым генотипам, при этом лабораторная всхожесть зрелых зерновок составила 70% [18].

Известно, что генотип сорта влияет на видовой состав эндофитов [19] и способность к эффективному взаимодействию с сигнальными факторами ассоциированных с ними микроорганизмов [20]. Это обусловливает различную видовую и сортовую отзывчивость растений на бактериальную инокуляцию как эндофитными [21, 22], так и ризосферными рост-стимулирующими бактериями [23]. Имеет значение и природа действующего вещества препарата: биомасса отделенных от культуральной жидкости бактериальных клеток или жидкая культура бактерий вкупе с их метаболитами, или только экзометаболиты бактерий оказывают стимулирующий эффект [24, 25]. Определенный вклад в степень проявления рострегулирующего или биоконтрольного эффекта бактерий может вносить состав культуральной среды [26, 27]. Его влияние может распространяться на удлинение экспоненциальной фазы роста, на конечное количество жизнеспособных клеток и активность синтеза физиологически активных веществ [28]. Понимание конкретных параметров роста и физиологии штамма для оптимизации функциональности инокулянта позволяет достигнуть снижения производственных затрат за счет замены богатых лабораторных сред менее богатыми средами [29]. Важна при этом сопоставимость результатов эффективности препаратов разной рецептуры и доз внесения инокулянта при проведении опытов в лабораторных и полевых условиях [30, 31].

Цель работы – анализ влияния состава питательной среды для культивирования бактерий *B. subtilis* 10-4 и дозы внесения препарата на ростовые характеристики пшеницы сорта Башкирская 28 в лабораторных условиях, а также продуктивность и устойчивость к болезням растений в полевых условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были семена и растения сорта яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Башкирская 28, внесенного в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных культур, допущенных к использованию в Республике Башкортостан и Уральском районе в 2016 г. Семена были получены в Чишминском селекционном центре по растениеводству Республики Башкортостан и предоставлены В.И. Никоновым. Штамм *Bacillus subtilis* 10-4 (ВКПМ № 12988) взят из коллекции Башкирского НИИСХ УФИЦ РАН.

Среды готовили согласно руководству [32]. Для получения картофельно-глюкозного отвара (**КГО**) 200 г очищенного мелконарезанного картофеля заливали 1 л водопроводной воды и кипятили 30 минут. Отфильтрованный отвар доливали до литра, добавляли глюкозу 10 г/л и стерилизовали 30 мин при 1.5 ати. Для получения картофельно-глюкозного агара (**КГА**) в эту среду добавляли 2% агара. Для получения бобово-глюкозного отвара (**БГО**) 50 г гороха заливали 1 л воды, варили 30 мин, затем фильтровали, доводили до 1 л, добавляли 10 г глюкозы и автоклавировали 30 мин при 1.5 ати. Выращивание бактерий на агаровых скосах (КГА) проводили в пробирках, инкубировали в термостате при 28°С 72 ч. Культивирование жидкой культуры бактерий на КГО и БГО проводили в колбах Эрленмейера в термостатируемом на водяной бане шейкере (Water bath shaker clpnn type 357, Labawa Poland) при температуре 30°С в течение 72 ч.

Модельную концентрацию бактерий (10^9 кл./мл) создавали по стандарту мутности Тарасевича, заданную плотность клеток бактерий (10^4–10^5 и 10^8 кл./мл) получали методом 10-кратных разведений. Гомогенность промежуточных разведений суспензии обеспечивали с помощью прибора Multi-Vortex V-32 (BioSan, Латвия). Контроль концентраций бактериальных клеток в инокулюме проводили путем их прямого подсчета в камере Горяева. Для инокуляции на 2 г (50 семян) вносили 20 мкл бактериальной суспензии в заданной плотности (объем 20 мкл включал рабочий опытный раствор), контроль обрабатывали эквивалентным количеством воды. Семена встряхивали в закрытой чашке Петри в течение 3–5 мин для равномерного распределения инокулюма по их поверхности, раскладывали на влажные фильтры и инкубировали при 22–24°С в темноте. Инокуляцию семян для полевых экспериментов проводили аналогично, задавая необходимую плотность бактерий в препарате методом кратных разведений, и вносили препарат из расчета 10 л/т семян, включающий рабочий раствор. Испытывали разные формы препаратов: 1 – биомассу бактерий, смытую с твердой питательной среды картофельно-глюкозного агара (КГА) – препарат содержал преимущественно споры бактерий; 2 – жидкую культуру бактерий высокого титра (10^{10} кл./мл), выращенную на картофельно-глюкозном отваре (КГО), содержащую как споры, так и экзометаболиты бактерий; 3 – жидкую культуру бактерий с титром 10^9 кл./мл, выращенную на бобово-глюкозном отваре (БГО), содержащую клетки бактерий, их метаболиты и остатки питательной среды.

Двойной бумажный фильтр укладывали на дно чашки Петри, увлажняли 5 мл воды и раскладывали по 2 г (50–52 зерновки) обработанных семян на равном расстоянии друг от друга в 2-х повторностях. Инкубировали в термостате 3-е сут при температуре 25°С. У 3-суточных проростков измеряли длину побега, суммарную длину всех корней, количество корней, количество проростков.

Полевые эксперименты проводили в 2020 г. на полях Чишминского селекционного центра по растениеводству (Предуральская степная зона Республики Башкортостан). Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднемощный среднесуглинистый. Содержание гумуса в пахотном слое – 7.4%, pH 6.3. Гидротермический коэффициент (ГТК) этого периода находился в пределах 0.81–1.07, что характеризует климатические условия сезона как умеренно засушливые. Посев проводили механизированно. Закладку полевых опытов, а также учеты и наблюдения осуществляли согласно Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (1985 г.). Оценку устойчивости к основным болезням проводили, руководствуясь Методическим руководством по учету болезней сельскохозяйственных культур (1985 г.). Площадь делянок 15 м^2, повторность опыта четырехкратная. Структуру урожая учитывали на площади 1.5 м^2. Данные статистически обработаны с помощью программы Microsoft Excel. В таблицах представлены средние арифметические. Достоверные различия при $p < 0.05$, определенные по t-критерию Стьюдента, обозначали разными буквами в индексах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение доз и форм препаратов может оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие на рост растения. Для оценки этого эффекта семена пшеницы инокулировали бактери-

Таблица 1. Влияние водно-суспензионной и жидко-культуральной форм препаратов *B. subtilis* 10-4 в разных дозах инокуляции на ростовые параметры 3-суточных проростков пшеницы

Форма препарата	Число бактерий в инокулюме, кл./мл	Длина побега, мм	Суммарная длина корней, мм	Число корней, шт./проросток	Энергия прорастания, %
Без обработки	–	22.4[a]	140[a]	3.86[a]	100
Водная суспензия бактерий в КГА	10^4	22.0[a]	140[a]	3.96[a]	94[a]
	10^8	23.1[a]	144[a]	4.30[b]	92[a]
Жидкая культура бактерий в КГО	10^4	23.1[a]	161[b]	4.33[b]	96[a]
	10^8	23.9[a]	153[a]	4.19[b]	74[b]

Примечание. КГА – картофельно-глюкозный агар, КГО – картофельно-глюкозный отвар, разными буквами индекса обозначены различающиеся средние величины при $p < 0.05$. То же в табл. 2.

ями *B. subtilis* 10-4 в малой (10^4 кл./мл) и в высокой (10^8 кл./мл) дозах и в разных формах препарата: водно-суспензионной (смыв клеток бактерий с твердой среды) и жидкой (клетки бактерий с экзометаболитами) культуре. Обработка семян водной суспензией бактерий, выросших на твердой среде КГА, стимулировала увеличение числа корней (на 11%) при внесении препарата в высокой дозе, оставаясь на уровне контроля в малой дозе. Обработка семян клетками штамма вместе с культуральной жидкостью, полученной в КГО, способствовала увеличению числа корней (на 12%) при внесении в обеих дозах. При этом препарат в малой дозе увеличивал на 15% и суммарную длину корней. Высокая доза препарата ингибировала процесс прорастания семян (табл. 1).

Негативное влияние больших доз (10^9 кл./мл) препаратов *B. subtilis* 26Д и 11ВМ на рост корней и побегов было выявлено в экспериментах с сортами пшеницы Волжская качественная (озимая) и Казахстанская (яровая), тогда как инокуляция их малой дозой бактерий (10^5–10^6 кл./мл) вызывала стимулирующий эффект [22].

Различия действия бактерий в водной суспензии и их в жидкой культуре могло быть связно с содержанием фитогормонов в экзометаболитах. Известно, что штамм *B. subtilis* 10-4 продуцировал индолил-3-уксусную кислоту (**ИУК**) в концентрации 5.8 мг/л при выращивании на питательной среде LB [14]. В водно-суспензионной форме концентрация гормонов, возможно, была меньше, т.к. часть их могла диффундировать в агар, поэтому оптимальная концентрация достигалась, возможно, только в препарате с высокой плотностью клеток в инокулюме. Культивирование бактерий в жидкой культуре, вероятно, обусловливало более насыщенную концентрацию фитогормонов в экзометаболитах бактерий за счет высвобождения их в культуральную среду. Не исключено, что именно поэтому малая доза сильнее стимулировала рост проростков пшеницы по сравнению с высокой дозой препарата, в которой концентрация гормона могла превышать оптимальный уровень.

Благоприятный уровень влияния экзогенных ауксинов на рост растений может быть очень узким [33]. На примере взаимодействия экзогенной ИУК с растениями гороха было экспериментально показано торможение роста растений гороха при превышении выявленного порогового уровня ИУК 2 мкг/мл [34]. Мутантный штамм *P. putida* GR12-2/aux1 с продукцией ИУК, в 4 раза превышавшей уровень активности дикого штамма, потерял способность усиливать рост корней проростков канолы в гнотобиотических условиях [35]. Инокуляция растений гвоздики ИУК-продуцирующими бактериями *Klebsiella* SGM81 только в дозах от 10^2 до 10^5 КОЕ/мл приводила к фенотипу улучшенного роста корней, тогда как внесение бактерий в дозе 10^8 КОЕ/мл ухудшали показатели роста корней [36]. Обработка семян нута ИУК-продуцирующими штаммами псевдомонад в высокой дозе приводила к угнетению роста растений так же, как и экзогенная обработка ИУК в концентрации 10 мкМ по сравнению с меньшими концентрациями – 0.5 и 1 мкМ ИУК, которые стимулировали рост корней [37]. При

Таблица 2. Влияние препаратов *B. subtilis* 10-4, полученных при культивировании в жидкой культуре на разных средах, на рост 3-суточных проростков пшеницы

Форма препарата	Число бактерий в инокулюме, кл./мл	Длина побега, мм	Суммарная длина корней, мм	Число корней, шт./проросток	Энергия прорастания, %
Без обработки		22.2[a]	127[a]	4.2[a]	100[a]
КГО	10^5	27.3[b]	157[c]	4.6[b]	92[a]
БГО	10^5	24.8[a]	139[b]	4.5[b]	92[a]
БГО	10^8	28.1[b]	150[c]	4.2[a]	90[a]

изучении продукции ИУК бактериальными эндофитами корней *Brassica rapa* было выявлено, что конечная концентрация фитогормона напрямую зависела от содержания триптофана в питательной среде и продолжительности культивирования [38]. В экспериментах с *Pantoea* sp. IB-BF было показано, что в зависимости от присутствия белкового компонента (триптон, пептон или дрожжевой экстракт) и условий пониженного содержания азота при повышенном отношении C : N (картофельно-глюкозная среда) содержание ауксина и каротина варьировало от 2 до 21 мкг/мл и от 0.06 до 0.172 $ОП_{461}$/мг сухой биомассы соответственно, при этом в присутствии триптофана 100 мкг/мл зафиксировано достоверное увеличение выхода ИУК на 18% больше по сравнению с уровнем ауксина на среде без триптофана, а секреция каротина существенно возрастала в условиях пониженного содержания азота и повышенного отношения C : N (картофельно-глюкозная среда) [26]. Эти факты свидетельствовали о необходимости прецизионно подбирать дозы внесения бактерий, продуцирующих фитогормоны, а также условия культивирования, способствующие выработке определенного количества фитогормона в среде.

Помимо КГО, традиционной питательной среды для роста бактерий рода *Bacillus*, БГО также используют для культивирования многих видов бактерий [32]. Поэтому был проведен модельный опыт по влиянию на рост корней пшеницы высокой (10^8 кл./мл) и малой (10^5 кл./мл) доз препарата *B. subtilis* 10-4, полученного в БГО в сравнении с препаратом в КГО в малой дозе (10^5 кл./мл) (табл. 2). Все варианты обработок обеспечили увеличение суммарной длины корней 3-суточных проростков пшеницы на 9–23%. Препарат, полученный при выращивании бактерий в БГО и внесенный в большой дозе, оказал такой же эффект на увеличение суммарной длины корней, как и препарат в КГО в малой дозе. Эти 2 варианта препаратов способствовали также стимуляции роста побега на 23–27%. Малая доза препаратов бактерий, выращенных на обеих средах, стимулировала формирование большего числа корней. Можно предположить, что бóльшая стимуляция роста растений пшеницы при обработке препаратом с высокой плотностью клеток, полученном в богатом аминокислотами БГО, могла быть связана с более высоким уровнем продуцируемых бактериями ауксинов. И, по-видимому, именно такой уровень ИУК соответствовал оптимальной концентрации, которая была получена также и при разбавлении на 3 порядка культуральной среды с бактериями, выращенными в КГО. Более концентрированная доза препарата в КГО (10^8 кл./мл) угнетала прорастание семян.

Остается невыясненным вопрос, почему при культивировании бактерий в КГО обеспечивалась такая концентрации фитогормонов или других физиологически активных веществ, которые оказывали стимулирующий рост растений эффект при сильном разбавлении? Возможно, недостаток легкодоступного азота в КГО ускорял выход бактерий в споры, что уплотняло клеточную массу бактерий до титра 10^{10} кл./мл и создавало возможности для большей концентрации гормона в окружающей среде за счет уменьшения объема клеток. В препарате в БГО, несмотря на такой же 3-суточный срок культивирования, наряду со спорами была высока доля вегетативных клеток, поэтому их плотность в препарате составляла $>10^9$ кл./мл.

В обедненной азотом среде бактерии могли усиливать накопление гормона и внутри клеток в качестве предадаптации к переживанию стресса. На такую мысль наводят данные экспериментов с

Таблица 3. Влияние препаратов штамма *B. subtilis* 10-4, приготовленных на разных средах и внесенных в разных дозах, на структуру урожая пшеницы (полевой опыт)

Вариант обработки	Высота растений, см	Число продуктивных стеблей, шт.	Длина колоса, см		Число семян, шт.	Масса, г	
			средняя	суммарная		семян с растения	1000 семян
Контроль	95.1[a]	1.03[a]	6.23[a]	6.37[a]	19.3[a]	0.63[a]	34.1[a]
КГО 10^5	99.2[a]	1.37[b]	6.58[a]	8.87[b]	27.4[c]	1.01[b]	33.6[a]
БГО 10^5	83.8[b]	1.13[a]	5.42[b]	5.97[a]	16.3[b]	0.59[a]	33.1[b]
БГО 10^8	108.5[c]	1.97[c]	6.97[c]	13.5[c]	37.3[d]	1.30[c]	36.3[c]

Примечание. 10^5 и 10^8 – дозы внесения препарата, кл./мл. То же в табл. 4.

Таблица 4. Влияние предпосевной обработки семян разными дозами препаратов *B. subtilis* 10-4, полученными при культивировании в КГО и БГО, на урожайность пшеницы

Вариант обработки	Урожайность, ц/га $HCP_{05} = 4.5$	Прибавка, ц/га	Прибавка к контролю, %
Контроль	24.3[a]		
КГО 10^5	41.9[b]	17.6	72.4
БГО 10^5	25.2[a]	0.9	3.7
БГО 10^8	38.5[b]	14.2	58.4

Escherichia coli, в которых показано, что перед выходом кривой популяционного роста на плато при снижении концентрации экзогенной глюкозы бактерии кратковременно (10–15 мин) накапливали ~60 мМ связанных с клеткой индолов, в 10 раз превышающие содержание их во внешней среде. Таким образом, бактериальная популяция экономила ресурсы задолго до их реального исчерпания, а клетки бактерий служили депо запасных веществ для последующего активного роста популяции [39]. Не исключено также и то, что ограниченность питания повышала устойчивость бактерий к различным стрессам окружающей среды. Замечено, что по сравнению с родительскими формами, выросшими при нормальном обеспечении питанием, адаптированные к условиям “голодания” меченые по резистентности к рифампицину производные штамма 2С8 характеризовались улучшенной способностью к колонизации ризосферы яблони, что сопровождалось одновременно усилением функций биоконтроля корневой гнили, вызванной *Rhizoctonia* [27].

Для проверки сопоставимости ростстимулирующей способности бактерий в лабораторных условиях с эффективностью соответствующих препаратов в полевых условиях был заложен полевой опыт. В полевых условиях максимальная продуктивность зерна была обеспечена при обработке препаратом, полученном при культивировании в БГО при внесении в дозе 10^8 кл./мл: растения существенно отличались от контроля по высоте (на 14%), числу продуктивных стеблей (на 91%), по средней и суммарной длине колоса (на 12 и на 111% соответственно), по числу семян (на 93%), массе семян с растения (на 106%) и массе 1000 семян (на 6%). Следует отметить, что малая доза (10^5 кл./мл) препарата, полученного в КГО, показала такую же высокую эффективность: по сравнению с контролем увеличилось число продуктивных стеблей (на 33%), суммарная масса колоса (на 39%), число семян (на 42%) и масса семян с растения (на 60%). Малая доза препарата, полученного при культивировании бактерий в БГО, снижала рост растений в высоту, среднюю длину колоса и число семян в колосе, не привела к достоверным отличиям массы семян с растения по сравнению с контролем (табл. 3).

Данные структурного анализа урожая пшеницы хорошо совпали с результатами сбора урожая комбайном (табл. 4). Препарат, полученный в

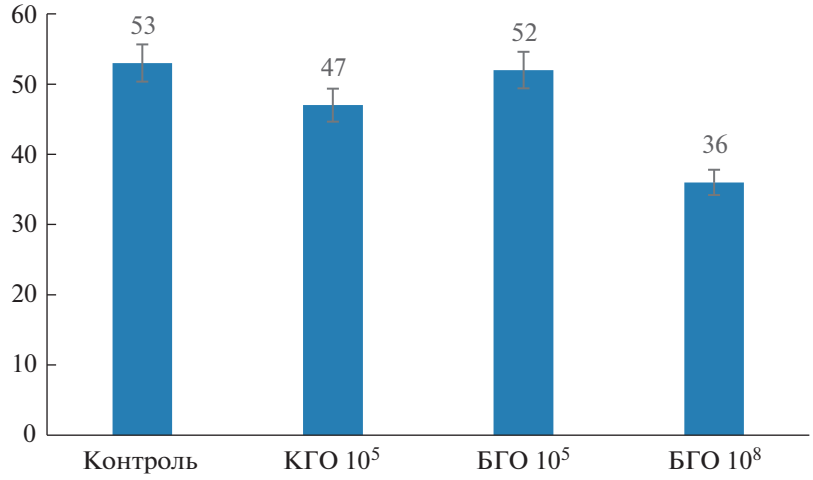

Рис. 1. Интенсивность поражения (%) пшеницы листостебельными болезнями при инокуляции разными биопрепаратами *B. subtilis* 10-4, полученными при выращивании бактерий на средах КГО и БГО и внесенных в разных дозах.

БГО и внесенный в малой дозе, не привел к увеличению урожая по сравнению с контролем. При этом малая доза препарата в КГО и большая доза препарата в БГО обеспечили прибавки урожая зерна более, чем в 1.5 раза.

Анализ фитопатологического состояния посева пшеницы в фазе начала формирования урожая показал, что 100% растений были поражены листостебельными болезнями, при этом интенсивность поражения различалась в вариантах (рис. 1). В вариантах обработки препаратом, полученным в БГО и внесенным в малой дозе, защитный эффект не выявился, тогда как при внесении его в высокой дозе степень поражения болезнями снизилась на 32%. Защитное действие препарата, полученного в КГО и внесенного в малой дозе, было меньшим – снижение интенсивности развития болезней по сравнению с контролем составило 11%. Таким образом, высокая продуктивность растений при обработке препаратами *B. subtilis* 10-4 в БГО в дозе 10^8 кл./мл и в КГО в дозе 10^5 кл./мл формировалась не только за счет стимуляции роста растений, но и в результате защиты от болезней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полезные для растений бактерии могут сократить объемы использования агрохимикатов и повысить урожайность и устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессам. Однако, несмотря на положительные результаты, попрежнему существуют проблемы, связанные с сопоставимым действием препаратов в лабораторных и полевых условиях, а также с правильной рецептурой препаратов, включая эффективные микробные комбинации и другие факторы. Одним из факторов неопределенности является непредсказуемый состав метаболитов, прежде всего фитогормонов, которые накапливаются в среде культивирования бактерий и оказывают разнонаправленное действие на рост растений в зависимости от дозы внесения препарата. Для каждого вида и даже сорта растений оптимумы различаются, что обусловливает необходимость индивидуального определения препаративных форм бактерий. В связи с этим рост и урожай пшеницы сорта Башкирская 28 были оценены в зависимости от использования препаратов штамма *B. subtilis* 10-4, полученных при культивировании на богатой и бедной азотом натуральных средах и внесенных в разных дозах.

Натуральные среды – картофельный и бобовый отвары – отличаются от синтетических сред дешевизной и возможностью использования их при утилизации отходов пищевых производств. Обе среды содержали одинаковое количество глюкозы, но отличались по соотношению C:N. Неожиданным и многообещающим явился эффект стимуляции роста растений при инокуляции низкой дозой бактерий, которые культивировали на картофельной среде, тогда как бобовая среда создавала условия для проявления аналогичной рост-стимулирующей активности бактерий при инокуляции в высокой дозе. Сопоставимость ростовых реакций 3-суточных инокулированных проростков пшеницы с результатами полевых испытаний позволила констатировать успешность примененного метода диагностики эффективности препарата. Эквивалентный ре-

зультат урожайности пшеницы при применении малой дозы препарата, полученного в картофельной среде, и высокой дозы препарата, полученного в бобовой среде, дает обоснование для выбора экономичной и эффективной среды для культивирования бактерий и дозы внесения биопрепарата. Результаты проведенных экспериментов показали, что не только доза бактериальных клеток, но и состав питательной среды для культивирования бактерий может оказывать значимое влияние на эффективность препарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oukala N., Aissat K., Pastor V.* Bacterial endophytes: The hidden actor in plant immune responses against biotic stress // Plants. 2021. V. 10. P. 1012. DOI: org/ https://doi.org/10.3390/plants10051012
2. *Maksimov I.V., Maksimova T.I., Sarvarova E.R., Blagova E.K., Popov V.O.* Endophytic bacteria as effective agents of new-generation biopesticides (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2018. V. 54. № 2. P. 128–140. https://doi.org/10.1134/S0003683818020072
3. *Lastochkina O.V., Aliniaeifard S., Seifikalhor M., Yuldashev R., Pusenkova L., Garipova S.* Plant growth-promoting bacteria: biotic strategy to cope with abiotic stresses in wheat // Wheat production in changing environments. Responses, adaptation and tolerance / Eds. M. Hasanuzzaman, K. Nahar, M.A. Hossain. Singapore: Springer, 2019. P. 579–614. https://doi.org/10.1007/2F978-981-13-6883-7_23
4. *Ласточкина О.В.* Адаптация и устойчивость растений пшеницы к засухе, опосредованная природными регуляторами роста *Bacillus* spp.: механизмы реализации и практическая значимость (обзор) // Сел.-хоз. биол. 2021. Т. 56. № 5. С. 843–867. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.5.843rus
5. *Пусенкова Л.И., Гарипова С.Р., Ласточкина О.В., Юлдашев Р.А.* Эффективность инокуляции семян яровой пшеницы эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* 26Д // Пробл. агрохим. и экол. 2020. № 3. С. 56–64. https://doi.org/10.26178/AE.2020.19.55.005
6. *Азизбекян Р.Р.* Использование спорообразующих бактерий в качестве биологических средств защиты растений // Биотехнология. 2013. № 1. С. 69–77.
7. *Ласточкина О.В., Пусенкова Л.И., Юлдашев Р.А., Ильясова Е.Ю., Aliniaeifard S.* Физиолого-биохимические ответы растений сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.), зараженных грибом *Alternaria alternata*, на применение микробных препаратов на основе *Bacillus subtilis* // Сел.-хоз. биол. 2018. Т. 53. № 5. С. 958–968. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.5.958rus
8. *Пусенкова Л.И., Гарипова С.Р., Ласточкина О.В., Федорова К.А., Марданшин И.С.* Влияние эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* на урожай, качество клубней и послеуборочные болезни картофеля // Агрохим. вестн. 2021. № 5. С. 73–79. https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-5-013
9. *Гарипова С.Р., Шаяхметова А.С., Ласточкина О.В., Федорова К.А., Пусенкова Л.И.* Влияние инокуляции растений фасоли эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* на рост проростков в модельных опытах и продуктивность в условиях Южного Предуралья // Агрохим. вестн. 2020. № 6. С. 48–53. https://doi.org/10.24411/1029-2551-2020-10085
10. *Иксанова М.А., Гарипова С.Р.* Анализ фенологии, роста и продуктивности фасоли сортов Уфимская и Золотистая при инокуляции эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* в условиях Предуралья // Докл. Башкир. ун-та. 2021. Т. 6. № 3. С. 152–157. https://doi.org/10.33184/dokbsu-2021.3.2
11. *Lastochkina O.V., Allagulova C., Fedorova K., Koryakov I., Vladimirova A., Garshina D.* Application of endophytic *Bacillus subtilis* and salicylic acid to improve wheat growth and tolerance under combined drought and *Fusarium* root rot stresses // Agronomy. 2020. V. 10. № 9. P. 1343. https://doi.org/10.3390/agronomy10091343
12. *Lastochkina O.V., Yuldashev R., Allagulova C., Fedorova K., Avalbaev A., Maslennikova D., Garshina D., Ivanov S., Khafizova R., Bosacchi M.* Seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* modulates physiological responses of two different *Triticum aestivum* L. cultivars under drought stress // Plants. 2020. V. 9. № 12. P. 1–20. https://doi.org/10.3390/plants9121810
13. *Maslennikova D., Lastochkina O.* Contribution of ascorbate and glutathione in endobacteria bacillus subtilis-mediated drought tolerance in two *Triticum aestivum* L. genotypes contrasting in drought sensitivity // Plants. 2021. V. 10. № 12. P. 2557. https://doi.org/10.3390/plants10122557
14. *Lastochkina O.V., Pusenkova L., Garipova S., Yuldashev R., Blagova D., Khairullin R., Babaev M., Aliniaeifard S.* Effects of *Bacillus subtilis* on some physiological and biochemical parameters of *Triticum aestivum* L. (wheat) under salinity // Plant Physiol. Biochem. J. 2017. V. 121. P. 80–88. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942817303479
15. *Никонов В.И., Лукманова М.А.* Основные направления и результаты селекции яровой пшеницы в Башкирском НИИСХ // Достиж. науки и техн. АПК. 2010. № 1. С. 12–14. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15100800
16. *Коряковцева Л.А., Волкова Л.В., Харина А.В.* Сорта коллекции ВИР как источники ценных свойств в селекции яровой мягкой пшеницы // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2014. Т. 39. № 2. С. 10–13.
17. *Тимергалина Л.Н., Иванов Р.С., Никонов В.И., Иванов И.И.* Сравнительная оценка транспирации, роста корней и гидравлической проводимости у растений пшеницы, различающихся по урожайности в условиях засухи // Экобиотех. 2020. Т. 3. № 4. С. 734–740.

https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-4-734-740

18. *Круглова Н.Н., Сельдимирова О.А., Зинатуллина А.Е., Никонов В.И.* Выявление засухоустойчивых генотипов в культуре незрелых зародышей *in vitro* // Вестн. Башкир. ГАУ. 2019. № 4. С. 37–41. https://doi.org/10.31563/1684-7628-2019-52-4-37-41

19. *Žiarovská J., Medo J., Kysel M., Zamiešková L., Kac˘ániová M.* Endophytic bacterial microbiome diversity in early developmental stage plant tissues of wheat varieties // Plants. 2020. № 9. P. 266. https://doi.org/10.3390/plants9020266

20. *Valente J., Gerin F., Le Gouis J., Moënne-Loccoz Y., Prigent-Combaret C.* Ancient wheat varieties have a higher ability to interact with plant growth-promoting rhizobacteria // Plant Cell Environ. 2020. V. 43. № 1. P. 246–260. https://doi.org/10.1111/pce.13652

21. *Гарипова С.Р., Гарифуллина Д.В., Маркова О.В., Уразбахтина Н.А., Хайруллин Р.М.* Комплексная биологическая активность *in vitro* эндофитных бактерий, выделенных из клубеньков гороха и фасоли // Изв. Уфим. НЦ РАН. 2015. № 4–1. С. 25–28.

22. *Курамшина З.М., Хайруллин Р.М., Смирнова Ю.В.* Сортовая отзывчивость *Triticum aestivum* L. на инокуляцию клетками эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* // Рос. сел.-хоз. наука. 2019. № 6. С. 3–6. https://doi.org/10.31857/S2500-2627201963-6

23. *Коршунова Т.Ю., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Тимергалин М.Д., Рамеев Т.В., Четверикова Д.В., Феоктистова А.В., Низаева А.А., Четвериков С.П.* Бактеризация семян кормовых трав: влияние на прорастание и рост растений // Биомика. 2021. Т. 13. № 2. С. 159–165. https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2021-12

24. *Deivanai S., Bindusara A.S., Prabhakaran G., Bhore S.J.* Culturable bacterial endophytes isolated from Mangrove tree (*Rhizophora apiculata* Blume) enhance seedling growth in Rice // J. Nat. Sci. Biol. Med. 2014. V. 5. № 2. P. 437–444. https://doi.org/10.4103/0976-9668.136233

25. *Архипова Т.Н., Кузьмина Л.Ю., Кудоярова Г.Р.* Влияние титра микроорганизмов на результаты их ростстимулирующей активности в условиях гетеротрофного питания растений // Экобиотех. 2018. Т. 1. № 2. С. 97–104. https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-97-104

26. *Гильванова Е.А., Мильман П.Ю.* Биосинтез ауксина и каротина PGPR-бактерий *Pantoea* sp. на питательных средах различного состава // Биомика. 2020. Т. 12. № 2. С. 218–223. https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2020-12

27. *Gu Y-H., Mazzola M.* Impact of carbon starvation on stress resistance, survival in soil habitats and biocontrol ability of *Pseudomonas putida* strain 2C8 // Soil Biol. Biochem. 2001. V. 33. № 9. P. 1155–1162. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00019-0

28. *Teixidó N., Usall J., Torres R.* Insight into a successful development of biocontrol agents: Production, formulation, packaging, and shelf life as key aspects // Horticulture. 2022. V. 8. № 4. P. 305. DOI: org/ https://doi.org/10.3390/horticulturae8040305

29. *O'Callaghan M.* Microbial inoculation of seed for improved crop performance: issues and opportunities // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2016. V. 100. № 13. P. 5729–5746. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7590-9

30. *Rocha I., Ma Y., Souza-Alonso P., Vosátka M., Freitas H., Oliveira R.S.* Seed coating: A tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops // Front Plant Sci. 2019. V. 6. № 10. P. 1357. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01357

31. *Renoud S., Abrouk D., Prigent-Combaret C.* Effect of inoculation level on the impact of the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 on selected microbial functional groups in the rhizosphere of field maize // Microorganisms. 2022. V. 10. № 2. P. 325. https://doi.org/10.3390/microorganisms10020325

32. *Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчук Л.М.* Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Изд. центр "Академия", 2005. С. 161, 571–572.

33. *Persello-Cartieaux F., Nussaume L., Robaglia C.* Tales from the underground: molecular plant-rhizobacteria interactions // Plant Cell Environ. 2003. V. 26. P. 189–199. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.00956.x

34. *Иванчина Н.В., Гарипова С.Р., Хайруллин Р.М.* Влияние дозы клеток эндофитных штаммов *Bacillus subtilis*, продуцирующих индолил-3-уксусную кислоту, на рост и продуктивность гороха (*Pisum sativum* L.) // Агрохимия. 2018. №. 4. С. 39–44. https://doi.org/10.7868/S0002188118040051

35. *Xie H., Pasternak J.J., Glick B.R.* Isolation and characterization of mutants of the plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* CR12-2 that overproduce indoleacetic acid // Curr. Microbiol. 1996. V. 32. P. 67–71. https://doi.org/10.1007/s002849900012

36. *Gang S., Saraf M., Waite C.J., Buck M., Schumacher J.* Mutualism between *Klebsiella* SGM 81 and *Dianthus caryophyllus* in modulating root plasticity and rhizospheric bacterial density // Plant Soil. 2018. V. 421. № 1. P. 273–288. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3440-5

37. *Malik D.K., Sindhu S.S.* Production of indole acetic acid by *Pseudomonas* sp.: Effect of coinoculation with *Mesorhizobium* sp. Cicer on nodulation and plant growth of chickpea (*Cicer arietinum*) // Physiol. Mol. Biol. Plants. 2011. V. 17. № 1. P. 25–32. https://doi.org/10.1007/s12298-010-0041-7

38. *Shahid A.P., Zahoor A.B.* Isolation and characterization of indole-3-acetic acid producing bacterial root endophytes associated with brown sarson (*Brassica rapa* L.) // Int. J. Adv. in Sci. Eng. Technol. 2017. V. 5. № 3. P. 69–74. http://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/6-390-150513318669-74.pdf

39. *Gaimster H., Summers D.* Regulation of indole signalling during the transition of *E. coli* from exponential to stationary phase // Plos One. 2015. V. 10. № 9. e0136691. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136691

Influence of Nutrient Medium Composition for Culturing Bacteria and the Dose of *B. subtilis* 10-4 Biologics on Growth Indicators and Productivity of Wheat Plants

S. R. Garipova[a,b,##], L. I. Pusenkova[a,#], O. V. Lastochkina[c], K. A. Fedorova[a,c], M. A. Dedova[a], O. V. Markova[b], and R. A. Yuldashev[c]

[a] *Bashkir Research Institute of Agriculture - a Separate Structural Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the RAS ul. R. Zorge 19, Ufa 450059, Russia*

[b] *Federal State Budgetary Institution of Higher Education Ufa University of Science and Technologies ul. Z. Validi 32, Ufa 450076, Russia*

[c] *Ufa Institute of Biochemistry and Genetics – a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Center of the RAS prosp. October 71, Ufa 450054, Russia*

[#] *E-mail: l.pusenkova@mail.ru*

[##] *E-mail: garipovasvetlana@gmail.com*

Inoculation of crop seeds with selective strains of growth-stimulating bacteria is an environmentally friendly, low-cost way to increase their yield, but may depend on some biotechnological factors affecting their physiological activity. These include the conditions for the cultivation of bacteria and the dose of the drug. The work analyzed the effectiveness of inoculation of Bashkir spring wheat with 28 different preparations of the *Bacillus subtilis* strain 10-4: 1 – an aqueous suspension of bacterial cells washed off potato-glucose agar (PGA), 2 – a liquid culture containing cells with exometabolites obtained by cultivating bacteria in potato-glucose broth (PGB), 3 – liquid culture of bacterial cells grown in legume-glucose broth (LGB). At the same time, the growth-stimulating effect of applying a high dose (10^8 cells/ml) and a low dose (10^4–10^5 cells/ml) of bacteria in the inoculum was evaluated. When comparing the preparations obtained from potato-glucose medium, it was revealed that the positive growth effect (an increase in the number of wheat plant roots) was caused only by a high dose of the drug cells in the PGA and both doses of the drug in the PGB, but a high dose of the drug in the PGB inhibited seed germination up to 74% (in the control 100%). When comparing the preparations obtained during the cultivation of bacteria in PGB and LGB, it was revealed that the best growth effect (total root length and shoot height) was greater than control in plants inoculated with a small dose of the drug in PGB and a large dose of the drug in LGB. The stimulating effect of a small dose of the drug in LGB was less and extended only to the root system. The results of laboratory experiments coincided with the effectiveness of the studied drugs in the field. The use of a drug obtained in BGO and administered at a dose of 10^8 cells / ml, and a drug obtained in PGB and administered at a dose of 10^5 cells/ml, increased grain yield by 1.6–1.7 times with a decrease in the intensity of leaf-stem diseases by 32 and 11% compared with the untreated control. The drug obtained in LGB and introduced in a small dose did not provide either an increase in yield or a protective effect compared to the control. Possible causes of the action of *B. subtilis* 10-4 strain preparations related to the production of phytohormones by it, depending on the composition of the medium, and with different adaptive capacity of bacteria when cultured on nitrogen-rich and less nitrogen-rich media are discussed.

Key words: inoculation, bacterial concentration, wheat, growth, bacterial culture medium, yield, endophytic bacteria.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 70–81

Пестициды

УДК 633.63:632.5:632.954

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕРБИЦИДОВ В БОРЬБЕ С СОРНЯКАМИ И ИХ ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ДЛЯ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ РАСТЕНИЙ И НОРМЫ РАСХОДА ПРЕПАРАТОВ

© 2023 г. Е. А. Дворянкин

Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, п. ВНИИСС, 86, Россия

E-mail: dvoryankin149@gmail.com

Поступила в редакцию 04.11.2022 г.
После доработки 28.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

В полевых опытах на опытном поле ВНИИСС проведены испытания различных комбинаций гербицидов против малолетних двудольных сорняков в посеве сахарной свеклы в условиях 2018–2020 гг., включавшие препараты: Бетанал максПро (БМП), Бетанал Эксперт ОФ (БЭОФ), Бетанал 22, Митрон, Карибу. Исследована эффективность химической прополки в зависимости от возраста сорняков и нормы расхода препаратов. Показано, что наиболее высокая эффективность химической прополки (98–100%) в сочетании с низкой фитотоксичностью для сахарной свеклы была обеспечена при обработке наименьшими (из рекомендуемых) нормами расхода препаратов в ранних фазах развития сорняков: семядолей–1-й пары настоящих листьев. Задержка с обработкой гербицидом увеличивала неоднородность сорняков по фазе развития и снижала эффективность химической прополки посева. Сахарная свекла особенно в ранних фазах развития испытывала стресс после внесения гербицидов в течение от 6-ти до 14-ти сут. Продолжительность стресса зависела от дозы гербицида, условий среды, фазы развития сахарной свеклы. При избыточном внесении гербицидов растения сахарной свеклы были подвержены более длительной депрессии. Формирование продуктивных показателей сахарной свеклы зависело от условий погоды, эффективности комбинации гербицидов на сорняки и токсикологической нагрузки ими на растения культуры. Применение максимально допустимых и повышенных норм расхода гербицидов по переросшим сорнякам на всех этапах химической прополки создавало предпосылки для снижения продуктивных показателей сахарной свеклы. В опытах, где применяли относительно “жесткие” схемы гербицидов расчетный сбор сахара снижался на 0.64–1.01 т/га.

Ключевые слова: сахарная свекла, гербициды, сорняки, эффективность, фитотоксичность, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188123030043, **EDN:** KNOOHW

ВВЕДЕНИЕ

Важной составляющей эффективности действия гербицидов является соответствие нормы расхода препарата с фазой развития наиболее трудноискоренимых сорных растений [1–3]. В период задержки внесения гербицидов сорные растения активно развиваются, накапливают биомассу, формируют устойчивый водный режим. С накоплением биомассы резко возрастает их устойчивость к нормированным дозам гербицидов в результате биологического разбавления действующего вещества в тканях и органах сорняков, увеличения воскового слоя на листьях, возрастных морфологических изменений эпидермы, ее волосков, чешуек [2, 4].

На эффективность химической борьбы с сорняками большое влияние оказывают погодные условия. Послевсходовые гербициды наиболее активны при температуре 15–23°С, при более низких температурах действие гербицидов на сорняки ослабевает, а при температурах выше 25°С возрастает опасность повреждения растений культуры, особенно при контактном механизме действия на растения. Во всех случаях решающим фактором для принятия решения об обработке гербицидами посева является ранняя фаза развития сорняков [1, 3, 4]. При обработке гербицидами сахарной свеклы больше внимания уделяют

Таблица 1. Схема полевого опыта

Вариант, №	Послевсходовое внесение, л/га, кг/га		
	1-е внесение	2-е внесение	3-е внесение
1	Контроль без прополки		
2	Контроль с ручной прополкой		
3	БЭОФ 1.0	Бетанал максПро 1.25 + Митрон 1.0	Бетанал максПро 1.5 + Митрон 1.5
4	БЭОФ 1.0	БЭОФ 1.0 + Карибу 0.03 + Тренд 0.2	БЭОФ 1.3 + Карибу 0.03 + Тренд 0.2
5	БЭОФ 1.0 + Митрон 1.0	Митрон 1.0 + Карибу 0.03 + Тренд 0.2	БЭОФ 1.3 + Митрон 1.0 + + Карибу 0.03 + Тренд 0.2
6	Митрон 1.5	БЭОФ 1.3 + Митрон 1.5	Бетанал 22 1.5 + Митрон 1.0 + + Карибу 0.03 + Тренд 0.2
7	БЭОФ 1.3	Бетанал максПро 1.5 + Митрон 1.5	Бетанал максПро 1.8 + Митрон 1.5
8	БЭОФ 1.3 + Митрон 1.5	БЭОФ 1.5 + Митрон 1.5 + + Карибу 0.03 + Тренд 0.2	БЭОФ 1.5 + Митрон 1.5 + + Карибу 0.03 + Тренд 0.2
9	БЭОФ 1.5 + Митрон 1.5	Бетанал максПро 1.8 + Митрон 1.0 + + Карибу 0.03	Бетанал 22 2.0 + Карибу 0.03 + + Тренд 0.02

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 3–6.

двудольным сорнякам, а среди них – особо трудноискоренимым, возраст которых используют в качестве ориентира для внесения гербицидов в посеве [5, 6].

Дробное послевсходовое внесение повышает эффективность гербицидов в борьбе с сорняками на 16–24% в сравнении с однократным применением гербицида. Послевсходовое внесение гербицидов позволяет предварительно скорректировать схему химической прополки с учетом погодных условий, количества, видового состава сорняков и тем самым снизить вероятность их негативного воздействия на растения культуры [3, 7].

При применении гербицидов растения культуры испытывают стресс, а при вынужденном повышении концентрации – угнетение. Эффективность применения гербицидов, определяется как недостатком, так и избытком их количества или активности. Лимитирующее влияние максимума (избыток фактора), как и минимума (недостаток фактора) описывает закон толерантности. Пределы толерантности характеризуют границы существования для растений [8]. Поэтому оценка фитотоксичности гербицидов на растения культуры и регламентирование норм их расхода для безопасной и эффективной борьбы с сорняками имеет научное и практическое значение.

Цель работы – оценка эффективности химической прополки сорняков и фитотоксичности примененных современных гербицидов для сахарной свеклы в зависимости от нормы расхода препаратов и фазы развития сорной растительности и растений культуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на опытном поле ВНИИСС в 2018–2020 гг. Объектом служили растения сахарной свеклы, сорняки и свекловичные гербициды: Бетанал максПро (**БМП**), Бетанал Эксперт ОФ (**БЭОФ**), Бетанал 22, Карибу, Митрон (табл. 1). Фоновые обработки против злаковых сорняков проводили препаратом Пантера 1.0 л/га, эффективность которых составила 97–100%. Опыт закладывали в трехкратной повторности, размещение вариантов рендомизированное. Размер делянки 27 м^2 (2.7 × 10 м). В исследовании варьировали сроки и норму применения гербицидов.

Обработку делянок гербицидами осуществляли ранцевым опрыскивателем, оборудованным штангой с 6-ю распылителями, размещенными с интервалом 45 см (длина штанги 2.7 м), расход рабочей жидкости 250 л/га. Послевсходовые обработки посевов сахарной свеклы гербицидами проводили в разных фазах развития двудольных сорняков. Дробное внесение гербицидов применяли по мере появления новых волн нарастания сорняков.

Учеты сорняков проводили рамочным и количественно-весовым методами [9, 10]. Засоренность посева учитывали перед каждым внесением гербицидов и через 7 сут после их внесения. Учеты проводили на фиксированных площадках, не менее 16 повторений в варианте, что по методике [9] соответствует 5%-ному уровню значимости.

В опытах оценивали эффективность гербицидов против сорняков [1, 6], фитотоксичность гер-

бицидов для сахарной свеклы [11], урожайность и сахаристость корнеплодов на поточной линии "Венема". В предварительных опытах исследовали степень нарастания фитотоксичности для растений сахарной свеклы разного возраста под действием Бетанала 22. Посев, уход за посевами, уборку проводили согласно общепринятым зональным рекомендациям.

Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа с применением компьютерной расшифровки показателей продуктивности сахарной свеклы [10].

Погодные условия и фитосанитарное состояние посева. Вегетационный период 2018 г. в условиях Центрального Черноземья был умеренно засушливым с большим недобором влаги в августе. В мае и июне выпало 50% осадков от среднемноголетних показателей. Недобор влаги в августе составил 85%. В июле и сентябре количество осадков было близким к среднемноголетним.

В апреле–августе температура воздуха была на уровне среднемноголетней, в сентябре – выше среднемноголетней на 2.2°С.

В апреле–июле 2019 г. выпавшее количество осадков было близким к среднемноголетним показателям, тогда как в августе и сентябре отмечен недобор влаги на 40 и 60% соответственно. В целом вегетационный период был благоприятным для формирования урожая сахарной свеклы. В начале вегетации (апрель–июнь) температура воздуха была выше среднемноголетней на 1.2–1.8°С, в августе–сентябре – ниже среднемноголетней на 1.0–1.6°С.

В мае и 1-й декаде июня 2020 г. выпало 68 мм осадков, что соответствовало среднемноголетнему количеству влаги. Остальной период вегетации сахарная свекла произрастала в условиях с недобором влаги в июле, августе и сентябре. Температура воздуха в апреле–мае была ниже среднемноголетней на 2–5°С, в июне – выше на 2°С, в июле–сентябре – была близка к среднемноголетней.

Исследование проводили на фоне средней засоренности с преобладанием малолетних двудольных сорняков (136–243 шт./м^2). В севообороте, где регулярно проводили химическую прополку посевов сельскохозяйственных культур, группа малолетних двудольных сорняков в посеве сахарной свеклы не отличалась большим разнообразием по видовому составу и была представлена в основном щирицей запрокинутой и марью белой (табл. 2). В 2020 г. отмечено нарастание подмаренника цепкого и чистеца полевого. Остальные виды сорняков (горцы, просвирник, ярутка полевая и другие) произрастали в меньшем количестве. Злаковые сорняки представлены 2-мя видами: щетинником и куриным просом. Многолетние сорняки по численности не достигали экономического порога вредоносности (0.2 шт./м^2). Пораженность корнеедом была невысокой (3.7–14.6%). В конце августа и сентябре отмечено развитие мучнистой росы и в разной степени болезни бактериального увядания сахарной свеклы.

В годы исследования численность сорняков в абсолютном контроле (без прополки) достигала максимума в июне, а затем постепенно снижалась в результате вытеснения и завершения вегетации отдельных видов сорняков. Снижение численности сорняков было особенно заметно в засушливых условиях.

При внесении гербицидов в качестве маркеров для контроля возраста сорняков в посеве сахарной свеклы использовали наиболее многочисленные злостные виды растений щирицы и мари белой.

Марь белая – ранний сорняк семейства маревые, распространен повсеместно, отличается высокой пластичностью и плодовитостью. Семена мари белой полиморфны. На растении встречаются семена 3-х видов. Крупные, плоские и коричневые прорастают в год созревания. Семена более мелкие, черные с толстой оболочкой прорастают на 2-й год, а очень мелкие, круглые, черные прорастают лишь на 3-й год и позднее после обсеменения.

Переросшая марь белая – один из самых проблемных сорняков, способных приспосабливаться к различным условиям среды. Борьбу с этим сорняком необходимо вести в периоды, когда он наиболее уязвим. Всходы мари белой активно растут, а листья наращивают толстый восковой слой, который увеличивается с каждой новой парой листьев. Поэтому сорняк наиболее уязвим в фазе семядолей–первой пары настоящих листьев.

Щирица запрокинутая – теплолюбивый сорняк, произрастающий особенно активно в конце весны–начале лета, когда температура воздуха поднимается до 20°С. Семена хорошо всходят при глубине залегания 0.5–3.0 см. Щирица особенно сильно заселяет пропашные культуры и в первую очередь сахарную свеклу. Семена хорошо сохраняют всхожесть в течение 20 и более лет. Механические повреждения оболочки семени, например, при прохождении культиватора, повышают его способность к прорастанию.

Проростки щирицы в первое время очень слабые. В этот период рост и развитие стебля и ли-

Таблица 2. Видовой состав сорняков в посеве сахарной свеклы (абсолютный контроль, середина июня)

Сорняки	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Среднее	
	шт./м^2				%
Малолетние двудольные сорняки (всего)	74	124	232	143	72.9
Щирица запрокинутая	41	83	63	62.3	43.5
Марь белая	17	26	28	23.7	16.5
Подмаренник цепкий	0.6	4	49	17.9	12.5
Ярутка полевая	5	2.8	19	8.9	6.2
Чистец полевой	6	4	52	20.7	14.4
Пикульник	1.2	1	–	0.7	0.5
Просвирник	0.2	0.2	3	1.1	0.8
Горец вьюнковый	1	2	5	2.7	1.9
Фиалка полевая	2	0.8	12	4.9	3.4
Воловик	–	–	1	0.3	0.2
Злаки (всего)	9	7	144	53.3	27.1
Многолетние сорняки (всего)	–	0.2	–	0.07	0.04
Сумма сорняков	83	131	376	197	100

стьев находятся в состояния покоя, и развивается главным образом корневая система. После появления первых настоящих листьев рост стебля и последующих листьев идет очень быстро. Раннее отрастание относительно мощной корневой системы заметно повышает устойчивость щирицы к традиционным свекловичным гербицидам. Поэтому ее ставят в один ряд с такими трудноискоренимыми сорняками, как марь белая, горцы, просвирник, подмаренник и др. При высокой численности всходов щирицы в посеве урожайность сахарной свеклы, как правило, в большей степени зависит от успешности борьбы с этим сорняком.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нарастание массы проростка сахарной свеклы с момента перехода его на самостоятельное питание характеризовалось типичной *S*-образной кривой роста [12]. Обработки гербицидами (как правило, с конца апреля до середины июня) приходились на начальный замедленный период роста (1-й этап, индукционный период) и первый период интенсивного нарастания массы сахарной свеклы 2-го этапа роста.

В зависимости от погодных условий, оказывающих большое влияние на продолжительность прорастания семян, рост и развитие проростков культуры и сорняков, срока высева семян сахарной свеклы (ранний, оптимальный, поздний) заметно варьировался характер засоренности поля. Всходы сорняков могли появиться раньше или позднее всходов сахарной свеклы. Но чаще всего сорняки прорастали одновременно с растениями сахарной свеклы. Продолжительность роста малолетних двудольных сорняков в фазе семядоли по нашим учетам менялась от 3-х до 5-ти сут, сахарной свеклы 7–10 сут. После появления 2-х настоящих листьев у широколистных сорных растений очередные несколько пар листьев отрастали в среднем через каждые 2 сут. На основании этих наблюдений в опыте осуществляли контроль за увеличением численности сорняков.

В условиях засушливой погоды численность сорняков при 3-кратном внесении гербицидов, как правило, постепенно убывала от обработки к обработке до несущественного остаточного количества. В условиях дождливой погоды численность сорняков 2-й волны в посеве сахарной свеклы, после 1-й обработки гербицидами могла быть большей, чем в абсолютном контроле, в котором часть площади уже была заселена подросшими сорняками первой волны.

Дружные всходы сорняков чаще отмечали перед первой химической прополкой посева сахарной свеклы. В последующие сроки внесения гербицидов всхожесть сорняков варьировала в зависимости от погоды и остаточной засоренности посева, в результате чего сообщество сорняков дифференцировалось по возрасту и массе растений (рис. 1).

Обработка сорняков в фазе семядолей минимально допустимыми нормами 3-компонентных гербицидов группы бетанала обеспечивала высо-

Рис. 1. Сорняки в фазе семядоли–начало отрастания 1-й пары настоящих листьев (а, б), 1-я пара настоящих листьев (в), 2 пары настоящих листьев (г), разновозрастные сорняки (д), переросшие сорняки (е).

кую чистоту посева в сочетании с низкой их фитотоксичностью для сахарной свеклы в возрасте семядолей–1-й пары настоящих листьев независимо от количества всходов растений культуры во время химической прополки. Гербициды не оказывали влияния на всхожесть отставших по времени растений сахарной свеклы. В случае более позднего прорастания сорняков относительно культуры проростки сахарной свеклы имели наибольшее конкурентное преимущество, т.к. ее растения уже имели развитые листья семядолей.

Химическая прополка сорняков преимущественно в фазе семядолей (до 90%) препаратом БЭОФ в норме расхода 1 л/га была наиболее каче-

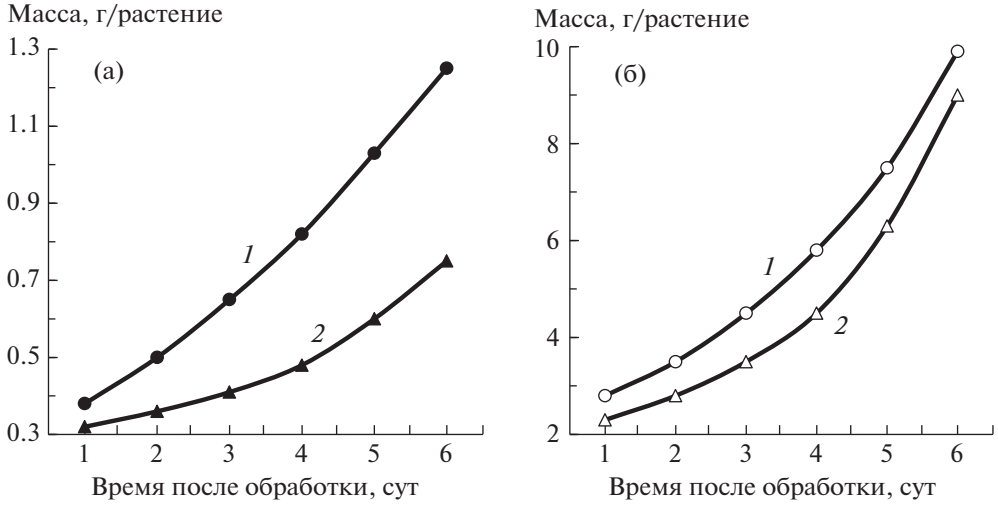

Рис. 2. Нарастание биомассы растений сахарной свеклы после 1-й обработки препаратом Бетанал 22 в фазе семядолей (а) и в фазе 2-х пар настоящих листьев (б): 1 – контроль, 2 – Бетанал 22 1.2 л/га.

ственной и слаботоксичной для растений сахарной свеклы. Эффективность действия БЭОФ в борьбе с сорняками составила 98–100%, его фитотоксичность для сахарной свеклы – 10% относительно контроля с ручной прополкой (табл. 2).

Небольшая задержка с обработкой гербицидом увеличивала неоднородность сорняков по фазе развития в зависимости от характера пика всхожести растений. Пологая кривая пика нарастания сорняков предопределяла наиболее высокую дифференциацию сообщества сорных растений. Сорняки, сформировавшие 2 настоящих листа, заметнее проявляли фазовую устойчивость к гербицидам, в результате чего при соотношении их в варианте 45% в фазе семядолей + 55% в фазе 2-х настоящих листьев эффективность БЭОФ в этой же норме расхода снизилась до 92–95%, а фитотоксичность гербицида для подросших растений сахарной свеклы уменьшилась до 8%.

При аналогичной неоднородности сорняков в опыте близкие результаты получены в варианте с применением препарата Митрон 1.5 л/га. В случае преобладания сорняков в фазе развития 2-х настоящих листьев гибель сорняков возрастала в варианте после внесения комбинации гербицидов БЭОФ + Митрон (1+1) л/га до 95–98%, а фитотоксичность этой смеси для сахарной свеклы в фазе семядолей составила 14%.

С нарастанием возрастной неоднородности сорной растительности (семядоли–4 настоящих листа) увеличение нормы расхода БЭОФ до 1.3 л/га не способствовало повышению эффективности гибели сорняков (85–92%), тогда как фитотоксичность его для сахарной свеклы заметно возрастала (до 17%). Комбинация гербицидов БЭОФ + Митрон (1.3 + 1.5) л/га лучше очищала посев от сорняков (89–95%), но и повышала их фитотоксичность для сахарной свеклы до 19%.

Увеличение нормы расхода БЭОФ до 1.5 л/га в вышеприведенной комбинации гербицидов для усиления действия на переросшие сорняки в фазе развития 6-ти настоящих листьев не обеспечивало полной чистоты посева, но повышало фитотоксичность этой схемы для сахарной свеклы в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев до 23%.

Сахарная свекла, испытывая стресс, как бы “замирала” после обработки гербицидом. Позднее у растений наступал период, когда растения сахарной свеклы возобновляли активный рост. В зависимости от дозы гербицида, условий среды, фазы развития сахарной свеклы их стрессовое состояние длилось от 6 до 14 сут. При избыточном внесении гербицидов растения сахарной свеклы были подвержены более длительной депрессии.

Например, длительное торможение накопления массы у опытных растений сахарной свеклы в фазе семядолей–начало отрастания 1-й пары настоящих листьев являлось следствием проявления токсикоза от воздействия гербицида Бетанал 22 (рис. 2а).

У растений сахарной свеклы в фазе 2-х пар настоящих листьев Бетанал 22 в этой же норме расхода вызывал кратковременное торможение роста с последующей активизацией накопления массы относительно контроля (рис. 2б). Отмечено, что накопление массы в период стресса происходило в основном за счет роста очередных но-

Таблица 3. Эффективность гербицидов в борьбе с широколистными сорняками и их фитотоксичность для сахарной свеклы после первой химической прополки (2018–2020 гг.)

Вариант	Фаза развития сорняков	Гербициды, л/га	Количество малолетних двудольных сорняков, шт./м^2*	Эффективность, %	Масса сахарной свеклы, г/100 растений**	Фитотоксичность, %
3	Семядоли (90%), 2 настоящих листа (10%)	БЭОФ 1.0	76	98–100	83/75	10
4	Семядоли (45%), 2 настоящих листа (55%)	БЭОФ 1.0	82	92–95	90/83	8
5	Семядоли (43%), 2 настоящих листа (57%)	БЭОФ 1.0 + + Митрон 1.0	79	95–98	92/79	14
6	Семядоли (45%), 2 настоящих листа (55%)	Митрон 1.5	73	90–95	90/82	9
7	Семядоли (15%), 2 настоящих листа (65%), 4 настоящих листа (20%)	БЭОФ 1.3	82	85–92	96/80	17
8	2 настоящих листа (60%), 4 настоящих листа (40%)	БЭОФ 1.3 + + Митрон 1.5	84	89–95	106/75	19
9	2 настоящих листа (35%), 4 настоящих листа (50%), 6 настоящих листьев (15%)	БЭОФ 1.5 + + Митрон 1.5	79	84–92	110/85	23
$НСР_{05}$					7	

*Количество двудольных сорняков в варианте перед внесением гербицидов. То же в табл. 4, 5.
**Масса 100 растений в контрольном и опытном вариантах через 6 сут после внесения гербицидов. То же в табл. 4, 5.

вых листьев, на которые менее всего оказывали влияние гербициды группы бетанала.

Эффективная химическая прополка первой волны сорняков создавала предпосылки для дружного прорастания второй волны, сорняки которой успешно подавляли в наиболее ранние фазы развития, несмотря на возросшую возрастную их неоднородность. Комбинации гербицидов БМП + Митрон (1.25 + 1.0) л/га, БЭОФ + Карибу + Тренд (1.0 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га), Митрон + Карибу + Тренд (1.0 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га) хорошо подавляли сорняки в фазе семядолей–2-х настоящих листьев с небольшим количеством растений в фазе 4-х настоящих листьев (табл. 3). Приведенные схемы применения гербицидов оказывали незначительное фитотоксическое действие на растения сахарной свеклы в возрасте 2–3-х пар настоящих листьев.

Для эффективной борьбы с сорняками в фазе 4-х настоящих листьев увеличили нормы расхода гербицидов группы бетанала и Митрона. Комбинации гербицидов БЭОФ + Митрон (1.3 + 1.5) л/га и БМП + Митрон (1.5 + 1.5) л/га очищали от сорняков посев сахарной свеклы с эффективностью 93–98%, а фитотоксичность гербицидов для сахарной свеклы составляла 12–13% относительно контроля с ручной прополкой. По переросшим сорнякам (6 настоящих листьев) применили более “жесткие” нормы расхода гербицидов группы бетанала, усилив их действие страховыми менее токсичными гербицидами Карибу и Митрон. Комбинации гербицидов БЭОФ + Митрон + Карибу + Тренд (1.5 + 1.5 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га) и БМП + Митрон + Карибу (1.8 + 1.0 + 0.03) контролировали засоренность посева с эффективностью 90–96%, а фитотоксичность их для сахарной свеклы была в пределах 16–18% к контролю. Следует обратить внимание, что в комбинации БМП с Карибу поверхностно-активное вещество Тренд не вносили ввиду заметного повышения фитотоксичности смеси для сахарной свеклы.

Всходы 3-й волны сорняков, особенно в условиях недостатка влаги в почве, были малочисленными и зависели от сроков и эффективности ранее внесенных гербицидов. Сообщество двудольных сорняков было неоднородным по возрасту и массе растений, а спектр засоренности суживался до нескольких видов, включавших в основном щирицу запрокинутую. При засоренности посева сорняками преимущественно в фазе семядолей–2-х настоящих листьев высокоэффективными были комбинации гербицидов БМП + Митрон

Таблица 4. Эффективность гербицидов в борьбе с широколистными сорняками и их фитотоксичность для сахарной свеклы после 2-й химической прополки (2018–2020 гг.)

Вариант	Фаза развития сорняков	Гербициды, л/га, кг/га	Количество малолетних двудольных сорняков шт,/м^2*	Эффективность,%	Масса сахарной свеклы, кг/100 растений**	Фитотоксичность, %
3	Семядоли (73%), 2 настоящих листа (27%)	БМП 1.25 + + Митрон 1.0	58	97–99	1.28/1.20	6
4	Семядоли (62%), 2 настоящих листа (37%), 4 настоящих листа (1%)	БЭОФ 1.0 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	64	93–96	1.28/1.18	8
5	Семядоли (65%), 2 настоящих листа (31%), 4 настоящих листа (4%)	Митрон 1.0 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	59	91–94	1.28/1.19	7
6	Семядоли (15%), 2 настоящих листа (68%), 4 настоящих листа (17%)	БЭОФ 1.3 + + Митрон 1.5	71	93–97	1.43/1.25	13
7	2 настоящих листа (69%), 4 настоящих листа (31%)	БМП 1.5 + + Митрон 1.5	66	94–98	1.43/1.26	12
8	2 настоящих листа (52%), 4 настоящих листа (40%), 6 настоящих листьев (8%)	БЭОФ 1.5 + + Митрон 1.5 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	64	90–94	1.57/1.28	18
9	2 настоящих листа (42%), 4 настоящих листа (45%), 6 настоящих листьев (13%)	БМП 1.8 + + Митрон 1.0 + + Карибу 0.03	71	92–96	1.57/1.32	16
HCP_{05}					0.08	

(1.5 + 1.5) л/га, БЭОФ + Карибу + Тренд (1.3 + + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га), которые очищали посев сахарной свеклы от сорняков с эффективностью соответственно 96–98 и 92–95%. При нарастании в посеве сорняков в фазе 4-х настоящих листьев последнюю комбинацию гербицидов дополняли препаратом Митрон в норме расхода 1.0 л/га. Смесь была более эффективна в подавлении сорняков этого возраста. Перечисленные комбинации гербицидов в вариантах 3–5 не оказывали фитотоксичного действия на сахарную свеклу в фазе развития 8–12 листьев. С увеличением количества возрастных сорняков в посеве не менее эффективным было применение более жесткой смеси, заменив в комбинации БЭОФ 1.3 л/га на Бетанал 22 1.5 л/га (вариант 6), однако фитотоксичность смеси для сахарной свеклы возрастала до 14% к контролю с ручной прополкой (табл. 4).

Перед смыканием рядков сахарной свеклы, когда растения культуры перекрывали междурядье, смесь БМП + Митрон (1.8 + 1.5) эффективно (90–93%) очищала посев от сорняков в фазе 2–4 настоящих листьев и подавляла рост переросших сорняков. Впоследствии остаточные сорняки не конкурировали с растениями культуры, находясь под покровом листового аппарата сахарной свеклы. Эта комбинация гербицидов отличалась более низкой фитотоксичностью для сахарной свеклы (11%).

При возросшей численности переросших сорняков (6–8 настоящих листьев) в посеве сахарной свеклы перед смыканием рядков применяли сложные смеси в максимально допустимых нормах расхода. Эффективно подавляла рост и развитие переросших сорняков смесь БЭОФ + Митрон + Карибу + Тренд (1.5 + 1.5 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га). Не погибшие переросшие сорняки продолжительное время были в угнетенном состоянии, что обеспечивало конкурентное преимущество сахарной свеклы. Гибель сорняков при применении схемы гербицидов, рассчитанной на подавление переросших сорняков, снижалась, эффективность гербицидов была на уровне 86–90%. Вместе с тем фитотоксичность этой схемы гербицидов для сахарной свеклы в сравнении с аналогичной схемой, примененной в этом же ва-

Таблица 5. Эффективность гербицидов в борьбе с широколистными сорняками и их фитотоксичность для сахарной свеклы после 3-й химической прополки (2018–2020 гг.)

Вариант	Фаза развития сорняков	Гербициды, л/га, кг/га	Количество малолетних двудольных сорняков, шт./м^2*	Эффективность, %	Масса сахарной свеклы, кг/100 растений**	Фитотоксичность, %
3	Семядоли (43%), 2 настоящих листа (52%), 4 настоящих листа (5%)	БМП 1.5 + + Митрон 1.5	37	96–98	12.7/12.2	3
4	Семядоли (16%), 2 настоящих листа (76%), 4 настоящих листа (8%)	БЭОФ 1.3 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	43	92–95	12.7/11.9	6
5	Семядоли (7%), 2 настоящих листа (80%), 4 настоящих листа (13%)	БЭОФ 1.3 + + Митрон 1.0 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	41	97–99	12.7/12.0	5
6	2 настоящих листа (65%), 4 настоящих листа (35%)	Бетанал 22 1.5 + + Митрон 1.0 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	35	95–98	12.7/11.6	8
7	2 настоящих листа (45%), 4 настоящих листа (50%), 6 настоящих листьев (5%)	БМП 1.8 + + Митрон 1.5	37	90–93	12.7/11.2	11
8	2 настоящих листа (20%), 4 настоящих листа (55%), 6–8 настоящих листьев (25%)	БЭОФ 1.5 + + Митрон 1.5 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	51	86–90	12.7/11.0	13
9	2 настоящих листа (10%), 4 настоящих листа (45%), 6–8 настоящих листьев (45%)	Бетанал 22 2.0 + + Карибу 0.03 + + Тренд 0.2	43	78–85	12.7/10.4	18
$НСР_{05}$					0.7	

рианте во время 2-й обработки, уменьшилась с 18 до 13%.

Повышение “жесткости” схемы за счет применения смеси Бетанала 22 с Карибу и Трендом в нормах расхода (2.0 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га) не обеспечило увеличения гибели сорняков, а фитотоксичность схемы для сахарной свеклы возрастала до 18% к контролю с ручной прополкой.

Сорняки интенсивно росли, накапливали массу и в зависимости от возраста увеличивали свою устойчивость к рекомендованным нормам расхода гербицидов. Например, масса 1-го растения щирицы запрокинутой в фазе семядолей варьировала в пределах 20–60 мг, 4-х настоящих листьев – 160–250 мг, 8-ми настоящих листьев – 2.5–6.0 г. Для сравнения масса растений сахарной свеклы соответственно в этих же фазах развития была равна 160–200 мг, 1.15–1.40 г, 28–36 г. Гербициды в рекомендуемых нормах расхода не оказывали существенного влияния на рост и развитие сахарной свеклы, начиная с возраста 3 пары настоящих листьев и в более поздние фазы роста. Нарастание массы сахарной свеклы после 3-х обработок гербицидами в вариантах 3–5 было на уровне контроля с ручной прополкой, что свидетельствовало о нивелировании их действия на растения культуры. Отставание роста растений сахарной свеклы относительно контроля отмечено в варианте 6.

Фитотоксичность гербицидов для растений сахарной свеклы в разной степени проявилась в вариантах 7–9. Последнее, скорее всего, было связано с продолжительностью депрессии растений сахарной свеклы после применения гербицидов в максимально допустимых нормах расхода по переросшим сорнякам во время 1-й и 2-й обработок.

Таблица 6. Влияние различных по “жесткости” схем гербицидов на продуктивные показатели сахарной свеклы (2018–2020 гг.)

Вариант	2018 г.		2019 г.		2020 г.		Среднее		
	Урожайность, т/га	Сахаристость, %	Урожайность, т/га	Сахаристость, %	Урожайность, т/га	Сахаристость, %	Урожайность, т/га	Сахаристость, %	Сбор сахара, т/га
1	13.7	19.7	16.2	19.5	9.6	20.0	13.2	19.7	2.60
2	39.4	19.6	54.1	19.0	36.4	19.7	43.3	19.4	8.40
3	38.2	19.5	52.8	19.2	35.9	19.8	42.3	19.5	8.25
4	37.8	19.5	55.7	18.8	33.7	19.7	42.4	19.3	8.18
5	38.5	19.4	53.6	19.1	34.4	19.7	42.2	19.4	8.18
6	37.6	19.5	54.6	18.9	33.2	19.5	41.8	19.3	8.07
7	36.5	19.3	50.9	19.1	32.6	19.6	40.2	19.3	7.76
8	35.1	19.4	51.3	18.8	30.9	19.6	39.1	19.3	7.55
9	35.6	19.3	49.8	18.7	30.7	19.3	38.7	19.1	7.39
$НСР_{05}$	2.8	0.4	3.7	0.4	3.2	0.4			

Средняя остаточная засоренность в вариантах опыта на 1 сентября варьировала от 0.26 до 0.75 шт./м^2. Наиболее высокая остаточная засоренность отмечена в вариантах с поздней химической прополкой переросших сорняков. Недостаток влаги в августе в годы исследования оказал заметное влияние на формирование вегетирующих сорняков. Растения не имели развитых боковых побегов, отличались низкой вегетативной массой.

Недобор влаги в конце вегетации сахарной свеклы в годы исследования определил высокую сахаристость корнеплодов (19–20%) (табл. 5). Продуктивные показатели сахарной свеклы формировались в зависимости от условий погоды, эффективности комбинации гербицидов на сорняки и токсикологической нагрузки ими на растения культуры. Урожайность на уровне контроля с ручной прополкой получена за счет оптимизации роста и развития сахарной свеклы в условиях, сочетающих низкую фитотоксичность комбинации гербицидов на растения культуры с высокой эффективностью химической прополки посева и длительным периодом сдерживания нарастания сорняков.

При использовании “мягких” схем гербицидов по сорнякам в ранних фазах развития в вариантах 3–6 достоверного снижения урожайности сахарной свеклы и расчетного сбора сахара не выявлено. Применение максимально допустимых и повышенных норм расхода гербицидов по переросшим сорнякам на всех этапах химической прополки создавало предпосылки для снижения продуктивных показателей сахарной свеклы. Расчетный сбор сахара в вариантах 7–9 достоверно снижался на 0.64–1.01 т/га. Таким образом, высокая эффективность химической прополки в сочетании с низкой фитотоксичностью для сахарной свеклы обеспечивалась при обработке наименьшими (из рекомендуемых) нормами расхода препаратов в ранних фазах развития сорняков: семядолей–1-й пары настоящих листьев.

Растения сахарной свеклы, так же как и растения сорняков, наиболее чувствительны к гербицидам в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев. Вторая и последующие обработки гербицидами в нормированных дозах, как правило, не приводили к глубоким физиологическим отклонениям у сахарной свеклы, однако могли продлить период депрессии, если растения не восстанавливали полностью свои жизненные функции. У поврежденных растений проявлялись компенсаторные реакции, позволяющие до известной степени сохранить устойчивое состояние функций организма и выйти из стресса после всех обработок гербицидами с более интенсивным новообразованием структур, процессов роста и отложения веществ в запасающие ткани. Поэтому, чаще всего, в производстве после серии обработок нормированными дозами гербицидов в условиях благоприятной погоды наблюдают лишь незначительное торможение роста растений к середине вегетации культуры.

ВЫВОДЫ

1. Химическая прополка сорняков в фазе семядолей препаратом БЭОФ 1.0 л/га обеспечивала высокую чистоту посева (98–100%) в сочетании с низкой фитотоксичностью для сахарной свеклы. Задержка с обработкой гербицидом приводила к

увеличению фазовой неоднородности сообщества сорняков и снижению его эффективности действия на сорняки (92–95%), сформировавших 2 настоящих листа у 55% растений. При аналогичной неоднородности сорняков эффективность препарата Митрон 1.5 л/га была равна 90–95%. Фитотоксичность гербицидов для сахарной свеклы в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев составила 8–10% по показателю снижения нарастания массы относительно контроля с ручной прополкой.

С увеличением фазовой неоднородности сорняков в посеве (семядоли–4 настоящих листа) применение комбинации гербицидов БЭОФ 1.0 л/га + Митрон 1.0 л/га и БЭОФ 1.3 л/га + Митрон 1.5 л/га с эффективностью действия на сорняки 95–98 и 89–95%, сопровождалось повышением фитотоксичности гербицидов для сахарной свеклы до 14–19%.

Обработка переросших сорняков (до фазы 6 настоящих листьев) смесью БЭОФ 1.5 л/га + + Митрон 1.5 л/га не приводила к повышению ее эффективности (84–92%), но фитотоксичность смеси для сахарной свеклы в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев возрастала до 23%.

2. Сахарная свекла в зависимости от нормы расхода гербицида, условий среды, фазы развития была в стрессовом состоянии в течение от 6-ти до 14-ти сут. Наиболее сильное торможение накопления массы под действием гербицида Бетанал 22 1.2 л/га у опытных растений сахарной свеклы отмечали в фазе семядолей–начало отрастания 1-й пары настоящих листьев. В фазе 2-х пар настоящих листьев Бетанал 22 в этой же норме расхода вызывал кратковременное торможение роста с последующей активизацией накопления массы относительно контроля.

3. Эффективная химическая прополка первой волны сорняков создавала предпосылки для дружного прорастания второй волны. Сорняки, которые успешно подавлялись в наиболее ранние фазы развития, обрабатывали комбинациями гербицидов БМП + Митрон (1.25 + 1.0) л/га; БЭОФ + Карибу + Тренд (1.0 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га); Митрон + Карибу + Тренд (1.0 + 0.03 + + 0.2) л/га (кг/га) в фазе семядолей–2-х настоящих листьев, и они не оказывали сильного фитотоксического действия на растения сахарной свеклы в возрасте 2–3-х пар настоящих листьев.

Комбинации гербицидов БЭОФ + Митрон (1.3 + 1.5) л/га и БМП + Митрон (1.5 + 1.5) л/га очищали посев сахарной свеклы от сорняков в фазе 2–4-х настоящих листьев с эффективностью 93–98%, а фитотоксичность гербицидов для сахарной свеклы возрастала до 12–13% относительно контроля с ручной прополкой. При наличии переросших сорняков (6 настоящих листьев) более “жесткие” комбинации гербицидов (БЭОФ + + Митрон + Карибу + Тренд (1.5 + 1.5 + 0.03 + + 0.2), БМП + Митрон + Карибу (1.8 + 1.0 + 0.03) л/га (кг/га) контролировали засоренность посева с эффективностью 90–96%. Фитотоксичность их для сахарной свеклы возрастала до 16–18% к контролю.

4. Всходы 3-й волны сорняков были малочисленными и зависели от сроков и эффективности ранее внесенных гербицидов. Сорняки в фазе семядолей–2-х настоящих листьев хорошо контролировались комбинациями гербицидов БМП + + Митрон (1.5 + 1.5) л/га; БЭОФ + Карибу + + Тренд (1.3 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га), которые очищали посев сахарной свеклы от сорняков с эффективностью 96–98 и 92–95%. Для подавления сорняков в фазе 4-х настоящих листьев последнюю комбинацию гербицидов дополняли препаратом Митрон 1.0 л/га. Комбинации гербицидов не оказывали фитотоксичного действия на сахарную свеклу в фазе развития 8–12-ти листьев. С увеличением количества возрастных сорняков в посеве не менее эффективным было применение более “жесткой” смеси, заменив в комбинации БЭОФ 1.3 л/га на Бетанал 22 1.5 л/га, однако фитотоксичность смеси для сахарной свеклы возрастала до 14% к контролю с ручной прополкой. Смесь БМП + Митрон (1.8 + 1.5) эффективно (90–93%) очищала посев от сорняков в фазе 2–4 настоящих листьев и подавляла рост переросших сорняков. Комбинация гербицидов отличалась более низкой фитотоксичностью для сахарной свеклы (11%). Гибель сорняков при применении смеси БЭОФ + Митрон + Карибу + Тренд (1.5 + 1.5 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га), рассчитанной на подавление переросших сорняков, снижалась до 86–90%, а фитотоксичность этой схемы для сахарной свеклы составила 13%.

Повышение “жесткости” схемы за счет применения смеси Бетанала 22 с Карибу и Трендом в нормах расхода (2.0 + 0.03 + 0.2) л/га (кг/га) не обеспечивало увеличения гибели переросших сорняков, а фитотоксичность схемы для сахарной свеклы возрастала до 18% к контролю с ручной прополкой.

5. Продуктивность сахарной свеклы зависела от факторов, обеспечивающих оптимизацию роста и развития растений в условиях, сочетающих высокую эффективность химической прополки посева с низкой фитотоксичностью гербицидов для растений культуры. При использовании

"мягких" схем применения гербицидов по сорнякам в ранних фазах развития в вариантах 3–6 снижения урожайности сахарной свеклы и расчетного сбора сахара не выявлено. Применение максимально допустимых и повышенных норм расхода гербицидов по переросшим сорнякам на всех этапах химической прополки создавало предпосылки для снижения продуктивных показателей сахарной свеклы. Расчетный сбор сахара в вариантах 7–9 достоверно снижался на 0.64–1.01 т/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шпаар Д., Дрегер Д., Захарченко А.* Сахарная свекла. Минск, 2004. 326 с.
2. *Иващенко А.А.* Современные тенденции защиты посевов сахарной свеклы от сорняков // Защита и карантин раст. 2005. № 2. С. 26–30.
3. *Иващенко А.А.* Особенности защиты посевов сахарной свеклы от сорняков в условиях температурного стресса // Защита и карантин раст. 2014. № 3. С. 25–26.
4. *Спиридонов Ю.Я., Ларина Г.Е., Шестаков В.Г.* Методическое руководство по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве. М.: Печатный Город, 2009. 252 с.
5. *Баздырев Г.И.* Защита сельскохозяйственных культур от сорных растений. М.: Колос, 2004. 328 с.
6. *Артохин К.С.* Сорные растения. М.: Печатный город, 2010. 272 с.
7. *Дворянкин Е.А.* Особенности проявления фитотоксичности гербицидов группы бетанала на сахарной свекле // Сахар. свекла. 2011. № 9. С. 25–29.
8. *Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
9. *Паденов К.П., Довбан В.К.* Сорные растения, их вредоносность, методы учета и меры борьбы. Минск, 1979. 55 с.
10. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.
11. *Дворянкин Е.А., Дворянкин А.Е.* Полевая оценка фитотоксичности гербицидов в свекловичных посевах // Сахар. свекла. 2015. № 10. С. 38–41.
12. *Гродзинский А.М., Гродзинский Д.М.* Краткий справочник по физиологии растений. Киев: Наукова думка, 1973. 592 с.

Effectiveness of Herbicides for Weed Control and Their Phytotoxicity for Sugar Beet depending on Age of the Treated Plants and Consumption Rates of Chemicals

E. A. Dvoryankin

The A.L. Mazlumov All–Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar p. VNIISS 86, Ramonsky district, Voronezh region 396030, Russia

E-mail: dvoryankin149@gmail.com

In field experiments at the VNIISS experimental field, various combinations of herbicides were tested against juvenile dicotyledonous weeds in the sugar beet crop in 2018–2020, including preparations: Betanal maksPro (BMP), Betanal Expert OF (BEOF), Betanal 22, Mitron, Caribou. The effectiveness of chemical weeding has been investigated depending on the age of weeds and the rate of consumption of drugs. It is shown that the highest efficiency of chemical weeding (98–100%) in combination with low phytotoxicity for sugar beet was provided when processing the lowest (of the recommended) consumption rates of drugs in the early phases of weed development: cotyledons–the 1st pair of true leaves. The delay in herbicide treatment increased the heterogeneity of weeds in the development phase and reduced the effectiveness of chemical weeding. Sugar beet, especially in the early stages of development, experienced stress after the introduction of herbicides for 6 to 14 days. The duration of stress depended on the dose of herbicide, environmental conditions, and the phase of sugar beet development. With excessive application of herbicides, sugar beet plants were subject to a longer depression. The formation of productive indicators of sugar beet depends on weather conditions, the effectiveness of a combination of herbicides on weeds and their toxicological load on crop plants. The use of maximally permissible and increased herbicide consumption rates for overgrown weeds at all stages of chemical weeding created prerequisites for reducing the productive indicators of sugar beet. In experiments where relatively "rigid" herbicide schemes were used, the calculated sugar harvest decreased by 0.64–1.01 t/ha.

Key words: sugar beet, herbicides, weeds, efficiency, phytotoxicity, productivity.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 82–86

Пестициды

УДК 543.612/621/684,632.937.3

ВЛИЯНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ, ВХОДЯЩЕГО В СОСТАВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ГРИБОВ РОДА *Lecanicillium*, НА ФИТОФАГОВ ЗАПАДНОГО ЦВЕТОЧНОГО ТРИПСА И ПЕРСИКОВУЮ ТЛЮ[§]

© 2023 г. Г. В. Митина[1,*], Е. А. Степанычева[1], Ю. А. Титов[2], А. А. Чоглокова[1], М. А. Черепанова[1], А. Г. Кузьмин[2]

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия
[2]Институт аналитического приборостроения РАН
198095 Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31–33, лит. А, Россия
**E-mail: galmit@rambler.ru*

Поступила в редакцию 27.10.2022 г.
После доработки 15.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

Ранее с помощью квадрупольного масс-спектрометра МС7-200 разработки ИАП РАН в составе летучих органических соединений (ЛОС), выделяемых в воздушную среду энтомопатогенными грибами (ЭПГ) рода *Lecanicillium,* был обнаружен диоксид серы. В данной работе оценили влияние этого соединения на таких опасных фитофагов как западный цветочный трипс *Frankliniella occidentalis* и персиковая тля *Myzus persicae* в низких дозах, соответствующих содержанию диоксида серы в составе ЛОС над растущим мицелием грибов. Установлено, что диоксид серы не оказывал негативного влияния на самок трипса *F. occidentalis* и их плодовитость при введении в виалы сернистого газа в концентрации 9 и 17 ppm и выдерживании в течение 2-х ч. В дозе 33 ppm диоксид серы вызывал 10%-ную смертность самок трипса через 2 ч и 15.4%-ную – через 1 сут, при этом наблюдали снижение плодовитости самок на 36%. Диоксид серы в концентрациях 17–33 ppm был нетоксичен для самок персиковой тли через 2 ч. Смертность тлей на уровне 26% была отмечена через 2 сут при концентрации диоксида серы 33 ppm, при этом плодовитость снизилась на 22%. В дозе 23 ppm диоксид серы снижал плодовитость тлей наиболее существенно – на 30%. Полученные данные свидетельствуют о влиянии диоксида серы, содержащегося в составе ЛОС грибов, на поведенческие реакции фитофагов.

Ключевые слова: анализ летучих органических соединений, энтомопатогенные грибы, фитофаги.
DOI: 10.31857/S0002188123030092, **EDN:** KOABUJ

ВВЕДЕНИЕ

Летучие органические соединения (**ЛОС**), выделяемые энтомопатогенными грибами (**ЭПГ**), паразитирующими на насекомых, в последнее время все больше привлекают внимание исследователей (биофизиков, химиков, специалистов в области патологии насекомых), поскольку эти соединения оказывают существенное влияние на поведенческие реакции насекомых. ЛОС грибов могут обладать репеллентными или аттрактивными свойствами, проявлять антифидантное действие, обладать токсичностью, изменять плодовитость [1–5]. Эти свойства необходимо учитывать при разработке биопрепаратов на основе ЭПГ, которые при определенных условиях могут успешно конкурировать с традиционными химическими инсектицидами [6].

Исследования влияния ЛОС энтомопатогенных грибов рода *Lecanicillium* – природных патогенов сосущих насекомых из отряда Hemiptera – показали, что мицелий разных видов и штаммов может вызывать различные поведенческие реакции у насекомых: от репеллентности до аттрактивности [7]. В отношении персиковой тли выявлено, что все штаммы ЭПГ, спорулирующий мицелий которых значительно снижал привлекательность пищевого субстрата для питания и развития потомства тли, обладали выраженной патогенностью [8]. Количественный и качественный состав ЛОС, выделяемых в воздушную среду грибами рода *Lecanicillium*, изученный с помощью квадру-

[§]Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-016-00241.

польного масс-спектрометра с прямым капиллярным вводом пробы, показал большое разнообразие выделяемых соединений. Основными обнаруженными компонентами газовой фазы над мицелием были ацетон, пентан, уксусная кислота. У отдельных штаммов были обнаружены такие вещества как гексаналь, гексилацетат, этилацетат [9]. В этих же исследованиях впервые было зарегистрировано наличие в ЛОС диоксида серы (сернистого газа). Его максимальное содержание в составе ЛОС грибов над мицелием грибов рода *Lecanicillium* достигало 41 ppm.

Токсичность диоксида серы для различных членистоногих известна давно и широко используется для борьбы с вредными насекомыми путем фумигации в высоких дозах [10, 11]. Негативное влияние диоксида серы на членистоногих может проявляться в различной степени в зависимости от их систематической принадлежности: газ может вызывать снижение веса личинок, изменение поведенческих реакций, снижение темпов развития, ухудшение морфометрических характеристик, снижение плодовитости и рост смертности [12].

Для выявления роли отдельных соединений, входящих в состав ЛОС ЭПГ, нами была оценена токсичность диоксида серы для западного цветочного трипса и персиковой тли и влияние соединения на их плодовитость. Оба вида насекомых характеризуются высокой скоростью воспроизводства и относятся к экономически важным сосущим фитофагам, имеющим более 300 растений-хозяев. Помимо непосредственного повреждения растений при питании они представляют серьезную опасность в качестве переносчиков вирусных заболеваний [13].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторные культуры *Frankliniella occidentalis* Pergande (Thysanoptera: Thripidae) содержали на вегетирующей фасоли, *Myzus persicae* Sulzer (Hemiptera: Aphididae) – на проростках конских бобов (*Vícia faba* L.) при постоянной температуре 23–25°C и 18-часовом световом дне. Для оценки токсичности диоксида серы для тест-насекомых отбирали половозрелых самок.

Оценка токсичности диоксида серы для самок западного цветочного трипса и влияния на их плодовитость. Самок трипса отбирали в пробирки Эппендорф по 10 особей, а затем выпускали их в камеры определенного типа. В первой серии опытов использовали хроматографические стеклянные виалы объемом 20 мл, в которые помещали насекомых. Виалы закрывали завинчивающимися крышками с силиконовыми прокладками. С помощью медицинского шприца в виалы, в которых газовая среда представляла собой атмосферный воздух, вводили калиброванную смесь диоксида серы (SO_2) с концентрацией 107 ppm в азоте, давление внутри при этом повышалось. В контроле в виалы вкалывали чистый азот, для того чтобы в них было такое же давление, как и в виалах с диоксидом серы.

В другой серии опытов для повышения концентрации SO_2 использовали пластиковые камеры объемом 65 мл, в которые помещали самок трипса и плотно закрывали пластиковыми крышками. Непосредственно перед вводом газа в крышке делали 2 микроотверстия. В одно отверстие с помощью шприца в камеру вводили кислород, затем калиброванную смесь SO_2 в азоте, второе отверстие оставалось открытым для сброса избытка давления. Аналогичным образом добавлением кислорода и азота обеспечивали соответствующую концентрацию SO_2. Контроль концентрации диоксида серы в виале проводили с помощью квадрупольного масс-спектрометра МС7-200. После ввода газов отверстия быстро заклеивали скотчем. Через 2 ч учитывали число живых и погибших самок. Живых особей трипса переносили на лист фасоли, помещенный на слой 1%-ного агара в чашке Петри. Чашки закрывали пленкой с мелкими отверстиями, для предотвращения образования конденсата и оставляли на 1 сут при 25°C и постоянном освещении. Через 1 сут самок удаляли, а листья с отложенными на них яйцами оставляли на 5–6 сут для дальнейшего подсчета отродившихся личинок и определения плодовитости. Количество вводимого SO_2 рассчитывали, исходя из данных по его содержанию в смесях ЛОС над мицелием изученных грибов [14].

Оценка токсичности диоксида серы для персиковой тли M. persicae и влияния на ее плодовитость. Самок тли (по 7 особей) помещали в 3 хроматографические виалы объемом 20 мл, герметично закрывали и с помощью медицинского шприца вводили в них калиброванную смесь SO_2 в азоте. Затем путем добавления соответствующих количеств кислорода и азота в разных виалах создавали различные концентрации SO_2 (17, 23 и 33 ppm). Тлей выдерживали 2 ч в виалах с разной концентрацией SO_2, после чего кисточкой переносили в пластиковые камеры объемом 50 $см^3$ с микроотверстиями на лист боба, помещенный на слой 1%-ного агара, и оставляли на 2 сут при комнатной температуре и постоянном освещении для учета числа выживших самок и отродившихся личинок дочернего поколения.

Таблица 1. Токсичность диоксида серы для самок западного цветочного трипса *F. occidentalis* и его влияние на количество отродившихся личинок

Вариант	Смертность самок трипса, %		Плодовитость на одну самку	Изменение плодовитости, %	Вероятность *p*
	2 ч	1 сут			
В хроматографических виалах (20 мл)					
Контроль (10 мл азота)	0.5 ± 0.5 a**	1.3 ± 1.3 a	0.7 ± 0.2		
SO_2 (33 ppm) 10 мл смеси SO_2 в азоте*	9.6 ± 2.5 b** $p = 0.007$	15.4 ± 2.7 b $p = 0.001$	0.46 ± 0.04	–36.1	0.316
В пластиковых камерах (65 мл)					
Контроль (20 мл кислорода)	0.0	0.0 a	1.1 ± 0.1		
SO_2 (57 ppm) 55 мл + + 40 мл кислорода	0.0	12.7 ± 3.6 b $p = 0.025$	1.4 ± 0.03	+27.3	0.069

*Смесь газов содержала 107 ± 6 ppm SO_2, остальное – азот.
**Различными буквами в рядах отмечены варианты, достоверно отличающиеся от контроля (по тесту Tukey, $P \le 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В предварительных экспериментах на трипсе сернистый газ вводили в виалы в объемах 2 и 4 мл (9 и 17 ppm SO_2 на объем виалы). При этом SO_2 не оказывал какого-либо негативного влияния на самок трипса и их плодовитость (без приведения данных). При увеличении объема SO_2 до 10 мл (33 ppm SO_2 на объем виалы), вводимого в смеси с азотом, уже через 2 ч наблюдали смертность 9.6% самок трипса, через 1 сут смертность трипса составила 15.4% (различия с контролем достоверны). Количество отродившихся личинок в опыте было меньше на 36% по сравнению с контролем (табл. 1). Использование камер объемом 65 мл позволило повысить концентрацию SO_2 до 57 ppm. Смертность трипса при этом не превышала 12.7% через 1 сут (различия с контролем достоверны), плодовитость трипса не снизилась, а напротив, отмечено некоторое увеличение числа потомства по сравнению с контролем.

В опытах с персиковой тлей было установлено, что диоксид серы в испытанных концентрациях не проявлял токсичности для тли через 2 ч после введения в виалы (без приведения данных). Смертность тлей на уровне 26% была отмечена через 2 сут при использовании максимальной концентрации – 33 ppm SO_2 в смеси с 10 мл азота, но при этом плодовитость снизилась всего в 1.2 раза (табл. 2). Во всех вариантах смертность и плодовитость достоверно не отличались от показателей в контроле. При концентрации SO_2 23 ppm плодовитость тлей снизилась на 30%, при этом различия с контролем были несущественными, но имелась статистическая тенденция ($p = 0.073$).

В результате наших опытов установлено, что при использовании низких концентраций диоксида серы (9 и 17 ppm) газ не оказывал негативного влияния на самок трипса и персиковой тли. Однако в дозе 33 ppm диоксид серы вызывал смертность трипса в количестве 10% через 2 ч и 15.4% через 1 сут, при этом происходило снижение плодовитости самок на 36%. Доза диоксида серы 33 ppm также вызывала смертность персиковой тли на уровне 26%. Отсутствие выраженного действия диоксида серы на тестируемые объекты могло быть связано с использованием в работе низких доз газа (близких к его количеству в пробах ЛОС, собранных над культурой грибов) и непродолжительным периодом экспозиции.

Против вредителей зерна *Sitophilus oryzae* и *Tribolium confusum* для достижения 100%-ной гибели взрослых особей применяли 15000 ppm и 30000 ppm диоксида серы [10]. Для достижения гарантированного эффекта против всех стадий мучнистого червеца *Pseudococcus maritimus* применяли фумигацию диоксидом серы в дозе 100 ppm в течение 4-х сут. Причем использование доз 400 и 500 ppm в течение 1 сут позволяла достичь только 90 и 96% смертности яиц червеца соответственно [11]. В настоящей работе показали, что диоксид серы даже в количествах 23–33 ppm, соответствующих содержанию газа в смеси ЛОС, которые выделяются спорулирующим мицелием ЭПГ, влияет на жизнеспособность и плодовитость изученных насекомых. Ранее нами был установлен репеллентный эффект мицелия грибов вида *L. muscarium* для личинок и имаго западного цветочного трипса [15].

Некоторые исследования показали, что умеренно повышенная концентрация диоксида серы (100 ppm) при непродолжительном воздействии (4 ч) может увеличить количество тли [16]. Есть данные, что в условиях повышенного содержания

Таблица 2. Токсичность диоксида серы для самок тлей *M. persicae* и его влияние на количество отродившихся личинок

Вариант	Смертность тли через 2 сут, %	Вероятность *p*	Плодовитость на одну самку	Изменение плодовитости, %	Вероятность *p*
Контроль (5 мл кислорода)	6.2 ± 3.8 a		3.5 ± 0.5 a		
SO_2 (17 ppm) 6.5 мл + + 5 мл кислорода	5.7 ± 3.5 a	0.929	3.8 ± 0.5 a	+8.5	0.626
Контроль (9 мл кислорода)	5.7 ± 3.9 b		3.3 ± 0.3 b		
SO_2 (23 ppm) 9.2 мл + + 9 мл кислорода	6.2 ± 4.3 b	0.929	2.3 ± 0.4 b	−30.3	0.073
Контроль (10 мл азота)	16.2 ± 1.3 c		3.2 ± 0.5 c		
SO_2 (33 ppm) 10 мл + + 10 мл азота	25.9 ± 8.4 c	0.299	2.6 ± 0.7 c	−21.8	0.510

Примечание. Одинаковыми буквами в рядах отмечены варианты, где различие опыта с контролем не достоверно (по тесту Tukey, $p \le 0.05$).

диоксида серы тли растут быстрее [17]. В наших опытах также наблюдали тенденцию к повышению количества потомства тлей при дозе диоксида серы 17 ppm. Однако с повышением его концентрации отмечено снижение плодовитости тлей. Известно, что споры ЭПГ могут негативно влиять на плодовитость и питание их фитофагов, причем это влияние может быть связано с репеллентностью ЭПГ. Например, гриб *Beauveria bassiana*, оказывающий отрицательное действие на жизнеспособность бахчевой тли *Aphis gossypii*, обладал также репеллентным действием для фитофага. В условиях свободного выбора тли отдавали предпочтение растениям, необработанным спорами гриба [18]. В наших опытах снижение плодовитости самок трипсов и тлей также может быть результатом репеллентности сернистого газа, обнаруженного в составе ЛОС над мицелием ЭПГ рода *Lecanicillium*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диоксид серы, обнаруженный в составе летучих органических соединений (ЛОС), выделяемых в воздушную среду энтомопатогенными грибами (ЭПГ) рода *Lecanicillium* оказывал слабое токсическое действие на западного цветочного трипса и персиковую тлю. В дозе 33 ppm, соответствующей среднему содержанию диоксида серы в составе ЛОС над растущим мицелием грибов, газ вызывал смертность 15.4% имаго трипса и 26% персиковой тли через 1 сут, при этом наблюдали тенденцию к снижению плодовитости самок обоих вредителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boucias D.G., Lietze V., Teal P.* Chemical signals that mediate insect-fungal interactions // Biocommunicat. Fungi, 2012. P. 305–336.
2. *Butt T.M., Coates C.J., Dubovskiy I.M., Ratcliffe N.A.* Entomopathogenic fungi: new insights into host–pathogen interactions // Adv. Genet. 2016. V. 94. P. 307–364.
3. *Stepnowski P., Gołębiowski M.* Comparison of volatile compounds released by entomopathogenic fungi // Microbiol. Res. 2018. V. 214. P. 129–136.
4. *Lozano-Soria A., Picciotti U., Lopez-Moya F. et al.* Organic compounds from entomopathogenic and nematophagous fungi, repel banana black weevil (*Cosmopolites sordidus*) // Insects. 2020. V. 11. № 8. P. 509–528.
5. *Baleba S.B.S., Agbessenou A., Getahun M.N., Akutse K.S.* Infection of the stable fly, *Stomoxys calcitrans*, L. 1758 (Diptera: Muscidae) by the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* (Hypocreales: Clavicipitaceae) // Fungal Biol. 2021. V. 2. P. 1–16.
6. Справочник пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории РФ за 2022 год. М.: Изд-во Листерра, 944 с.
7. *Митина Г.В., Степанычева Е.А., Чоглокова А.А.* Влияние разных видов энтомопатогенных грибов рода *Lecanicillium* на поведенческие реакции и выживаемость оранжерейной белокрылки *Trialeurodes vaporariorum* // Вестн. защиты раст. 2020. Т. 103. № 4. С. 265–268.
8. *Mitina G.V., Stepanycheva E.A., Choglokova A.A.* Features of behavioral reactions of the peach aphid *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera, Aphididae) to volatile organic compounds of entomopathogenic fungi of the *Genus lecanicillium* // Entmol. Rev. 2021. V. 101. P. 1015–1023.
9. *Кузьмин А.Г., Титов Ю.А., Митина Г.В.* Масс-спектрометрические исследования состава газовыделе-

ния живых организмов // Журн. тех. физики. 2022. Т. 92. № 7. С. 974–977.

10. *Riudavets J., Pons M.J., Gabarra R., Castañé C., Alomar O., Vega L.F, Guri S.* The toxicity effects of atmospheres with high content of carbon dioxide with addition of sulphur dioxide on two stored-product pest species: *Sitophilus oryzae* and *Tribolium confusum* // J. Stored Prod. 2014. V. 57. P. 58–62.
11. *Liu Y.B.* Sulfur dioxide fumigation for postharvest control of mealybugs on harvested table grapes // J. Economic Entomol. 2019. V. 112. № 2. P. 597–602.
12. *Селиховкин А.В.* Ответные реакции насекомых дендрофагов на воздействие промышленного загрязнения воздуха. Биосфера // Междисциплин. научн. и прикл. журн. по пробл. познания и сохранения биосферы. 2013. Т. 5. № 1. С. 47–76.
13. *Blackman R.L., Eastop V.F.* Aphids on the world's crops. An Identification and information guide. Chichester: John Wiley& Sons, 2000. 414 p.
14. *Кузьмин А.Г., Титов Ю.А., Митина Г.В., Чоглокова А.А.* Масс-спектрометрические исследования состава летучих органических соединений, выделяемых различными видами грибов рода *Lecanicillium* // Научн. приборостроение. 2021. Т. 31. № 4. С. 71–78.
15. *Митина Г.В., Степанычева Е.А., Петрова М.О.* Влияние летучих соединений и экстрактов мицелия энтомопатогенных грибов на поведенческие реакции и жизнеспособность западного цветочного трипса *Frankliniella occidentalis* (Pergande) // Паразитология. 2019. Т. 53. № 3. С. 230–240.
16. *McNeil, S., Whittaker J.B.* Air pollution and tree-dwelling aphids. Population dynamics of forest insects // Intercept. 1990. P. 195–208.
17. *Whittaker J.B.* Insects and plants in a changing atmosphere // J. Ecol. 2001. V. 89. P. 507–518.
18. *Rashki M., Shirvani A.* The effect of entomopathogenic fungus, *Beauveria bassiana* on life table parameters and behavioural response of *Aphis gossypii* // Bull. Insectol. 2013. V. 66. P. 85–91.
19. *Warrington S.* Relationship between SO_2 dose and growth of the pea aphid, *Acyrthosiphon pisum*, on peas // Environ. Pollut. 1987. V. 43. № 2. P. 155–162.
20. *Houlden G., McNeil S., Aminu-Kano M., Bell J.N.* Air pollution and agricultural aphid pests. I: Fumigation experiments with SO_2 and NO_2 // Environ. Pollut. 1990. V. 67. № 4. P. 305–314.
21. *Liu Y.-B.* Sulfur dioxide fumigation for postharvest control of mealybugs on harvested table grapes // J. Economic Entomol, 2019. V. 112. № 2. P. 597–602.
22. *Reitz S.R., Gao Y.L., Lei Z.R.* Thrips: Pests of concern to China and the United States // Agricult. Sci. China. 2011. V. 10. P. 867–892.

Effect of Sulfur Dioxide as a Component of the Volatile Organic Compounds of Fungi of the Genus *Lecanicillium* on the Phytophagous Western Flower Thrips and Peach Aphid

G. V. Mitina[a,#], E. A. Stepanycheva[a], Yu. A. Titov[b], A. A. Choglokova[a], M. A. Cherepanova[a], and A. G. Kuzmin[b]

[a] *All-Russian Institute of Plant Protection Shosse Podbel'skogo, 3, St. Petersburg–Pushkin 196608, Russia*

[b] *Institute for Analytical Instrumentation of RAS ul. Ivana Chernykha 31–33, lit. A., Saint Petersburg, 198095, Russia*

[#] *E-mail: galmit@rambler.ru*

Earlier, using the MS7-200 quadrupole mass spectrometer developed by the IAP RAS, sulfur dioxide was detected as part of volatile organic compounds (VOCs) released into the air by entomopathogenic fungi (EPF) of the genus *Lecanicillium*. In this work, we evaluated the effect of this compound on such dangerous phytophages as the Western flower thrips *Frankliniella occidentalis* and the peach aphid *Myzus persicae* in low doses corresponding to the content of sulfur dioxide in the composition of VOCs over the growing mycelium of fungi. It was found that sulfur dioxide did not have a negative effect on female thrips *F. occidentalis* and their fertility when sulfur dioxide is injected into vials at concentrations of 9 and 17 ppm and kept for 2 hours. At a dose of 33 ppm, sulfur dioxide caused a 10% mortality of female thrips after 2 hours and 15.4% after 1 day, while a 36% decrease in female fertility was observed. Sulfur dioxide at concentrations of 17–33 ppm was nontoxic for peach aphid females after 2 hours. Aphid mortality at the level of 26% was noted after 2 days at a sulfur dioxide concentration of 33 ppm, while fertility decreased by 22%. At a dose of 23 ppm, sulfur dioxide reduced the fertility of aphids most significantly – by 30%. The data obtained indicate the influence of sulfur dioxide contained in the composition of fungal VOCs on the behavioral reactions of phytophages.

Key words: analysis of volatile organic compounds, entomopathogenic fungi, phytophages.

АГРОХИМИЯ, 2023, № 3, с. 87–96

Агроэкология

УДК 631.445.42:546.16:546.15:546:14(571.1)

ВАЛОВОЕ СОДЕРЖАНИЕ И ПОДВИЖНЫЕ ФОРМЫ ГАЛОГЕНОВ (ФТОРА, БРОМА И ЙОДА) В ПОЧВАХ ТЫВЫ[§]

© 2023 г. Г. А. Конарбаева[1,*], Е. Н. Смоленцева[1], В. В. Демин[1]

[1]Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 8/2, Россия
**E-mail: konarbaeva@issa-siberia.ru*

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.
После доработки 24.11.2022 г.
Принята к публикации 15.12.2022 г.

Изучен химический состав почв республики Тыва и проведена оценка их с экологических позиций. Это имеет важное значение как с научной, так и с практической точек зрения. Галогены играют значительную роль в жизнедеятельности живых организмов. Они, как и другие макро- и микроэлементы участвуют в процессе формирования пищевой цепи: атмосфера – почва – природные воды – растения – животные – человек. При оценке биогеохимического значения того или иного галогена важно знать не только его валовое содержание, но и концентрацию его подвижных форм, способных к миграции и участию в динамическом равновесии между твердой фазой почвы и почвенным раствором. Обусловлено это тем, что растения снабжаются элементами питания за счет подвижных форм различных элементов. На современном этапе изученность галогенов явно недостаточна, к наиболее изученным относится фтор, к менее – йод и совсем слабо изучен бром.

Ключевые слова: республика Тыва, почва, содержание и распределение галогенов.
DOI: 10.31857/S0002188123030079, **EDN:** KNWOTQ

ВВЕДЕНИЕ

Биологическая необходимость галогенов (фтора, брома и йода) для нормального функционирования живых организмов установлена давно. Исключением явился бром, необходимость которого для живых организмов установлена совсем недавно [1]. Дефицит фтора в организме человека – причина кариеса, избыток – эндемического флюороза и остеопороза. Фтор в значительной концентрации токсичен для растений и животных [2–4]. Йод, входящий в состав тироксина – гормона щитовидной железы – регулирует скорость обмена веществ в живых организмах. Его дефицит вызывает эндемический зоб и сахарный диабет, избыток – йододерму [5, 6]. Йод считают незаменимым микроэлементом для человека и животных [7] и растений [8]. В отношении брома, слабо изученного на территории России, стоит отметить, что его отнесли к группе жизненно необходимых элементов совсем недавно. Исследователи из Вандербильского университета (США) [1] выяснили, что без брома молекулы коллагена IV типа, играющие важную роль в сохранении целостности эпителиальных и эндотелиальных клеточных оболочек, не могут связываться друг с другом должным образом для образования структурного белка соединительной ткани, что может привести к нарушению ее развития. В то же время согласно [9], нарастающий дефицит йода, который сегодня наблюдают в различных странах, связан с накоплением брома в природной среде. Br – наиболее сильный конкурент по отношению к йоду в борьбе за активные центры ферментов [6], способен препятствовать его поглощению [10], а также снижать его количество в щитовидной железе и коже [11].

В данном исследовании изучено валовое содержание и формы галогенов в почвах Тывы. Группу форм галогенов составили: подвижная форма фтора, водорастворимая брома и солерастворимая йода. Такой выбор был обусловлен несколькими причинами. При всей важности и значимости данных о валовом содержании химических элементов в почве необходимо подчеркнуть их основной недостаток – по валовому количеству элементов сложно судить об экологической ситуации в агроценозах. По мнению Ильина [12], учет только валового содержания элементов следует признать малопригодным при агрохимиче-

[§]Исследования выполнены при финансовой поддержке государственного задания ИПА СО РАН.

Таблица 1. Объекты исследования

Разрез/Угодье	Название почвы (тип, подтип)		Формула профиля по [Полевой..., 2008)]
	КиДП СССР, (1977)	КиДПР, (2004)	
КХ3-21/ пастбище	Каштановая типичная слабо каменистая	Криоаридная натечно-карбонатная	AK–BPL–BCAic–C
ЧД2-21/ пастбище	Каштановая типичная слабо каменистая	Криоаридная натечно-карбонатная	AK–BPL–BCAic–CD

ской и экологической оценке почв. Это связано с тем, что даже на загрязненных почвах, в силу их буферных свойств, а также защитных функций растений можно получать чистую продукцию.

Под термином “подвижные формы” имеется в виду совокупность всех фторид-анионов, способных к миграции в профиле почвы и прочно не связанных с ее компонентами. Изучение водорастворимой формы брома связано с полным отсутствием данных по этой форме в почвах Тывы. Водорастворимая форма йода слабо отражает доступность йода для растений. Бесперспективность использования водной вытяжки из почв в качестве характеристики возможного потока йода из почв в растения во многом связана с очень низкой концентрацией элемента, извлекаемого этим экстрагентом (очень часто на уровне следовых количеств). Поэтому было решено анализировать солерастворимую форму, используя вытяжку 0.1 н. раствора KCl [13]. Предложенный ранее в целях геохимических поисков 5%-ный раствор KCl [14] не стали использовать, посчитав нецелесообразным применение реагента в такой высокой концентрации. Поскольку, чем она выше, тем плотнее ионная атмосфера экстрагента, и тем меньше подвижность ионов [15], что не соответствует нашим целям.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования – почвы республики Тыва, конкретно Улуг-Хемской котловины, представляющей собой восточную часть Центрально-Тувинской котловины и являющейся одной из межгорных котловин Алтае-Саянской горной области. Улуг-Хемская котловина расположена на высоте 600–900 м над у.м. Ее рельеф – холмисто-равнинный с участками мелкосопочника, а по окраинам на контакте с горными хребтами, окружающими котловину, образовались наклонные шлейфы делювиально-пролювиальных отложений. Почвообразующие породы – субаэральные лессовидные отложения легкого гранулометрического состава, подстилающиеся на небольшой глубине элюво-делювием красноцветных песчаников или пролюво-делювием метаморфических и магматических пород, слагающих горное окаймление котловины [16]. К настоящему времени накоплены данные о составе и строении почвенного покрова котловины [17, 18].

Особенности климата межгорных степных котловин Алтае-Саянской горной области определяются их внутриконтинентальным географическим положением и барьерной функцией горных хребтов, окружающих котловины [19]. Такой климат характеризуется как криоридный ультраконтинентальный [19], для которого типичны жаркое засушливое лето и холодная зима с низкими температурами. Для Улуг-Хемской котловины среднегодовая температура воздуха (по данным метеостанции г. Кызыла) равна –4.5°C. Сумма вегетационно-активных температур воздуха (>10°C) – 1971°C, безморозный период – всего 116 сут, годовая сумма осадков – 215 мм, степень континентальности климата – 296, коэффициент увлажнения по Иванову за апрель–октябрь варьируется от 0.11 до 0.40, что характеризует климат как недостаточно увлажненный [19].

Преобладающие почвы в районе исследования – каштановые, доля которых (включая светло- и темно-каштановые) в составе почвенного покрова Тывы достигает 15% [20]. Они играют важную роль в сельском хозяйстве и их используют как пашню, также они входят в состав кормовых, преимущественно пастбищных угодий. В настоящее время в силу своей специфичности каштановые почвы межгорных степных котловин Алтае-Саянской горной области выделяются в особый тип почв – криоаридные [19, 21, 22]. По биогеохимическому районированию Тувинской горной области [23], исследованная территория относится к биогеохимическому поясу степных и сухостепных котловин.

Для характеристики содержания и профильного распределения галогенов (фтора, брома и йода) были выбраны 2 почвы (табл. 1).

Таблица 2. Физико-химические свойства изученных криоаридных почв Тувинской котловины

Горизонт	Образец, слой, см	pH_{H_2O}	Обменные катионы			$C_{орг}$	$CaCO_3$	Ил	Физическая глина	УЭП
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}					
			смоль(+)/кг почвы			% от массы абсолютно сухой почвы				мкСм/см
Разр. КХ3-21. Криоаридная натечно-карбонатная почва										
АК	0–10	7.44	6.50	2.30	0.04	1.39	0.85	4.68	14.1	109
АК	10–15	7.95	8.50	3.44	0.27	1.44	5.94	10.5	20.9	266
BPL	15–25	8.07	5.00	5.74	1.90	1.19	14.7	22.0	36.8	481
BCAic	30–40	8.40	4.00	5.74	2.34	0.57	28.1	29.4	41.4	1042
C	40–50	8.45	2.50	1.97	0.77	0.28	12.1	23.9	39.2	512
Кротовина	10–40	8.50	Не определяли				3.37	Не определяли		182
Разр. ЧД2-21. Криоаридная натечно-карбонатная почва										
АК	0–6	6.70	6.50	1.64	0.04	1.85	2.00	3.12	12.1	52
АК	6–16	7.18	7.50	2.30	0.04	1.00	2.12	3.32	11.1	55
BPL	20–30	7.67	6.50	2.30	0.05	0.96	3.47	4.48	12.2	84
BCAic	30–40	7.96	7.50	2.46	0.04	0.61	20.87	10.48	21.1	169
C	48–58	8.47	4.00	3.44	0.01	0.40	7.16	4.00	11.4	128

Названия почв даны по двум классификациям: Классификация и диагностика почв СССР (КиДП СССР) [24] и Классификация и диагностика почв (КиДПР) [25] с дополнениями [21]. Формулы почвенных профилей составлены с использованием системы типодиагностических горизонтов в соответствии с [21]. В почвенных образцах, отобранных по генетическим горизонтам, определяли следующие показатели: содержание органического углерода (**$C_{орг}$**) по методу Тюрина, карбонатов – газоволюметрическим методом, pH_{H_2O} – потенциометрическим методом [26]. Анализ гранулометрического состава проводили пипет-методом с предварительной обработкой образцов пирофосфатом натрия [27]. Содержание обменных катионов определено в спиртовой вытяжке по методу Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой [28]. Засоление почв характеризовали удельной электропроводностью (**УЭП**) водной вытяжки (соотношение почва : вода = 1 : 5).

Валовое содержание фтора проанализировали по методике [29], подвижной формы – по методике [30]. Для определения брома использована комбинация 2-х методик. Первая часть анализа, включающая перевод пробы в раствор, выполнена по Каменеву [31], конечное определение – по классической методике Винклера, описанной в монографии Полянского [32]. Водорастворимую форму брома анализировали из водной вытяжки, в которой соотношение почва : вода было равно 1 : 4, а время взаимодействия – 4 ч. После центрифугирования и отделения раствора бром в полученной вытяжке определяли по Винклеру. Валовое содержание йода определяли кинетическим роданидно-нитритным методом по [33], концентрацию его солерастворимой формы – по методике авторов [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Криоаридные почвы относятся к отделу палево-метаморфических почв, который объединяет почвы, характеризующиеся сочетанием срединных палево-метаморфического (**BPL**) и аккумулятивно-карбонатного (**BCA**) горизонтов [21]. От остальных типов почв этого отдела криоаридные почвы отличаются поверхностным криогумусовым горизонтом **АК**, специфика которого проявляется в каштановых или красновато-бурых тонах окраски. Серые тона, характерные для всех других гумусо-аккумулятивных горизонтов, отсутствуют. Криогумусовый горизонт АК в изученных почвах характеризуется маломощностью (15–20 см), светло-коричневой окраской и низким содержанием $C_{орг}$ (табл. 2).

Горизонт BPL имеет палево-светло-бурую окраску, что отличает его от других срединных метаморфических горизонтов железисто-метаморфического и ксеро-метаморфического, имеющих яркую окраску. Другая отличительная особенность этого горизонта – его слабая оструктуренность по сравнению с другими срединными метаморфическими горизонтами. В горизонте BCAic обнаружены 2 формы выделения педоген-

ных карбонатов: это натечные борозды и корочки на нижней поверхности включений щебнистого материала и пропиточно-мучнистые в мелкоземе. Натечные карбонатные педогенные новообразования определяют название подтипа изученных криоаридных почв (табл. 1). Кроме того, криоаридные почвы обладают небольшой мощностью профиля, которая составляет 40–50 см. В почвах Улуг-Хемской котловины имеются также кротовины, являющиеся признаком биогенной турбации почвенной массы.

Криогумусовый горизонт изученных почв не вскипает от действия HCl, имеет нейтральную и слабощелочную реакцию среды и низкое содержание карбонатов (табл. 2). Как было отмечено выше, содержание $C_{орг}$ в нем также низкое. Щелочная реакция среды характерна для аккумулятивно-карбонатного горизонта BCAic, к этому же горизонту приурочен и максимум содержания карбонатов в профиле, достигающее 20–28%. Почвенно-поглощающий комплекс во всех горизонтах криоаридных почв насыщен основаниями, но сумма обменных катионов невелика (7–14 смоль/кг почвы). В составе обменных катионов доминирует кальций: 50–80% от их суммы. Содержание обменного натрия в разрезе ЧД2-21 низкое и не превышает 1% от суммы обменных катионов. В разрезе КХ3-21 в криогумусовом горизонте он составляет 1–2%, а в срединных горизонтах BPL и BCAic его содержание резко возрастает до 13–15%.

Гранулометрический состав изученных криоаридных почв изменяется по профилю почв и в пространстве. Например, почва разреза ЧД2-21 имеет более легкий гранулометрический состав, который изменяется вниз по профилю от супесчаного до легкосуглинистого. Почва разреза КХ3-21 – супесчаная в верхних 10 см, вниз по профилю гранулометрический состав становится более тяжелым – легко- и среднесуглинистым. Криоаридные почвы Улуг-Хемской котловины не засолены, о чем свидетельствуют низкие показатели УЭП.

Анализ физико-химических свойств почв исследованных разрезов показал, что почвенные образцы обоих разрезов по содержанию гумуса различаются весьма незначительно, а физической глиной, илом и карбонатами более обогащена почва разреза КХ3-21, что будет способствовать в них большей аккумуляции изученных галогенов.

Содержание валового фтора в почве обоих разрезов весьма существенно (рис. 1а), но при этом несколько меньше ПДК, равного 500 мг/кг согласно литературе [34]. Стоит отметить, что в горизонтах D (разрез КЗХ-21) и CD (разрез ЧД2-21) валовое содержание фтора превышает ПДК. Однако причины наблюдаемой закономерности, на наш взгляд, различаются. В первом случае это связано со значительным количеством физической глины и илистой фракции, а во втором – с содержанием карбонатов.

Валовое содержание брома и йода в изученных почвах весьма незначительно и соответствует содержанию гумуса (рис. 1б, в). Оно более значимо в разрезе КХ3-21 в сравнении с почвой разреза ЧД2-21, что обусловило чуть более высокое содержание в нем брома и йода. При этом степень гумусированности почв оказывает более значительное влияние на содержание йода в почвах [35–37]. В модельном опыте с использованием изотопа йода установлено, что органическим веществом почвы связывается до 90% внесенного в нее йода [38]. К аналогичному выводу пришли и японские исследователи: основная доля йода в почвах входит в состав органического вещества [39].

В целом необходимо отметить, что валовое содержание и брома, и йода в исследованных почвах Тывы достаточно низкое и находится на уровне каштановых почв юга Западной Сибири [40]. Кроме того, валовое содержание йода в почве разреза КХ3-21 изменяется в диапазоне от 0.54 до 9.65 мг/кг, а в почве разреза ЧД2-21 – от 0.43 до 1.98 мг/кг. Эти показатели аналогичны тем, что были найдены в каштановых почвах Тывы ранее (0.7–8.6 мг/кг) [23].

Теперь обратим внимание на формы галогенов. Содержание подвижной формы фтора в разрезе КХ3-21 достаточно значимое и варьирует от 2.25 до 38.0 мг/кг и только в слое 0–10 см он отсутствует. В разрезе ЧД 2–21 подвижный фтор в слое 0–30 см отсутствует и только ниже его количество становится более ощутимым: от 0.37 до 0.58 мг/кг.

Водорастворимый бром в изученных почвах распределен более равномерно в разрезе ЧД2-21, а в разрезе КХ3-21 он в горизонтах варьирует крайне неравномерно: от 0 до 0.055, далее – 0.004, затем – 0.096 мг/кг. Такое распределение обусловлено действием нескольких факторов, таких как величина pH, различием в содержании физической глины и илистой фракции.

Солерастворимая форма йода обнаружена только в горизонтах BCAic и D разреза КХ3-21, а почве разреза ЧД2-21 данная форма йода отсутствует. Такая ситуация в разрезе КХ3-21 связана с очень низкой концентрацией валового йода в слое 0–15 см, а в почве разреза ЧД2-21 отсутствие

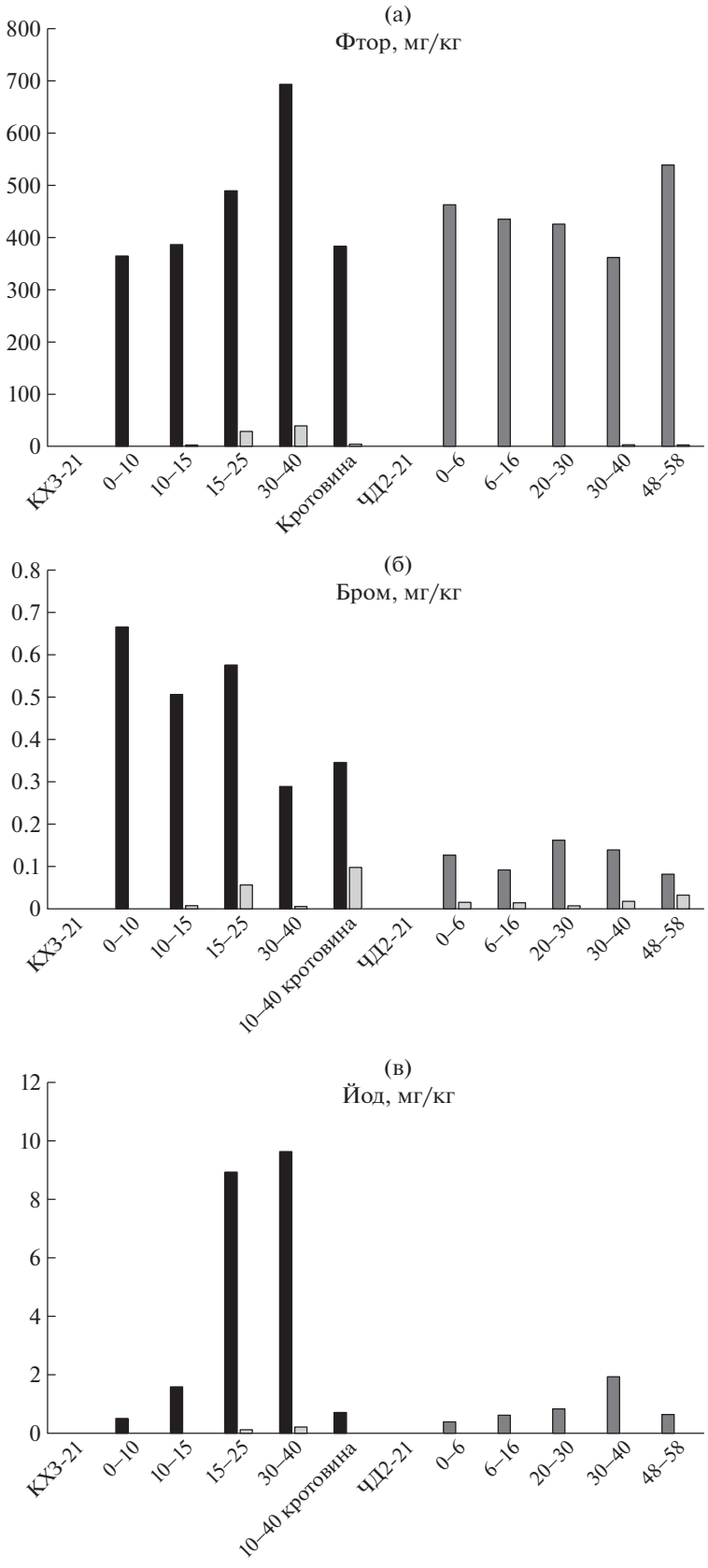

Рис. 1. Валовое содержание и подвижная форма фтора (а), валовое содержание и водорастворимая форма брома (б), валовое содержание и солерастворимая форма йода (в) в каштановых почвах Тывы.

солерастворимой формы отмечено по всему профилю.

Содержание галогенов в почвах контролируется несколькими факторами: содержанием гумуса, глинистой и илистой фракциями, карбонатов, реакцией почвенной среды и водным режимом почв.

Рассмотрим более детально влияние этих факторов на аккумуляцию и миграцию галогенов. Влияние гумуса на содержание исследованных галогенов неодинаково. В меньшей степени он влияет на содержание фтора. Среди различных компонентов почвы, участвующих в процессах аккумуляции брома и йода, приоритетную роль играет гумус [35, 36, 41]. Влиянию же гранулометрического состава и водного режима почвы, реакции почвенной среды, присутствию полуторных оксидов и карбонатов исследователями придается разная значимость. В целом усиление или ослабление процессов аккумуляции и миграции исследованных галогенов в почвах зависят от того, какие из перечисленных факторов в них доминируют.

Большого накопления валового фтора в гумусово-аккумулятивном горизонте, как правило, не отмечено вследствие слабой сорбирующей способности органического вещества к фтору и малочисленностью возможных химических реакций между ними. Прямое фторирование углеводородов – очень сильный экзотермический процесс, проходящий лишь в строго определенных условиях, поэтому вероятность взаимодействия органических компонентов гумуса непосредственно с F крайне ограничена. Если F поступает в почву в виде HF, энергия диссоциации которой равна 135 ккал/моль, то разрыв его в почвенных условиях практически невозможен. Остается только взаимодействие с ионом F^-, легко образующимся из элементного фтора. Отсутствие биогенного накопления фтора в почвах подтверждается и величиной КБП равного 0.097 [42]. Присутствие же F^- в гумусовой толще позволяет предположить его закрепление по сорбционным механизмам, либо за счет обменных реакций с другими галоидпроизводными.

Валовое содержание брома, по нашим данным, в изученных почвах изменяется от 0.29 до 0.67 мг/кг в почве разреза КХ3-21, в разрезе ЧД2-21 – от 0.08 до 0.16 мг/кг. Валовое содержание йода изменяется в диапазоне от 0.54 до 9.65 мг/кг.

Взаимодействие органических соединений с бромом и йодом происходит по одинаковым механизмам, но с одной отличительной особенностью. Бóльшую склонность органических соединений к бромированию, нежели к йодированию, попытались объяснить, используя характерную реакцию для хлора, брома и йода [43].

$$\Gamma_3^- = \Gamma_2 + \Gamma^-$$

Устойчивость иона Γ_3^- зависит от природы галогена и характеризуется константой равновесия, величины которых для Cl, Br и I соответственно равны 0.2, 16.0 и 700. То есть от хлора к йоду устойчивость Γ_3^- быстро возрастает. Может быть, именно этим объясняется бóльшая склонность органических веществ к взаимодействию с хлором и бромом, нежели с йодом. Поглощенные гумусовыми веществами бром и йод трудно вымываются даже горячей водой, что свидетельствует не только об их адсорбции, но и хемосорбции [44]. Этот факт играет важную роль для йода с точки зрения экологии.

Можно также предположить, что заметное превышение содержания брома над йодом, прежде всего в гумусовых горизонтах, связано с одной особенностью, присущей только HBr (если рассматривать галоидводороды как основные агенты реакций галогенирования). Присоединение HBr по двойной связи при галоидировании монооолефинов происходит не только в соответствии с правилом Марковникова, но и другим аномальным путем, который не характерен для HI [45]. Так что возможностью осуществления большего числа реакций с образованием бромистых соединений можно объяснить более высокую концентрацию брома в почве.

В то же время вполне закономерно, что такие небольшие количества валового брома и йода обусловили и незначительное количество водорастворимого брома и солерастворимого йода (рис. 1).

Достаточно давно установлено, что приоритетное концентрирование микроэлементов наблюдается в более тонких гранулометрических фракциях почв. Галогены не являются исключением. Данные работы [46] свидетельствуют о том, что до 41–69% фтора накапливается в илистой фракции и только 0.26–3.97% – в песчаной.

Для брома также характерно накопление в илистой фракции, и нами выявлена существенная связь между этими параметрами в почвах юга Западной Сибири (r = 0.68) [47]. По аналогии с бромом на концентрацию йода в профиле почв оказывает влияние и содержание илистой фракции. Связь между этими параметрами в почвах Тывы находится на следующем уровне. Были рассчитаны коэффициенты корреляции и детерми-

нации для илистой фракции и валового содержания фтора, брома и йода в обоих разрезах. Для разреза КХ3-21 величины r^2 и d_{yx} оказались равными: для фтора – 0.94 и 0.89, для брома – 0.80 и 0.64, для йода – 0.97 и 0.94 соответственно. Для разреза ЧД2-21 эти коэффициенты следующие: для фтора – (–0.70) и 0.49, для брома – 0.39 и 0.15, для йода – 0.99 и 0.98 соответственно. Более высокие результаты характерны для почвы разреза КХ3-21, в которой физико-химические свойства более способствуют аккумуляции галогенов. Так что в почве разреза КХ3-21 отмечена существенная связь между содержаниями илистой фракции и брома, а также йода.

Стоит отметить, что для бромид-, йодид-анионов весьма характерно образование комплексных соединений по типу присоединения с катионами K, Co, Cu, Ni, Zn, Sn, Fe, т.е. с катионами, постоянно присутствующими в почве. Это могут быть соединения типа $K[Bi\ I_4]$ или $Cu_2[Hg\ I_4]$. В почвах весьма вероятно образование комплексных солей алюминия типа $M[Al\ Г_4]$, где M – металл, а $Г^-$ – галоген. Возможно образование комплексных соединений, в которых внутренняя сфера представлена катионом металла и органическим радикалом, а анион галогена находится во внешней сфере, например $[As\ (CH_3)_4]Br$ или $[As\ (C_6H_5)_4]I_3$ [48]. Скорее всего, вероятность образования таких соединений более приоритетна для брома.

Реакция почвенной среды оказывает неоднозначное влияние на содержание галогенов. В работе [49], изучая процесс поглощения фтора пятью щелочными и одной кислой почвой, выяснили следующее: щелочные почвы поглотили фтора из раствора NaF с C = 16 мг/л – 59–120 мг/кг почвы, а кислые почвы поглотили его во много раз больше. Это позволило авторам сделать вывод, что щелочные почвы обладают низкой способностью к фиксации фтора. В работе [50], исследуя кинетику связывания фтора, также пришли к заключению, что количество фтора, связываемое почвой, растет с понижением величины pH почвы.

В щелочной среде анионы брома не только более устойчивы [51, 52], но и величинами окислительно-восстановительных потенциалов допускается присутствие полного набора анионов брома (бромида Br^-, гипобромита BrO^-, бромата BrO_3^-, пербромата BrO_4^-), из-за чего концентрация галогена может несколько повышаться.

Проходящие в щелочной среде реакции с участием анионов йода прямо или косвенно также приводят к образованию наиболее устойчивых его анионов, конкретно I^- и IO_3^-. Следует также иметь в виду, что в условиях слабощелочной среды процессы эти могут быть реализованы не полностью. Зато потери свободного йода в щелочной среде практически исключены, т.к. образовавшийся свободный элемент в дальнейшем может быть легко связан.

В отношении изученных почв Тывы следует подчеркнуть, что различие в величине pH весьма заметно. В почве разреза КХ3-21 она изменяется от 7.44 до 9.40, т.е. от слабощелочной до сильнощелочной, а в разрезе ЧД2-21 – от почти нейтральной до слабощелочной. Слабощелочная среда в почве разреза ЧД2-21 обусловила несколько повышенное содержание валового фтора, что мы обсудили выше. В то же время было вполне ожидаемым, что валовое содержание брома и йода в почве разреза КХ3-21 будет несколько больше в сравнении с почвой разреза ЧД2-21 ввиду более высокого показателя pH.

В связи с высокой растворимостью большинства солей брома, условия увлажнения почв существенно влияют на интенсивность его миграции. Вследствие этого в почвах промывного или периодически промывного водного режима миграция и вынос элемента будет усиливаться. В почвах с водным режимом непромывного или выпотного типа скорость данного процесса естественно снижается, что создает благоприятные условия для накопления анионов брома. В изученных почвах Тывы водный режим в целом непромывной, однако в разрезе КХ3-21 содержание валового брома чуть больше, чем в ЧД2-21, который характеризуется более легким гранулометрическим составом (табл. 2), поэтому наблюдаемое содержание галогенов вполне было ожидаемым.

Для внутрипочвенной миграции изученных галогенов очень важным является наличие геохимических барьеров. Для фтора важную роль играет низкая растворимость его наиболее распространенной соли CaF_2, произведение растворимости (**ПР**) которой составляет 4.0×10^{-11}, что предопределяет возможность осаждения фтора на кальциевом геохимическом барьере [51]. Данный фактор следует оценить как положительный с точки зрения экологии, т. к. он ослабляет миграционную способность галогена в почвенном профиле. Кроме того, содержащиеся в почве оксиды и гидроксиды Al и Fe, обладающие высокой сорбционной способностью и склонностью к взаимодействию с F^-, также ослабляют миграцию фтора в профиле почвы. Очевидно, что в этом случае наиболее вероятны сорбция и реакции комплексообразования F с Al и Fe с образованием

фторалюминатов и фторферратов, где М – одновалентный катион:

$$Al(OH)_3 + 6MF = M_3AlF_6 + 3MOH, \quad (1)$$

$$Fe_2O_3 + 10MF + 3H_2O = 2M_2FeF_6 + 6MOH. \quad (2)$$

Для внутрипочвенной миграции брома и йода важным является наличие карбонатного геохимического барьера, на котором происходит аккумуляция брома и йода, особенно йода, хотя уровень их накопления все же меньше, чем в гумусовом горизонте.

Что касается подвижных форм изученных галогенов, то необходимо отметить следующее. Содержание подвижного фтора особого опасения не вызывает, водорастворимого брома – достаточно низкое. А вот ситуация с валовым содержанием и солерастворимой формой йода – очень напряженная. Имеются публикации о крайне тяжелой ситуации с природным йод-дефицитом в республике Тыва [23, 53, 54]. Полученные нами результаты также свидетельствуют об этом. Очевидно, что проблема с содержанием йода в почве требует самого пристального внимания тех, кто несет ответственность за здоровье населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ситуация с содержанием галогенов (фтора, брома и йода) в исследованных почвах на территории Тывы складывается следующим образом. Прежде чем об этом говорить, необходимо подчеркнуть, что, к сожалению, в России не разработаны гигиенические нормативы на содержание валового фтора, брома и йода в почве, поэтому мы ориентируемся на данные, опубликованные в научной литературе. Концентрация валового фтора находится в пределах нормы – ПДК для фтора = 500 мг/кг [34], так что содержание валового фтора в почвах Тывы в целом соответствует норме. В то же время, по полученным нами данным, характерна обедненность почв содержанием валового брома и особенно йода, но по брому из-за отсутствия гигиенических нормативов мы не можем дать оценку содержания этих галогенов в почвах. В соответствии с критериями Ковальского [5], валовое содержание йода в почве принято считать до 5 мг/кг недостаточным, 5.0–40 – нормальным и >40 мг/кг – избыточным. В разрезе ЧД2-21, где содержание йода варьирует в интервале от 0.43 до 1.98 мг/кг, следует говорить об острой его недостаточности. В почве разреза КХ3-21 отмечено крайне низкое содержание валового йода в слое 0–15 см, далее оно находится в пределах нормы. Низкие концентрации валового брома и йода естественно обусловили и весьма низкие концентрации водорастворимого брома и солерастворимого йода. Отсутствие стандартов на содержание водорастворимого брома позволяет только констатировать данный факт, а вот низкое содержание солерастворимого йода с позиций экологии крайне негативно отражается на здоровье населения, что требует принятие срочных мер для изменения ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mc Call S., Cummings C., Bhave G., Vanacore R.* Bromine is an essential trace element for assembly of collagen IV scaffolds in tissue development and architecture // Cell. 2014. V. 157. Iss. 6. P. 1380–1392.
2. *Jezierska-Madziar M., Pinskwar P.* Fluoride in common Reeds (Phragmites Australis) sampled from Old Warta Reservoirs near Lubon and Radzewice, Poland // Fluoride Res. Report. 2003. V. 36 (1). P. 21–24.
3. *Cronin S.J., Manoharan V., Hedley M.J., Loganathan P.* Fluoride: Review of its fate, bioavailability and risks of fluorosis in grazed-Pasture systems in New Zealand // New Zealand J. Agric. Res. 2000. V. 43. P. 295–321.
4. *Loganathan P., Hedley M.J., Wallace G.C., Roberts A.H.C.* Fluoride accumulation in pasture forage and soils following long-term applications of phosphorus fertilizers // Environ. Pollut. 2001. V. 115. P. 275–282.
5. *Ковальский В.В.* Биологическая роль йода // Биологическая роль йода. Научн. Тр. ВАСХНИЛ. М.: Колос, 1972. С. 3–32.
6. *Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А.* Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 495 с.
7. *Duborska E., Uric M., Seda M.* Iodine biofortification of vegetables could improve iodine supplementation status // Agronomy. 2020. № 10. P. 1574 –1585.
8. *Kiferle C., Martinelli M., Salzano A.M., Gonzali S.* Evidences for a nutritional role of iodine in plants // Front Plant Sci. 2021. V. 12. Iss. 616868. DOI: org/ https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868
9. *Vobecky M., Babicky A., Lener J.* Effect of increased bromide intake of iodine excretion in rats // Biol. Trace Element Res. 1996. V. 55. P. 215–219.
10. *Pavelka S., Babicky A., Vobecky M., Lener J.* Effect of high bromide levels in the organism on the biological half- life of iodine in the rat // Biol. Trace Element Res. 2001. V. 82. № 1–3. P. 125–132.
11. *Pavelka S., Babisky A., Lener J., Vobecky M.* Impact of high bromide intake in the rat dam on iodine transfer to the sucklings // Food Chem. Toxicil. 2002. V. 40. № 7. P. 1041–1045.
12. *Ильин В.Б.* Элементный химический состав растений. Новосибирск: Наука, СО, 1985. 129 с.
13. *Конарбаева Г.А., Ермолов Ю.В.* К вопросу о целесообразности извлечения йода из почв нейтральным солевым раствором // Агрохимия. 2005. № 4. С. 67–72.
14. *Миллер А.Д., Шнейдер Л.А., Вычужанина И.П.* Методы определения общего содержания и подвижной фазы йода и брома в горных породах и природных водах для целей геохимических поисков. Л.: ОНТИ ВИТР, 1968. 55 с.

15. *Крешков А.П.* Основы аналитической химии. М.: Химия, 1970. Т. 1. 471 с.

16. *Геология СССР*. Т. 29. Тувинская АССР. Ч. 1. Геологическое описание / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1966. 464 с.

17. *Носин В.А.* Почвы Тувы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 342 с.

18. *Гуркова Е.А.* Специфика дифференциации почвенного покрова Центрально-Тувинской котловины //Сибир. экол. журн. 2009. Т. 16. № 2. С. 202–210.

19. *Волковинцер В.И.* Степные криоаридные почвы. Новосибирск: Наука, СО, 1978. 208 с.

20. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России Республика Тыва. электр. ресурс //https:egrpr.esoil.ru/content/adm/adm17.html (дата обращения 24.10.2022).

21. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

22. *Бронникова М.А., Герасимова М.И., Конопляникова Ю.В., Гуркова Е.А.* Криоаридные почвы как генетический тип в классификации почв России: география, морфология, диагностика // Почвоведение. 2022. № 3. С. 263–280.

23. *Пузанов А.В.* Приоритетные элементы (I, Se, Mn, Co, Cu, Zn, Hg) в наземных экосистемах Тувинской горной области: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2005. 43 с.

24. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.

25. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Изд-во “Ойкумена”, 2004. 342 с.

26. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой А.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

27. Теории и методы физики почв / Под ред. Шеина Е.В., Карпачевского Л.О. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.

28. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1990. 235 с.

29. *Головкова Т.В., Краснова Н.М.* Определение валового фтора в почве с помощью ионселективного электрода // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1988. № 42. С. 19–22.

30. *Конарбаева Г.А., Парфенов А.И.* Способ фотометрического определения фтора: А.С. № 1670600, приоритет от 04.05.1987.

31. *Каменев В.Ф.* Определение йода и брома в почве, в воде и биологическом материале растительного и животного происхождения // Химия в сел. хоз-ве. 1965. № 1. С. 26–38.

32. *Полянский Н.Г.* Аналитическая химия брома. М.: Наука, 1980. 240 с.

33. *Проскурякова Г.Ф., Никитина О.Н.* Ускоренный вариант кинетического роданидно-нитритного метода определения микроколичеств йода в биологических объектах // Агрохимия. 1976. № 7. С. 140–143.

34. *Гапонюк Э.И., Кузнецова М.В.* Влияние фтористого натрия на свойства почвы и развитие некоторых сельскохозяйственных культур // Гигиена и санитария. 1984. № 6. С. 77–79.

35. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 234 с.

36. *Розен Б.Я.* Геохимия брома и йода. М.: Недра, 1970. 132 с.

37. *Кашин В.К., Иванов Г.М.* Йод в почвах Забайкалья // Почвоведение. 1991. № 11. С. 142–151.

38. *Тихомиров Ф.А., Каспаров С.В., Моисеев И.Т.* Вопросы почвенной химии радиойода // Почвоведение. 1981. № 6. С. 38–47.

39. *Yamada Hidekazu, Kiriyama Totsuya, Onagawa Yuji.* Speciation of iodine in soils // Soil Sci. Plant Nutr. 1999. V. 45. № 3. P. 563–568.

40. *Конарбаева Г.А.* Галогены в природных объектах юга Западной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра. биол. наук. Новосибирск, 2008. 33 с.

41. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 438 с.

42. *Добровольский Г.В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.

43. *Некрасов Б.В.* Основы общей химии. М.: Химия, 1973. Т. 1. С. 270–296.

44. *Ермоленко Н.Ф.* Микроэлементы и коллоиды почв. Минск: Наука и техника, 1966. 315 с.

45. *Ингольд К.* Механизм реакций и строение органических соединений. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. 673 с.

46. *Omueti J.A., Jones R.L.* Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1980. V. 44. № 2. P. 247–249.

47. *Конарбаева Г.А.* Содержание и распределение водорастворимого брома в почвах юга Западной Сибири // Агрохимия. 2001. № 9. С. 60–65.

48. *Уэллс А.* Структурная неорганическая химия М.: Мир, 1987. Т. 2. С. 646–685.

49. *Bower C.A., Hatcher J.T.* Adsorption of fluoride by soils and minerals // Soil Sci. 1967. V. 103. № 3. P. 151–154.

50. *Корнблюм Э.А., Цюрупа И.А.* Скорость поглощения фтора фосфогипса образцами солонцов и солодей Заволжья // Генезис и мелиоративное освоение почв солонцовых территорий. М., 1986. С. 80–87.

51. *Перельман А.И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 287 с.

52. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высш. шк., 1979. 422 с.

53. *Осокина И.В., Манчук В.Т.* Состояние зобной эндемии в республике Тыва // Пробл. эндокринол. 1999. Т. 45. № 4. С. 24–27.

54. *Савченков М.Ф., Селятицкая В.Г., Колесников С.И.* Йод и здоровье населения Сибири. Новосибирск: Наука, 2002. 286 с.

Gross Content and Mobile Forms of Halogens (Fluorine, Bromine and Iodine) in the Soils of Republic of Tyva

G. A. Konarbaeva[a,#], E. N. Smolentseva[a], and V. V. Demin[a]

[a] *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS*
prosp. Academica Lavrentijeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia
[#] *E-mail: konarbaeva@issa-siberia.ru*

The chemical composition of the soils of the Republic of Tyva has been studied and evaluated from an ecological standpoint. This is important both from a scientific and practical point of view. Halogens play a significant role in the vital activity of living organisms. They, like other macro- and microelements, are involved in the process of forming the food chain: atmosphere – soil – natural waters – plants – animals – man. When assessing the biogeochemical value of a particular halogen, it is important to know not only its gross content, but also the concentration of its mobile forms capable of migration and participation in the dynamic equilibrium between the solid phase of the soil and the soil solution. This is due to the fact that plants are supplied with nutrients due to the mobile forms of various elements. At the present stage, the study of halogens is clearly insufficient, fluorine is among the most studied, iodine is less, and bromine is very poorly studied.

Key words: Republic of Tyva, soil, content and distribution of halogens.