

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 9, 2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оценка уровня плодородия и агроэкологического состояния выработанных торфяных почв
Владимирской области

А. А. Уткин, С. Н. Лукьянов

3

Плодородие почв

Агрохимическая характеристика почв коллекционного питомника
интродуцированных лекарственных травянистых растений
Полярно-Альпийского ботанического сада

Г. М. Кашулина, Н. М. Коробейникова, Л. Л. Виравчева, Н. В. Чуева

13

Динамика кислотности и емкости катионного обмена
дерново-подзолистой супесчаной почвы при внесении биоугля

Л. В. Бойцова, Е. Я. Рижия, В. И. Дубовицкая

22

Удобрения

Эффективность трехкомпонентной микробной композиции
в посевах озимых зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах

Н. А. Михайловская, Д. В. Войтка, Н. Н. Цыбулько, Т. Б. Барашенко, С. В. Дюсова

30

Удобрительная ценность бобового компонента в сидеральных смешанных посевах

А. М. Гребенников

39

Биологические приемы оптимизации минерального питания
и развития козлятника восточного на легких почвах нечерноземной зоны

В. Н. Баринов, М. Н. Новиков

45

Агроэкология

Содержание химических элементов в почвах на территории Удоканского месторождения меди

В. П. Макаров, Н. Ю. Михеева, С. В. Борзенко

50

Экотоксикология

Закономерности миграции Cd и Zn в системе дерново-подзолистая
почва—почвенный раствор—ячмень при совместном загрязнении

*Л. Н. Анисимова, В. С. Анисимов, П. Ю. Волкова, Д. В. Крыленкин,
Р. А. Фригидов, А. И. Санжаров, Д. В. Дикарев, А. В. Саруханов, Ю. Н. Корнеев*

62

Подход к выбору методов фитотестирования для исследования почв

Л. П. Воронина, К. Э. Поногайбо

75

ОБЗОРЫ

Влияние удобрений на продуктивность Melissa лекарственной
и содержание в ней эфирных масел

А. В. Ивойлов, И. А. Хапугин

80

Contents

No. 9, 2021

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Assessment of the Level of Fertility and Agro-Ecological Condition Developed
Peat Soils Vladimir Region

A. A. Utkin, S. N. Lukyanov

3

Agrochemical Characteristic of the Soils of the Collection of Introduced
Medicinal Herbaceous Plants of the Polar-Alpine Botanical Garden

G. M. Kashulina, N. M. Korobeynikova, L. L. Viracheva, N. V. Chueva

13

Dynamics of Acidity and Cation Exchange Capacity in Sandy Loam Sod-Podzolic Soil
after Application of Biochar

L. V. Boitsova, E. Y. Rizhiya, V. I. Dubovitskaya

22

Fertilizers

Efficiency of Ternary Microbial Composition for Winter Grain Crops Growing
on Eroded Luvisol Sandy Loam Soils

N. A. Mikhailouskaya, D. V. Voitka, N. N. Tsybulko, T. B. Barashenko, S. V. Dyusova

30

Fertilizing Value of the Legume Component in Mixed Green Manure Crops

A. M. Grebennikov

39

Biological Methods of Optimization of Mineral Nutrition and Development
of Eastern Goat on Light Soils of the Non-Chernozem Zone

V. N. Barinov, M. N. Novikov

45

Agroecology

Content of Chemical Elements in Soils on the Territory of the Udokan Copper Deposit

V. P. Makarov, N. Yu. Mikheeva, S. V. Borzenko

50

Ecotoxicology

Cd and Zn Vibration Patterns in the System Sod-Podzolic Soil-Soil Solution-Barley
under Conditions of Combined Contamination

L. N. Anisimova, V. S. Anisimov, P. Yu. Volkova, D. V. Krylenkin,

R. A. Frigidov, A. I. Sanzharov, D. V. Dikarev, A. V. Sarukhanov, Y. N. Korneev

62

Approach to the Choice of Phytotesting Methods for Soil Research

L. P. Voronina, K. E. Ponogaibo

75

REVIEWS

Effect of Fertilizers on the Productivity of Lemon Balm and the Content of Essential Oils in It

A. V. Ivoilov, I. A. Khapugin

80

ОЦЕНКА УРОВНЯ ПЛОДОРОДИЯ И АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2021 г. А. А. Уткин^{1,*}, С. Н. Лукьянов²

¹ Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д. К. Беляева
153012 Иваново, ул. Советская, 45, Россия

² Центр агрохимической службы “Владимирский”
600027 Владимир, ул. Соколова-Соколенка, 26а, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 27.02.2021 г.

После доработки 20.03.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

Представлены результаты полевых исследований верхнего (пахотного) слоя выработанных торфяных почв сельскохозяйственного назначения Владимирской обл., которые проводили методом сплошного агрохимического обследования на установление уровня плодородия по основным агрохимическим показателям и агроэкологического состояния по величине содержания следующих тяжелых металлов: свинца, кадмия, меди, цинка, кобальта, ртути, марганца, никеля и металлоида мышьяка. Установлено, что все участки выработанных торфяных почв обладали низким уровнем эффективного плодородия. Основными агрохимическими факторами, лимитирующими плодородие, выступали обеспеченность торфяных почв подвижным фосфором и, главным образом, подвижным калием. Валовое содержание и содержание подвижных форм тяжелых металлов и мышьяка в пахотном слое торфяных почв региона не превышало предельно-допустимых концентраций, ориентировочно-допустимых концентраций и кларков. Выработанные торфяные почвы Владимирской обл. по содержанию исследованных поллютантов относятся к слабозагрязненным и не являются опасными для культурных растений и здоровья человека.

Ключевые слова: плодородие, агроэкологическое состояние почвы, выработанные торфяные почвы, Владимирская область.

DOI: 10.31857/S0002188121090118

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время необходимость увеличения объемов растениеводческой продукции обязывает производителей не только эффективнее использовать сельскохозяйственные угодья, но и включать в оборот новые, более плодородные земли. Одним из значимых резервов увеличения этих земель в Нечерноземной зоне России является вовлечение в оборот торфяных низинных почв с относительно высоким уровнем плодородия, в том числе и после их выработки.

На территории России по состоянию на 01.01.2002 года разработано около 1.5 млн га торфяников, из них около 90% приходится на Нечерноземье.

Согласно аналитическим данным за 2019 год [1, 2], в почвенном фонде Владимирской области на долю болотных и заболоченных почв, в том числе торфянисто-подзолистых глеевых прихо-

дилось $\approx 7.4\%$ или 215 тыс. га от общей площади земельного фонда (2908.4 тыс. га), в том числе торфяных верховых – 43.9 тыс. га (1.5%), торфяных переходных – 22.6 тыс. га (0.77%), торфяных низинных – 90.5 тыс. га (3.11%), болотных торфянисто- и торфяно-глеевых – 47.0 тыс. га (1.62%) и торфянисто-подзолистых глеевых – 11 тыс. га (0.38%).

Площадь торфяно-болотных почв в составе земель сельскохозяйственного назначения области составляет 45.1 тыс. га (4.6%), при этом на долю пахотных угодий приходится 1.7 тыс. га, сенокосы и пастбища занимают 43.4 тыс. га. Наибольшая доля торфяно-болотных почв находится в Гусь-Хрустальном р-не – $>30\%$ [3]. Таким образом, территория Владимирской обл. характеризуется значительной заболоченностью, но с выраженным неоднородным распределением торфяно-болотных почв в районах области.

Результаты отечественных и зарубежных научных исследований и практика сельскохозяйственного использования показали, что первоочередному освоению из-за больших запасов органического вещества, высокого содержания общего азота и оптимальной для растений реакции почвенной среды должны подлежать торфяные низинные почвы ввиду их более высокого уровня естественного плодородия по сравнению с остальными видами торфяных и минеральных почв [4]. Однако использование торфяных низинных и переходных почв должно быть обязательно сопряжено с выполнением операций по мелиорации этих почв, заботой о сохранении их плодородия путем рационального применения удобрений и агромелиорантов и проведением агроэкологического мониторинга [5].

В последние десятилетия, как в Нечерноземной зоне, так и во Владимирской области значительные площади почв, в том числе и торфяных низинных различной степени освоения и выработки, частично выводят из оборота, что недопустимо, т.к. в сельскохозяйственных угодьях преобладают дерново-подзолистые, реже — серые лесные почвы, обладающие низким потенциальным плодородием. Для того чтобы на таких землях получать хотя бы средний урожай, необходимо систематически вносить десятки тонн органических удобрений на гектар. В то же время на торфяниках, в том числе выработанных для получения самых высоких урожаев нет необходимости вносить органические удобрения, т.к. остаточный слой торфа мощностью 30–40 см содержит на одном гектаре 0.8–1.0 тыс. т воздушно-сухого органического вещества.

Вывод из оборота мелиорированных и выработанных торфяных почв влечет за собой снижение их плодородия, сопряженное с ухудшением агрохимических показателей, вторичное заболачивание, зарастание мелколесьем и кустарником.

Изменчивость параметров плодородия выработанных торфяных низинных почв Владимирской обл., выбывших из сельскохозяйственного оборота, и оценка их агроэкологического состояния, в научной литературе освещены недостаточно и требуют дополнительного изучения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

Цель работы — оценка существующего уровня эффективного плодородия выработанных торфяных почв по основным агрохимическим показателям и агроэкологическое состояние этих почв по содержанию валовых и подвижных форм тяже-

лых металлов (ТМ): свинца, кадмия, меди, никеля, цинка, кобальта, марганца, ртути и мышьяка.

Особое внимание к исследованным токсикантам было связано с тем, что большинство из них относится к I и II классам химической опасности, их соединения обладают высокой токсичностью для многих живых организмов, в том числе для культурных растений, животных и человека.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись ранее мелиорированные, различной степени выработки и хозяйственного использования торфяные низинные и переходные почвы Владимирской обл. Агрохимическое обследование выработанных торфяных почв Владимирской обл. проводили в соответствии с методическими указаниями по проведению комплексного мониторинга плодородия почв и земель сельскохозяйственного назначения в 2012, 2016 и 2017 гг. на территории 3-х муниципальных районов — Ковровского, Гусь-Хрустального и Гороховецкого (рис. 1) специалистами ЦАС “Владимирский” путем закладки нескольких почвенных разрезов и отбора почвенных образцов для анализов.

Химические анализы выработанных торфяных почв были выполнены согласно принятым в агрохимической практике методикам: обменная кислотность (рН) — ГОСТ 11623-89, гидролитическая кислотность (H_1) — ГОСТ 27894.1-88, подвижный фосфор (P_2O_5) — ГОСТ 27894.5-88, подвижный калий (K_2O) — ГОСТ 27894.6-88, обменные основания ($Ca + Mg$) — ГОСТ 27894.10-88, органическое вещество (гравиметрический метод) — ГОСТ 26213-91, сумма поглощенных оснований (S) (по методу Каппена) — ГОСТ 27821-88, подвижная сера (по методу ЦИНАО) — ГОСТ 26490-85.

Определение емкости катионного обмена (ЕКО) проводили расчетным способом, путем суммирования величин гидролитической кислотности и суммы поглощенных оснований.

Валовое содержание и содержание подвижных форм Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Co и Mn в почвах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии [6]. Определение в почвах подвижных форм Pb и Cd проводили в вытяжках ацетатно-аммонийного буфера pH 4.8 (ААБ) [7]. Степень подвижности (СП) Pb и Cd в почве рассчитана из соотношения подвижных соединений ТМ к величине валовой концентрации ТМ в почве и выражена в %.



Рис. 1. Почвенная карта Владимирской обл.: 1 – СПК “Демидовский”, 2 – СПК “Экосфера”, 3 – СПК “Ковровский”, 4 – ИП Орлов А.В., 5 – ИП Петросян Г.Р.

Содержание Hg определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии, As – фотометрическим методом [8, 9].

Агроэкологическое обследование торфяных почв на содержание в них ТМ и As проводили на территории следующих хозяйств: СПК “Демидовский”, СПК “Экосфера” и ИП Петросян Г.Р.

Отдельные аналитические результаты агрохимического исследования почвы подвергали корреляционному анализу с использованием пакета статистической программы Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выработанные торфяные почвы после добычи торфа представляют собой сложный объект освоения. Помимо не всегда высокого естественного плодородия главной отличительной особенностью их является почвенная пестрота, обусловленная невыравненностью рельефа болотного минерального дна. В результате этого остаточный слой торфа может варьировать на сравнительно небольшой территории в широких пределах от нескольких сантиметров до 1.5 м.

После мелиорации торфяных низинных почв отмечали существенное изменение водно-воздушного режима, менялась направленность почвообразовательного процесса, активизировалась деятельность микроорганизмов, что влекло за собой усиление минерализации органического вещества торфа. Процессы торфообразования сменялись процессами разложения торфа и глубокой трансформацией его органической и минеральной частей. Это приводило к значительному изменению химического состава и свойств выработанных торфяных почв. По мере сельскохозяйственного использования выработанных торфяников в них уменьшалось содержание органического вещества и азота до величин, свойственных минеральным почвам, уменьшались запасы влаги. Вместе с тем могло возрастать содержание подвижных форм элементов питания, улучшался температурный режим. Тем не менее, как показали проведенные исследования, негативные изменения в основном преобладали над позитивными [10], и плодородие выработанных торфяников еще более снижалось по сравнению с исходным уровнем.

Исследованные торфяные мелиорированные выработанные почвы отличались различной реакцией среды, которая менялась от среднекислой (торфяные переходные) до нейтральной (низинные и низинные торфянисто-глеевые) (табл. 1).

Средневзвешенная величина pH_{KCl} всех участков составляла 5.87 ед., что соответствовало близкой к нейтральной реакции среды. Согласно рекомендации [11], слабую потребность в известковании испытывала только торфяная переходная почва СПК “Демидовский” в дозе 2 т/га в виде чистого $CaCO_3$. Изученные почвы во многом соответствовали параметрам высокого почвенного плодородия, как по величине обменной ($pH_{KCl} > 4.8$), так и гидролитической кислотности ($H_r < 30$ мг-экв/100 г почвы) [11]. Между величинами обменной и гидролитической кислотностей в исследованных образцах почв отмечена сильной тесноты корреляционная взаимосвязь ($r = -0.71$, при $P = 0.95$).

Фосфор и калий являются одними из основных элементов питания растений, и этим определяется значение изучения форм их соединений в почве. В работе [11] отмечено, что содержание валового и подвижного калия и его запасы в торфяных почвах характеризуются, как правило, крайне низкими параметрами. В нашем случае по содержанию подвижного калия все обследованные почвы относились к почвам низкого уровня плодородия (0–25 мг/100 г почвы), а по содержанию подвижного фосфора — к почвам низкого (0–20 мг/100 г почвы) и среднего уровня плодородия (20–60 мг/100 г почвы).

Вероятно, кроме не всегда благоприятных геохимических (природных) особенностей формирования запасов фосфора и калия при торфообразовании, недостаточное обеспечение изученных почв подвижными формами этих элементов связано, в том числе, с глубокой выработкой запасов торфа, выносом этих элементов с ежегодными урожаями и с недостаточным пополнением их содержания в виде внесения фосфорных и калийных удобрений. При низком содержании подвижного фосфора в торфяных почвах рекомендуется проводить фосфоритование в дозах P200–300 [12].

При механической добыче торфа из торфяного массива удаляется значительная масса органического вещества, при этом остаточная мощность торфяного слоя может составлять только несколько сантиметров, под которым залегает минеральная порода. Такие торфяные почвы по обеспеченности органическим веществом примерно соответствуют минеральным почвам.

В почвах всех участков после выработки торфа и его сработки при многолетнем использовании содержание органического вещества в пахотном горизонте существенно уменьшилось, главным образом, путем разбавления за счет примешивания к органической массе минеральной породы. Наименьшее содержание органического вещества (2.65 и 2.82%) отмечено в торфяной низинной почве (ИП Орлов А.В., участки №№ 14–15), наибольшее — 6.25% в торфяной низинной (СПК “Экосфера”) (табл. 1).

В переходных и низинных неосвоенных торфяниках максимальное валовое содержание кальция и магния и их подвижных форм приурочено к самому верхнему и среднему слоям, состоящим главным образом из живых растений-торфообразователей, что свидетельствовало об их ярко выраженной биогенной аккумуляции. Количество водорастворимых и обменных соединений кальция и магния нарастает от торфяных почв верховых болот к низинным [13], что полностью подтверждено результатами нашего исследования.

Очень низкая обеспеченность почв всех исследованных участков обменными основаниями свидетельствовало о том, что при выработке торфа происходило значительное отчуждение их запасов, что влекло за собой сильное снижение содержания этих элементов в оставшейся почвенной массе, т.е. в придонном слое торфа.

Во всех изученных почвах доля обменных кальция и магния была существенной в общем составе поглощенных почвой катионов, что свидетельствовало о большой роли этих элементов в процессах торфообразования, их миграции и аккумуляции в виде минеральных и органо-минеральных соединений в торфяных почвах.

Наименьшее присутствие Ca и Mg в общем составе поглощенных катионов отмечено в торфяной переходной почве — 72.5% (СПК “Демидовский”), наибольшее — 99.5% — в торфяной низинной (СПК “Экосфера”).

Исходя из степени насыщенности основаниями, все изученные почвы соответствовали параметрам высокого почвенного плодородия ($V > 65\%$) [11].

Общее содержание серы в почве определяется почвообразующими породами и содержанием в них органического вещества. Установлено, что с органическим веществом почвы связано до 70–90% валовых запасов серы. Между содержанием углерода гумуса и серой в его составе установлена тесная прямая корреляционная связь линейной зависимости [14]. В нашем случае между содержа-

Таблица 1. Агрохимические показатели плодородия выработанных торфяных почв

№ п/п	Наименование района, хозяйство, тип почвы, год агрохимического обследования	№ участка, площадь, вид с.-х. угодья	pH _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Органическое вещество, %	H _r	Ca	Mg	S	ЕКО	V, %	Подвижная сера, мг/кг почвы
1	г. Гусь-Хрустальный, СПК “Демидовский” , торфяные переходные почвы, 2012 г.	№ 169, 37 га, заброшен- ная осушенная пашня	4.75	17.0	15.0	3.62	3.19	3.87	1.11	6.87	10.1	68.3	Не определили
2	Ковровский р-н, СПК “Эко- сфера” , торфяные низинные почвы, 2012 г.	№ 39, 51.5 га, заброшен- ная осушенная пашня	6.13	245	73.0	6.25	1.23	10.0	2.19	12.25	13.5	90.9	
3	Ковровский р-н, СПК “Ков- ровский” , торфяные низин- ные почвы, 2017 г.	№ 39, 16 га, заброшен- ная осушенная пашня	6.10	251	56.0	4.02	1.50	7.75	2.28	11.0	12.5	88.0	
4	Ковровский р-н, ИП Орлов А.В., торфяные низинные почвы, 2017 г.	№ 12, 5.9 га, многолет- ные травы 3-го года пользования	5.96	119	110	5.25	2.99	9.25	2.64	12.8	15.7	81.0	5.46
Не определяли													
		№ 13, 5.9 га, многолет- ные травы 3-го года пользования	5.96	137	114								
		№ 14, 5.9 га, многолет- ные травы 3-го года пользования	5.81	251	49.0	2.65	2.02	6.63	2.37	10.0	12.0	83.2	2.12
		№ 15, 17.8 га, многолет- ные травы3-го года пользования	5.77	18.0	18.0	2.82	2.07	5.63	2.24	8.75	10.8	80.9	1.26
		Среднее взвешенное значение ($\bar{x}$): №№12–15	5.84	93.3	54.4	3.27	2.24	6.55	2.35	9.80	12.0	81.4	2.27
		№ 2, 96.3 га, естествен- ный сенокос	6.14	2.47	25.0	5.35	0.42	34.9	1.51	38.0	38.4	98.9	7.82

Примечание. Приведены средние величины агрохимических показателей.

нием органического вещества и серы в почвах также была установлена сильной тесноты корреляционная связь ($r = 0.83$, $P = 0.95$). Содержание в почвах подвижной сульфатной серы соответствовало низкому уровню содержания (< 6.0 мг/кг почвы) [15]. Для устранения недостатка серы в выработанных торфяных почвах рекомендуется применение органических и серосодержащих минеральных удобрений.

На данный момент для торфяных почв по-прежнему не разработаны предельно-допустимые концентрации (ПДК) ТМ, при этом встречающиеся в научной литературе фоновые содержания металлов в торфяных почвах сильно изменяются в зависимости от различных почвенно-климатических условий их образования. Поэтому для оценки концентрации металлических токсикантов использовали методику, применяемую в геохимии, заключающуюся в сравнении полученных величин валовых концентраций микроэлементов в выработанных торфяных почвах Владимирской обл. с кларками химических элементов в земной коре [16] и ПДК этих же элементов для минеральных почв.

Опыт освоения торфяных почв показал, что ряд микроэлементов играет большую роль в обеспечении их плодородия. Установлено, что их недостаток или избыток в почве приводит к снижению урожайности и качества растительной продукции [5, 17]. Данные о загрязненности выработанных торфяных почв ТМ и As представлены в табл. 2.

Медь. Значение меди для плодородия торфяников выявлено наиболее полно. В большинстве торфяных почв валовое содержание меди составляет ≤ 10 – 20 мг/кг, причем наибольшее содержание меди отмечено в низинных и переходных торфяных почвах, наименьшее – в верховых. Подтверждение данному факту было отмечено и в проведенном нами исследовании. Например, обеспеченность торфяной низинной почвы медью была в 1.24 раза больше по сравнению с содержанием металла в торфяной переходной почве [13]. Следует отметить, что в исследованных почвах была отмечена низкая обеспеченность медью, как микроэлементом питания растений [11], следовательно, почвы нуждаются во внесении медьсодержащих удобрений.

Никель. Среднее содержание никеля в болотных почвах составляет ≈ 30 мг/кг, с пределами варьирования от 2 до 65 мг/кг почвы [18]. В работе [19] отмечено, что валовое содержание никеля в торфяных низинных почвах может быть в несколько раз больше, чем в переходных торфяниках. Проведенное обследование выявило превы-

шение концентрации Ni в торфяной низинной почве по сравнению с переходной почвой в 2.27 раза.

Цинк. По количеству валового и подвижного Zn торфяные почвы верховых и переходных болот (2.5–5.0 мг/кг) значительно уступали почвам низинных болот (7.5 мг/кг) [13]. Торфяные низинные почвы СПК “Экосфера” также имели большую в 1.45 раза обеспеченность валовым Zn по сравнению с переходными торфяными почвами СПК “Демидовский”.

Кобальт. В отсутствии ПДК валовых форм кобальта в почвах при агроэкологической оценке концентраций поллютантов рекомендуется принимать в качестве этого показателя удвоенное региональное фоновое содержание элемента в незагрязненной почве [20]. Фоновое содержание Co в почвах Владимирской обл. составляет 5.4 мг/кг или с учетом удвоения фоновой концентрации – 10.8 мг/кг [21]. Таким образом, по содержанию валовых форм Co исследованные почвы СПК “Демидовский” и СПК “Экосфера” не были загрязненными. В исследованных почвах была отмечена низкая обеспеченность кобальтом [11], поэтому, почвы нуждаются во внесении кобальтсодержащих удобрений.

Марганец. По сравнению со многими минеральными почвами торфяные почвы отличаются высоким содержанием марганца. Торфяные низинные почвы содержали наибольшее количество как валового марганца (до 1750 мг/кг), так и его подвижных форм (125–250 мг/кг). Обеспеченность марганцем переходных и особенно верховых торфяников значительно меньше, чем низинных, в среднем в 5–8 раз. Торфяные низинные почвы СПК “Экосфера” были в 1.5 раза более обеспечены Mn, чем переходные торфяные почвы СПК “Демидовский” (табл. 2).

Свинец. Фоновое валовое содержание свинца в почвах европейской части России варьирует в пределах 15–47 мг/кг, в торфяных почвах – 3–24 мг/кг [22], что во многом согласуется с показателями, полученными в нашем исследовании. Сорбционные процессы связывания Pb почвами в значительной мере обусловлены содержанием в них органического вещества и его качественным составом. Установлено, что среди нескольких видов почв самым высоким сродством к поглощению Pb обладал низинный торф за счет высокого содержания в нем органического вещества, представленного гуминовыми кислотами [23]. Наибольшее валовое содержание Pb в торфяной низинной почве (СПК “Экосфера”) можно объяснить большим в 1.72 и 1.170 раза соответственно

Таблица 2. Содержание ТМ и As в выработанных торфяных почвах

№ п/п	Наименование района, хозяйство, тип почвы, год агрохимического обследования	№ участка, площадь, вид с/х угодья	Валовое содержание, мг/кг почвы								Подвижные формы, мг/кг почвы		Степень подвижности элемента, %		
			Pb	Cd	Cu	Zn	Co	Mn	Ni	Hg	As	Pb*	Cd**	Pb	Cd
1	г. Гусь-Хрустальный, СПК “Демидовский”, торфяные переходные почвы, 2012 г.	№ 169, 37 га, заброшенная осушенная пашня	3.27	0.21	2.21	9.44	1.76	130	2.78	0.01	0.82	Не определяли			
2	Ковровский р-н, СПК “Экосфера”, торфяные низинные почвы, 2012 г.	№ 39, 51.5 га, заброшенная осушенная пашня	5.40	0.24	2.74	13.7	2.11	189	6.33	0.01	0.98	Не определяли			
3	Гороховецкий р-н, ИП Петросян Г.Р., низинные торфянисто-глеевые почвы, 2016 г.	№ 2, 96.3 га, естественный сенокос	3.39	0.11	Не определяли					0.03	1.83	0.25	0.05	7.37	45.45
ПДК (ОДК)			32	2	55	100	–	1500	85	2.1	2	6.0	1.0		
Кларк			12.5	0.2	55	70	25	950	75	0.08	1.8				

Примечание. Приведены средние валового содержания и содержания подвижных форм ТМ и As в почвах.

*ПДК подвижных форм ТМ.

**ОДК подвижных форм ТМ.

присутствием в ней органического вещества по сравнению с переходной торфяной почвой (СПК “Демидовский”) и низинной торфянисто-глеевой почвой (ИП Петросян Г.Р.).

Кадмий. Валовое содержание кадмия в пахотных торфяных почвах невелико и варьирует в пределах 0.17–0.25 мг/кг [22], что полностью подтверждено полученными нами данными. Содержание валовых форм кадмия в выработанных торфяных почвах было примерно в 10–20 раз меньше валовой ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) кадмия и было в 2 раза меньше кларкового содержания кадмия в земной коре (низинные торфянисто-глеевые почвы) или соответствовало кларку (переходные и низинные торфяные почвы).

Ртуть. Отмечено, что торфяные нативные и осушенные почвы характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению к ртути благодаря высокому содержанию органического вещества. Ртуть в торфяных горизонтах сравнительно прочно связана с органическим веществом в виде комплексных соединений [24]. Среднее валовое содержание Hg в торфяных почвах России составляет 0.02–0.3 мг/кг [25]. Валовое содержание Hg в исследованных торфяных почвах было заметно меньше величины кларка и ПДК этого экотоксиканта в минеральных почвах и соответствовало нижнему порогу фоновой концентрации для торфяных почв.

Мышьак. Фоновые валовые концентрации As в главных типах горных пород варьируют в пределах 0.5–2.5 мг/кг. Основной источник накопления As в почвах сельскохозяйственного использования – длительное использование мышьяковистых пестицидов. В настоящее время в силу очень редкой востребованности и использования на территории Владимирской обл. указанных пестицидов опасность загрязнения почв мышьяком отсутствует. Металлоид в торфяных почвах содержится в количестве, значительно меньшем, чем кларк в литосфере и валовая ПДК для почв.

Расчет суммарного показателя загрязнения исследованных почв (СПК “Демидовский”, СПК “Экосфера” и ИП Петросян Г.Р.) ТМ и As определяли по формуле: $Z_c = \sum K_{Ci} - (n - 1)$, где n – число анализируемых элементов, K_{Ci} – коэффициент концентрации i -го элемента, $K_{Ci} = C_i/C_{\Phi i}$, где C_i – фактическая валовая концентрация элемента в почве, $C_{\Phi i}$ – фоновая (кларковая) концентрация [26]. Расчет Z_c показал, что почвы участков имели допустимую степень загрязнения с рассчитанными величинами $Z_c < 16$.

Концентрации подвижных форм соединений Pb и Cd в низинной торфянисто-глеевой почве, извлекаемых вытяжкой ААБ, были меньше установленных величин ПДК/ОДК в 24 и 20 раз соответственно. Степень подвижности соединений Pb в низинной торфянисто-глеевой почве была в 6.16 раза меньше подвижности соединений Cd (табл. 2).

Степень подвижности соединений Pb и Cd в исследованных почвах отличалась существенно меньшей величиной от подвижности данных поллютантов в минеральных почвах, где она находилась на уровне 35–60 и 50–80% соответственно [17, 27]. Между валовыми и подвижными формами соединений Pb и Cd в низинной торфянисто-глеевой почве отмечена сильная корреляционная связь ($r_{Pb} = 0.84$ и $r_{Cd} = 0.92$). Полученные параметры степени подвижности Pb и Cd согласовались с данными других исследований, проведенных на торфяных почвах [5, 27, 28].

ВЫВОДЫ

1. Все участки выработанных торфяных почв обладают низким уровнем эффективного плодородия. Основным агрохимическим фактором, ограничивающим плодородие, было содержание в почве подвижного фосфора и, прежде всего, подвижного калия.
2. Слабую потребность в нейтрализации почвенной кислотности испытывала только торфяная переходная почва СПК “Демидовский” в дозе 2 т/га в виде чистого CaCO_3 .
3. На почвах выработанных участков с низкой обеспеченностью подвижным фосфором рекомендуется проводить фосфоритование в дозах 200–300 кг P_2O_5 /га.
4. Для повышения плодородия выработанных торфяников при низкой обеспеченности подвижным калием следует ежегодно вносить калийные удобрения в потребных дозах, исходя из обеспеченности им почвы и выноса элемента культурой с запланированным урожаем.
5. Недостаток серы в обследованных почвах рекомендуется устранять за счет совместного или раздельного применения органических и серосодержащих минеральных удобрений.
6. Исследованные выработанные торфяные почвы Владимирской обл. по содержанию всех изученных ТМ и As не превышали величин ПДК, ОДК и кларков элементов, поэтому характеризуются как “экологически чистые” почвы, пригодные для возделывания сельскохозяйственных культур. Почвы имеют низкую обеспеченность

Со и Си, как микроэлементами питания растений. Для повышения обеспеченности почв этими элементами рекомендуется проводить внесение кобальт- и медьсодержащих удобрений.

7. Необходимо регулярное проведение комплексного мониторинга изменений плодородия почв, содержания Со и Си, а также агроэкологического состояния выработанных торфяников по содержанию наиболее опасных ТМ и As.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежегодный доклад о состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2019 году. Вып. 27. Владимир, 2020. 135 с.
2. Рагимов А.О. Эколого-функциональная роль почв в формировании уровня благополучия населения Владимирской области: Дис. ... канд. биол. наук. Владимир, 2015. 229 с.
3. Лукин С.М., Анисимова Т.Ю. Проблемы рационального использования ресурсов торфа и торфяных почв Владимирской области // Агрохим. вестн. 2012. № 3. С. 8–12.
4. Ефимов В.Н. Торфяные почвы и их плодородие. Л.: Агропромиздат, 1986. 316 с.
5. Уткин А.А. Влияние цеолитсодержащего препарата на физико-химические свойства торфяной низинной почвы и аккумуляцию свинца растениями // Агрохимия. 2010. № 4. С. 62–68.
6. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
7. Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 52.18.289-90. М.: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. 1990. 36 с.
8. Атомно-абсорбционное определение ртути в объектах окружающей среды и биологических материалах: Сб. метод. указ. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 59 с.
9. Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом. М.: ЦИНАО, 1993. 13 с.
10. Зайко С.М., Вашкевич Л.Ф., Бачила С.С. Обусловленность эволюции и деградации осушенных почв // Тез. докл. Всерос. конф. "Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям". М., 2002. С. 68–69.
11. Торф в сельском хозяйстве Нечерноземной зоны: Справ-к / Под ред. В.Н. Ефимова, И.Н. Донских, Л.М. Кузнецова, сост. В.Н. Ефимов. Л.: Агропромиздат, 1987. 303 с.
12. Сурова Г.А. Рекультивация и сельскохозяйственное освоение выработанных торфяников. Учеб. лекция. Иваново: ИГСХА, 2004. 30 с.
13. Ефимов В.Н. Торфяные почвы. М.: Россельхозиздат, 1980. 120 с.
14. Возбуцкая А.Е. Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.
15. Аристархов А.Н. Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 5. С. 39–47.
16. Taylor S.R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // Geochim. Cosmochim. Acta. 1964. V. 28. № 8. P. 1273–1285.
17. Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / Под ред. М.М. Овчаренко. М.: ЦИНАО, 1997. 290 с.
18. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. Учеб. пособ. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.
19. Уланов А.Н. Торфяные и выработанные почвы южной тайги Евро-Северо-Востока России. Киров, 2005. 320 с.
20. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. М., 1995. 30 с.
21. Экологический атлас Владимирской области / Под ред. Т.А. Трифионовой. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2007. 92 с.
22. Соколов О.А., Черников В.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 1. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. 164 с.
23. Зырин Н.Г., Сердюкова А.В., Соколова Т.А. Сорбция свинца и состояние поглощенного элемента в почвах и почвенных компонентах // Почвоведение. 1986. № 4. С. 39–44.
24. Ляпина Е.Е. Экогеохимия ртути в природных средах Томского региона: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2012. 21 с.
25. Удоденко Ю.Г. Накопление и распределение ртути в почвах и педобионтах заповедных территорий на примере Воронежского и Окского заповедников: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 2014. 23 с.
26. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Метод. указ. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.
27. Каплунова Е.В. Трансформация соединений цинка, свинца и кадмия в почвах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1983. 23 с.
28. Уткин А.А. Тяжелые металлы (цинк, свинец и кадмий) в системе: торфяная низинная почва–растение: Дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.–Пушкин, 2004. 180 с.

Assessment of the Level of Fertility and Agro-Ecological Condition Developed Peat Soils Vladimir Region

A. A. Utkin^{a, #} and S. N. Lukyanov^b

^a *Ivanovo state agricultural Academy D.K. Belyaev
Sovetskaya str., 45, Ivanovo, 153012, Russia*

^b *Center of Agrochemical Service "Vladimirsky"
Sokolova-Sokolenka str., 26A, Vladimir, 600027, Russia*

[#] *E-mail: aleut@inbox.ru*

The paper presents the results of field studies of the upper (arable) layer developed peat soils for agricultural purposes Vladimir region, which was carried out by solid agrochemical survey for the establishment of the level of fertility by major agrochemical indicators and agro-ecological condition of the contents of the following heavy metals: lead, cadmium, copper, zinc, cobalt, mercury, manganese, nickel and metal-loid: arsenic. It was found that all the areas of the developed peat soils had a low level of effective fertility. The main agrochemical factors limiting fertility were the availability of mobile phosphorus and, mainly, mobile potassium in peat soils. The total and mobile content of heavy metals and arsenic in the arable layer of peat soils in the region did not exceed the maximum permissible concentrations, approximate permissible concentrations and clark values. The developed peat soils of the Vladimir region, according to the content of the studied pollutants, are slightly polluted and are not dangerous for cultivated plants and human health.

Key words: fertility of soil, agrochemical properties, agroecological state, developed peat soils, Vladimir region.

УДК 631.41:633.8:631.53:58.006(470.21)

АГРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ КОЛЛЕКЦИОННОГО ПИТОМНИКА ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ ПОЛЯРНО-АЛЬПИЙСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА

© 2021 г. Г. М. Кашулина^{1,*}, Н. М. Коробейникова¹, Л. Л. Виравчева¹, Н. В. Чуева¹

¹ Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН
184209 Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, 18а, Россия

*E-mail: galina.kashulina@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

Проведено агрохимическое обследование искусственно созданного гумусового горизонта Prh агро-зема альфегумусового на 27-ми участках коллекционного питомника интродуцированных лекарственных травянистых растений. Гумусовый горизонт был создан из смеси песка, торфа, навоза и извести в 1987 г. Более 10 последних лет почву не пополняли свежим органическим веществом, ежегодно в нее вносили только азофоску (АЗФК) $\approx 40 \text{ г/м}^2$. В смешанных образцах гумусового горизонта определяли гранулометрический состав, полевую влажность, содержание органического вещества по потере при прокаливании, pH_{KCl} , доступные для растений формы фосфора и калия по Кирсанову, аммиачный и нитратный азот в вытяжке 2% K_2SO_4 . Исследования показали, что почва на 82% участков коллекционного питомника является кислой и нуждается в известковании. В условиях промывного водного режима эффект от разового внесения доломитовой муки 200 г/м^2 , в зависимости от исходной кислотности, составил 1–2 года. Содержание в почвах коллекционного питомника доступных для растений форм фосфора и калия было высоким, минеральных форм азота, наоборот, очень низким. Первоочередными задачами повышения плодородия почв коллекционного питомника является внесение больших доз свежих органических удобрений, проведение известкования и увеличение дозы азотных удобрений. Из-за высоких различий между площадками всех агрохимических показателей необходимо разрабатывать индивидуальную для каждой площадки систему агроуправляющих мероприятий.

Ключевые слова: гранулометрический состав, pH_{KCl} , доступные для растений формы фосфора и калия, нитратный азот, аммиачный азот, известкование, антропогенные почвы ботанических садов, Кольский полуостров.

DOI: 10.31857/S0002188121090076

ВВЕДЕНИЕ

Антропогенно преобразованные почвы ботанических садов занимают небольшие территории, но играют огромную роль в сохранении биологического разнообразия. Создание коллекций растений с широкой географией и изучение адаптационных механизмов к новым условиям окружающей среды приобретают особую ценность и в связи с современными проблемами изменения климата. Специфические почвы искусственных ценозов, в том числе ботанических садов, начали привлекать все большее внимание исследователей в последнее время [1–5]. Основной направленностью в этих работах было исследование разнообразия, генезиса и систематики антропогенных почв, а также их экологического состояния. Для характеристики плодородия почв ботаниче-

ских садов в этих работах использовали лишь небольшое число показателей.

Вместе с тем создание и использование плодородного слоя в коллекционных питомниках ботанических садов имеет свои специфические особенности, зависящие не только от природных условий территории, но и от биологических особенностей выращиваемых видов растений и их требований к почвенным условиям [6]. Для более эффективного использования генетического потенциала интродуцированных растений в научных и прикладных целях необходимо более подробное изучение антропогенных почв с точки зрения продукционной основы этих уникальных искусственных экосистем.

Полярно-альпийский ботанический сад КНЦ РАН (ПАБСИ) является самым северным бота-

Таблица 1. Среднемесячная температура и месячная сумма осадков за вегетационный период в годы исследования (по данным метеостанции Апатиты) (<http://www.rp5.ru>)

Месяц	2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.	
	<i>t</i> , °C	осадки, мм	<i>t</i> , °C	осадки, мм	<i>t</i> , °C	осадки, мм	<i>t</i> , °C	осадки, мм
Май	8.7	26	1.6	28	7.8	38	4.9	31
Июнь	11.3	58	8.2	71	10.5	72	10.8	111
Июль	17.4	99	14	85	18.8	20	12.4	43
Август	13.1	138	11.4	123	13.3	55	11	82
Сентябрь	7.7	81	6.4	44	8.5	35	8	47
Сумма		402		351		220		314

ническим садом в России. За 90 лет здесь было акклиматизировано к суровым условиям субарктики более 2500 видов растений из различных природных зон. Морфолого-генетические и эколого-геохимические особенности антропогенно-преобразованных почв в горно-лесотундровой и горнолесной части ПАБСИ (Кировская площадка) были подробно изучены в работе В.И. Чупиной [7]. Коллекция многолетних травянистых растений ПАБСИ в окрестностях г. Апатиты была создана в 1987 г. с целью подбора ассортимента лекарственных растений для Кольского севера и разработки приемов их агротехники [8]. Она включает >300 видов интродуцентов из различных уголков мира. Поскольку каждый вид растений в процессе своей эволюции выработал определенные требования к условиям произрастания, для их успешной интродукции необходимо создание оптимальных почвенных условий. Естественные почвы на Кольском полуострове характеризуются низким естественным плодородием [9, 10] и для успешного выращивания культурных растений требуют применения целого комплекса агротехнических и агрохимических мероприятий, включая регулярное внесение больших доз органических и минеральных удобрений, а также известкование [11–13].

Цель работы – анализ результатов агрохимического обследования почв коллекционного питомника лекарственных травянистых растений, расположенного в лесной зоне ПАБСИ в окрестностях г. Апатиты.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для создания искусственного гумусового горизонт R_{rh} на площадках коллекционного питомника использовали естественный грунт с добавлением компоста, составленного из смеси торфа, песка, навоза и извести. Его мощность на момент исследования составила 12–15 см. Под ним залегает иллювиальный горизонт ВНФ подзола коренной экосистемы. Почва была диагностирована

на как агрозем альфегумусовый гумусово-стратифицированный [14]. В последние 10 лет уход за почвами включал ежегодное весеннее внесение азофоски (АЗФК) в дозе ≈40 г/м² (N60P60K60) на поверхность, а также 1–2-кратную прополку за вегетационный сезон с удалением сорняков вместе с корнями и комом земли.

Среднемесячная температура и месячная сумма осадков за вегетационный период в годы исследования, по данным ближайшей метеостанции в г. Апатиты, представлены в табл. 1.

Первичное агрохимическое опробование искусственного гумусового горизонт R_{rh} на 27-ми площадках коллекционного питомника интродуцированных лекарственных травянистых растений было проведено 12 сентября 2016 г. Размер делянок варьировал от 1 до 5 м². С каждой площадки составлялся один смешанный образец из 10-ти индивидуальных образцов, отобранных почвенным буром-тростью равномерно со всей площади. Повторное обследование этих площадок было проведено 4 сентября 2017 г. На все площадки в течение проведения наблюдений ежегодно в начале вегетационного сезона вносили АЗФК 40 г/м² (N60P60K60).

Для изучения влияния известкования на кислотный статус почв было отобрано 5 площадок, характеризующихся различными уровнями кислотности: пл. 5, 11, 15, 25 и 29. На этих площадках опробование было проведено 26 июня 2017 г. перед внесением удобрений, после чего вместе с минеральными удобрениями была поверхностно внесена доломитовая мука (CaCO₃ · MgCO₃) 200 г/м². Через неделю (3 июля) эти почвы были снова опробованы. Опробование почв на этих площадках было проведено также в начале сентября 2017, 2018 и 2019 гг.

Подготовка образцов к химическому анализу включала протирание свежего образца через сито 2 мм. Агрохимический анализ включал определение потери при прокаливании при температуре

Таблица 2. Агрохимические показатели почвы коллекционного питомника лекарственных травянистых растений по результатам опробования 12.09.2016 г. и 3.09.2017 г. (на абсолютно сухую почву)

Показатель	12.09.2016 г.			3.09.2017 г.		
	Min	Медиана	Max	Min	Медиана	Max
ППП, %	7.4	9.6	15.4	6.9	9.6	14.3
pH _{KCl}	4.5	5.1	6.3	4.5	5.2	6.6
N-NH ₄ , мг/100 г	0.2	0.6	1.4	0.4	1.1	1.8
N-NO ₃ , мг/100 г	0.0	0.1	0.7	0.0	0.2	0.6
N-NO ₃ + N-NH ₄ , мг/100 г	0.3	0.7	1.7	0.5	1.2	2.2
P ₂ O ₅ , мг/100 г	41.8	57.9	96.5	26.4	41.1	94.0
K ₂ O, мг/100 г	8.0	16.5	30.5	7.0	13.0	35.5
H _t , смоль/кг	0.8	3.2	6.1	0.8	2.7	5.8
Влажность, %	24.1	30.7	39.9	21.7	27.6	37.7

600°C (ППП), полевой влажности, величины pH_{KCl} при соотношении почва : раствор = 20 : 50, нитратного и аммиачного азота, извлеченного 2%-ным K₂SO₄ в соотношении 10 : 150. Нитратный азот определяли дисульфифеноловым методом, аммиачный — с реактивом Несслера. Фосфор и калий извлекали 0.2 н. HCl-вытяжкой в соотношении почва : раствор = 1 : 50, фосфор определяли методом Кирсанова, калий — пламенно-фотометрическим методом [15].

В 12-ти образцах 2017 г. был также определен гранулометрический состав по Н.А. Качинскому во фракции <1 мм [16].

Обработка данных включала определение основных статистических параметров распределения (медианы, минимума, максимума) агрохимических показателей, расчеты коэффициентов корреляции и построение диаграмм с использованием Microsoft Excel 2010. Для оценки достоверности различий между наборами данных использовали *U*-критерий Манна–Уитни (http://www.psychol_ok.ru/statistics/mann_whitney).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав. В составе мелкозема искусственного гумусового горизонт R_{ph} на площадках коллекционного питомника травянистых лекарственных растений значительно преобладали песчаные фракции. Сумма песчаных фракций (фракции 0.25–1 мм) варьировала от 74 до 84%. Минимальная доля физической глины (фракция <0.01 мм) составляла 6.6, максимальная — 13.2%. Согласно классификации Н.А. Качинского, почвы на 33% площадок характеризовались как связный песок, на 67% — как супесь.

Влажность. Из-за легкого гранулометрического состава, минеральные почвы в регионе обладают низкой влагоемкостью. Например, в пахотном горизонте окультуренного песчаного подзола с 3.5% гумуса и 4% физической глины в мелкоземе полная влагоемкость составила 58.5%, наименьшая влагоемкость — 23.9% [17]. Поэтому, несмотря на гумидный климат, урожайность культурных растений на песчаных почвах в регионе в значительной степени зависит от гидрологических особенностей вегетационного сезона [18].

На площадках коллекционного питомника даже в наиболее влажный 2016 г. (табл. 1) полевая влажность варьировала от 24 до 40% (табл. 2, рис. 1). Влажность в 2017 г. была значимо, согласно *U*-критерию Манна–Уитни ($U_{\text{эмп}} = 224$, $U_{\text{кр. 0.01}} = 229$), меньше по сравнению с 2016 г. и варьировала от 22 до 38%. В распределении между площадками полевая влажность достоверно при $p \leq 0.01$ положительно коррелировала с ППП ($r = 0.66$ в 2016 г. и $r = 0.91$ в 2017 г.) и содержанием физической глины ($r = 0.72$) в мелкоземе и, наоборот, достоверно отрицательно при $p \leq 0.05$ — с суммой песчаных фракций ($r = -0.58$).

Наблюдения на 5-ти площадках (рис. 2) показали, что наиболее высокая влажность во все сроки отбора образцов была отмечена на площадках с высоким содержанием органического вещества — пл. 5 или 29. И, наоборот, самая низкая — на пл. 25 с самым низким содержанием органического вещества. Согласно *U*-критерию Манна–Уитни, при $p \leq 0.01$, влажность на пл. 25 была значимо меньше по сравнению с пл. 5 и 29. То есть, на некоторых площадках устойчиво сохранялся более высокий уровень влажности, на некоторых, наоборот, — низкий.

На всех 5-ти площадках максимальная влажность пришлась на осень самого влажного 2016 г.

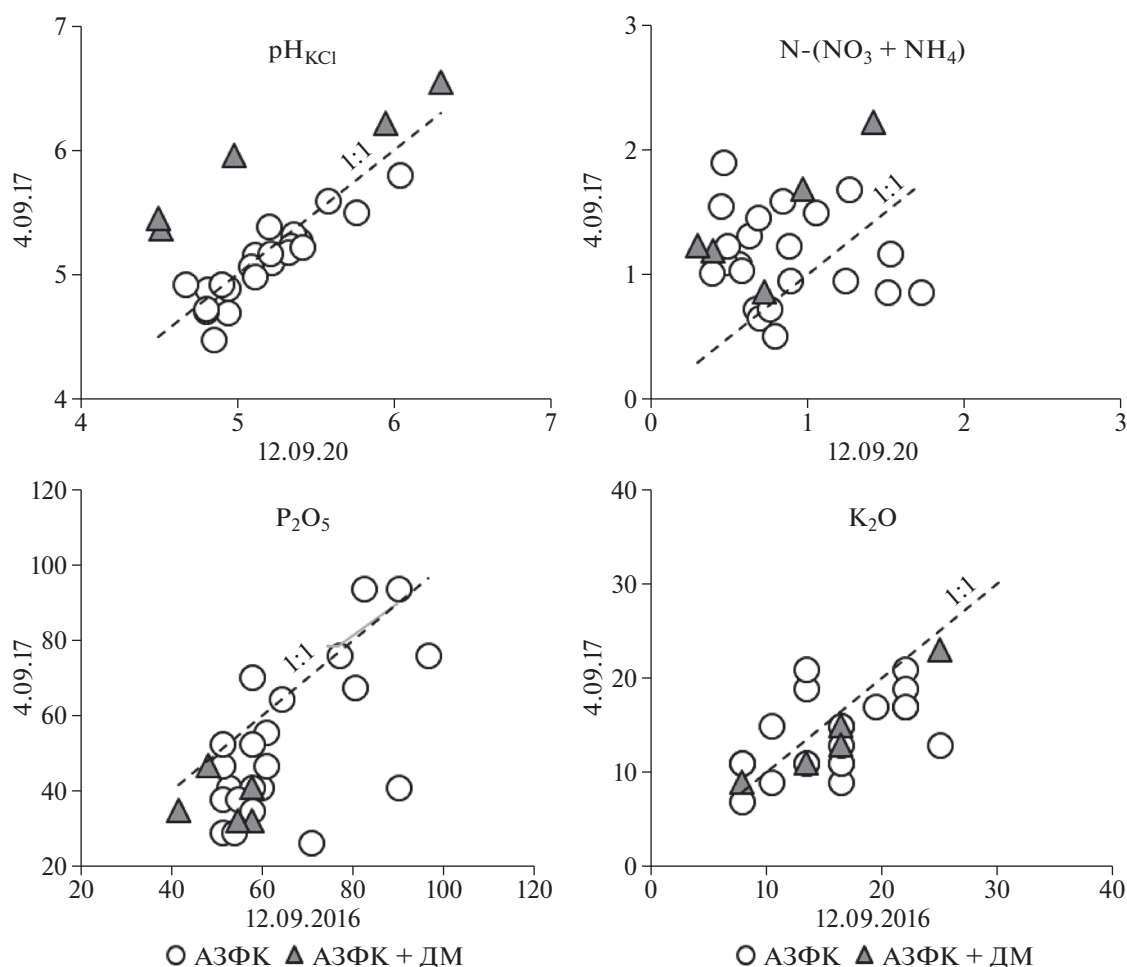


Рис. 1. Соотношение агрохимических показателей почв на площадках коллекционного питомника по результатам обследования осени 12.09.2016 г. и 4.09.2017 г. На все площадки в начале вегетационного периода 2016 и 2017 гг. была внесена азофоска (АЗФК), на 5-ти площадках в начале вегетационного периода 2017 г. дополнительно была внесена доломитовая мука (АЗФК+ДМ). Содержание (N-NH₄ + N-NO₃), P₂O₅ K₂O приведено в мг/100 г почвы.

Минимальная влажность была обнаружена в начале июля сезона 2017 г. и варьировала от 17.5 (пл. 25) до 25.7% (пл. 29), т.е. была близкой к приведенной выше величине наименьшей влагоемкости. Приуроченность максимальной влажности к ранневесеннему и осеннему периодам, а минимальной, опускающейся до величины наименьшей влагоемкости, на июль месяц, является характерной особенностью гидрологического режима всех почв в регионе [17]. Несмотря на то, что отобранные образцы с площадок представляли разные по увлажнению годы (табл. 1) и разные гидрологические периоды (рис. 2), влажность почвы на площадках за время наблюдений варьировала незначительно: коэффициент варьирования на пл. 29 составил 5.4, на пл. 25 — 11%.

Содержание органического вещества. Как показали результаты агрохимического анализа (табл. 2), несмотря на относительно небольшой размер

участка, занимаемого коллекционным питомником, содержание органического вещества, оцененного по величине ППП, между площадками в 2016 и 2017 гг. различалось в 2 раза. Как одно из фундаментальных свойств почв, содержание органического вещества мало менялось в многолетней динамике: коэффициент варьирования ППП в многолетней динамике на пл. 25 составил 3, на пл. 11 — 9.4%. То есть, площадки существенно различались по уровню содержания органического вещества. Например, величина ППП в почве на пл. 5 была больше (значимо, согласно *U*-критерию Манна–Уитни при $p \leq 0.01$) по сравнению с площадками 11, 14, 25 и 29 во все сроки опробования. Различия по величине ППП между остальными площадками (11, 14, 25 и 29) не были значимыми.

Корреляционный анализ показал, что содержание органического вещества (ППП) является фактором, с которым достоверно ($p \leq 0.01$) связа-

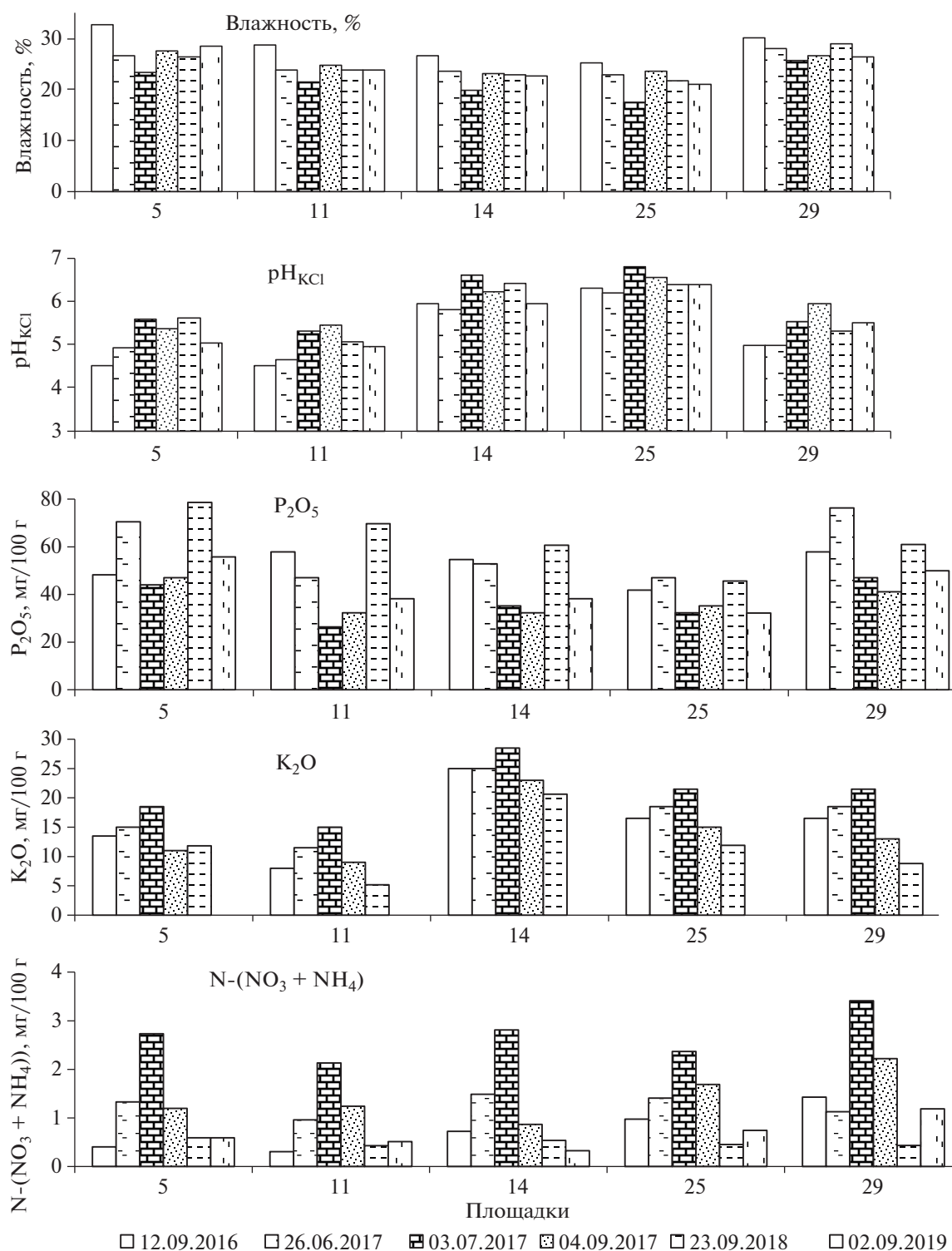


Рис. 2. Трехлетние наблюдения за агрохимическими показателями на 5-ти площадках (5, 11, 14, 25, 29), известкованных 26.06.2017 г.

но распределение между площадками не только влажности, как это было показано выше, но и таких важных агрохимических показателей, как обменная кислотность — pH_{KCl} ($r = -0.40$ для 2016 г.

и $r = -0.61$ для 2017 г.), гидролитическая кислотность — H_t ($r = 0.45$ для 2016 г. и $r = 0.72$ для 2017 г.) и содержание доступного фосфора ($r = 0.63$ для 2016 г. и $r = 0.83$ для 2017 г.).

Кислотность почвы. По результатам обследования осенью 2016 г. величина pH_{KCl} на разных площадках варьировала почти на 2 ед.: от 4.5 до 6.3 ед. pH . По кислотности образцы почв с площадок коллекционного питомника распределялись следующим образом: почва на 2-х площадках (7.4% площадок) характеризовалась как сильнокислая, на 9-ти площадках — как среднекислая (33.3% площадок), на 11-ти (40.7%) — как слабокислая, на 4-х (14.8%) — как близкая к нейтральной и на одной площадке — как нейтральная (3.7%). На неизвесткованных площадках осенью 2017 г. величина pH_{KCl} на большинстве (16 из 22) площадок была от 0.02 до 0.37 ед. ниже по сравнению с 2016 г., и в 6-ти образцах — от 0.02 до 0.26 ед. — выше (рис. 1). Но, согласно *U*-критерию Манна—Уитни, различия кислотности почв неизвесткованных площадок в 2016 и 2017 гг. не были значимыми.

Из-за высокой кислотности для поддержания плодородия окультуренных почв в регионе обязательным мероприятием также является ежегодное известкование почв [9, 11–13]. В соответствии с величиной pH_{KCl} по результатам обследования 2016 г. только на 5 площадках (18%) не требовалось проведение известкования почв [16]. На остальных 22 площадках (82%), в зависимости от кислотности, требовалось внесение извести от 0.3 до 0.5 кг/м². По данным 2017 г., почва на большинстве неизвесткованных площадок (на 19-ти из 22-х, или 86.4%), кроме пл. 15, 19 и 23, нуждалась в известковании.

Для выявления влияния известкования на обменную кислотность почв из 27 площадок было выбрано 5, которые наиболее значительно различались по агрохимическим свойствам: пл. 5, 11, 14, 25 и 29. На этих площадках опробование почв было проведено в начале вегетационного периода 26.06.2017 г. (в этот год начало вегетационного периода значительно задержалось из-за низких температур). После этого были внесены удобрения и известь. Через неделю после внесения мелиорантов на этих площадках снова были отобраны образцы почв на анализ. Изменение агрохимических свойств на 5-ти площадках в течение последующих двух лет после внесения извести представлены на рис. 2.

При опробовании почв в начале вегетационного сезона (26.06.2017) pH_{KCl} оказался близким с показателями осеннего опробования 2016 г. на всех площадках, за исключением пл. 5. На внесение извести положительно отреагировала почва на всех 5-ти площадках: через неделю после внесения извести величина pH_{KCl} возросла от 0.25 до 0.98 ед. То есть, почва на всех площадках оказалась очень восприимчивой к известкованию, и

даже небольшая доза доломитовой муки значительно изменила кислотные условия в почве.

К осени 2017 г. эффект от внесения извести был очевиден на всех 5-ти площадках. Осенью 2018 и 2019 гг. кислотность была ниже, но не достигла уровня 2016 г. При этом кислотность почвы на пл. 14 и 25 весь период наблюдений оставалась в области, благоприятной для роста большинства видов растений. На более кислых участках потребность в повторном известковании возникла уже через 1 год (пл. 11, 29) или 2 года (пл. 5) после внесения извести, т.е. исходная неоднородность кислотности почв на площадках коллекционного питомника требует постоянного слежения за этим параметром и разработки индивидуального для каждой площадки режима известкования.

Распределение величины pH_{KCl} между 5-ю площадками было противоположным содержанию органического вещества. Наиболее высокие величины pH_{KCl} (значимо большие по сравнению с пл. 5, 11 и 29 согласно *U*-критерию Манна—Уитни) были свойственны пл. 14 и 25 с более низкими величинами ППП. Причиной более низкой кислотности почвы на площадках 14 и 25 могли быть и подкronовые выпадения березы, растущей рядом с пл. 14, и боярышника — рядом с пл. 25, а также поступлением их высокозольного опада.

Доступные соединения фосфора. По результатам первого тура обследования осенью 2016 г., различия между площадками по содержанию доступного фосфора в почвах составили 2.3 раза, в 2017 г. — 3.6 раза. Сравнение полученных результатов и существующих шкал обеспеченности окультуренных почв элементами питания [19] показали, что почвы на всех площадках коллекционного питомника характеризовались очень высокой обеспеченностью доступным для растений фосфором. Однако, как показали эксперименты, несмотря на высокие показатели, сельскохозяйственные растения в регионе положительно отзывались на фосфорные удобрения, внесенные совместно с азотом и калием. Поэтому для поддержания плодородия окультуренных почв в регионе было рекомендовано внесение фосфора вместе с другими минеральными и органическими удобрениями [9, 11, 12].

Подвижный фосфор оказался элементом, значительно варьирующим по срокам отбора. Осенью 2017 г. его содержание на большинстве площадок (на 22-х из 27-ми) оказалось меньше по сравнению с 2016 г. (рис. 1). В среднем содержание фосфора к осени 2017 г. снизилось на 20% (среднее квадратичное отклонение было равно 20.6%). Однако уровни его содержания остались в области высокой обеспеченности. *U*-критерий

Манна–Уитни показал, что это снижение было значимым (при $p \leq 0.01$): $U_{\text{эмп}} = 181$, $U_{\text{кр}, 0.01} = 229$.

На большинстве известкованных площадок минимальное содержание подвижного фосфора было обнаружено через неделю после внесения мелиорантов и/или к концу вегетационного сезона 2017 г. (рис. 2). По сравнению с данными 26.06.2017 г., концентрация доступного фосфора через неделю после внесения извести и удобрений снизилась на 31–44%. Наиболее высокое содержание доступного фосфора на известкованных площадках пришлось на первый тур опробования осенью 2016 г., на начало вегетационного периода 2017 г. и на осень 2018 г. Различия между сроками отбора образцов на одной площадке составляли от 1.5 (пл. 25) до 2.6 (пл. 11) раза. Из-за высокого варьирования по срокам отбора образцов различия между площадками по содержанию доступного фосфора оказались незначимыми.

Доступные соединения калия. Для содержания подвижного калия было свойственно высокое пространственное варьирование (табл. 2, рис. 1). Различия между площадками по содержанию подвижного калия в почвах по результатам опробования 2016 г. составили 3.8, 2017 г. – 5.1 раза. По содержанию подвижного калия почвы на 6-ти площадках характеризовались средним уровнем обеспеченности калием, 13 (48%) – повышенным, 7 площадок (26%) – высоким и 1 площадка – очень высоким [19]. Содержание K_2O в почве в 2017 г. было на 20-ти площадках на 1–12 мг/100 г (на 8–42%) меньше по сравнению с 2016 г., на 7-ми площадках – больше от 1 до 7.5 мг/100 г (от 12 до 55%). Однако, согласно U -критерию Манна–Уитни, различия между 2016 и 2017 гг. по содержанию подвижного калия были незначимы ($U_{\text{эмп}} = 302$, $U_{\text{кр}, 0.01} = 229$).

Поскольку калий является подвижным элементом и легко вымывается из почв, регулярное внесение калийных удобрений также является необходимым мероприятием для поддержания плодородия окультуренных почв в регионе [9, 11, 12].

Многолетние наблюдения на 5-ти площадках показали, что почвы хорошо отзывались на внесение калия в комплексе с другими минеральными удобрениями в начале вегетационного сезона. Через неделю после их совместного с известкованием содержания подвижного калия повысилось на 3.0–3.5 мг/100 г, или на 14–30%. Однако уже к концу вегетационного периода 2017 г. его содержание уменьшилось ниже уровня осени 2016 г. То есть, эффект от внесения калия в условиях промывного водного режима на легких по гранулометрическому составу почвах был непродолжительным.

Наблюдения на 5-ти площадках также подтвердили наличие больших различий между площадками по содержанию подвижного калия в почвах, т.е. его высокое пространственное варьирование. Наиболее высоким содержанием подвижного калия во все сроки отбора образцов почв характеризовалась площадка 14, расположенная рядом с кроной березы, наиболее низким – площадки 5 и 11, расположенные на открытом месте. Согласно U -критерию Манна–Уитни, содержание подвижного калия в почве на пл. 14 было значимо больше по сравнению с остальными площадками ($U_{\text{эмп}} = 0$, $U_{\text{кр}, 0.01} = 1$).

Минеральные формы азота. Первичное опробование осенью 2016 г. показало, что содержание минеральных форм азота в почвах коллекционного питомника было очень низким: содержание аммиачного азота варьировало 0.23 до 1.43 (среднее 0.72 ± 0.33), нитратного – от 0 до 0.69 (среднее 0.11 ± 0.14) мг/100 г почвы (табл. 2, рис. 1). В соответствии со шкалой Г.П. Гамзикова [20], обеспеченность почв минеральными формами азота по величине суммарного содержания аммиачного и нитратного азота на 89% площадок характеризовалась как очень низкая, на 11% – как низкая. Результаты предшествующих исследований [18, 21] показали, что причиной столь низкого содержания минеральных форм азота была низкая микробиологическая активность почв из-за длительного отсутствия поступления в почву свежего органического вещества, содержащего легкодоступные для микроорганизмов формы органического вещества. Для поддержания достаточного уровня минеральных форм азота в окультуренных почвах региона рекомендуется ежегодное внесение навоза до 90 т/га и высоких доз (до 120 кг д.в./га) минеральных азотных удобрений [9, 11, 12]. В почву коллекционных питомников ежегодно весной вносили только N_{60} в виде АЗФК, а навоз не вносили уже более 10 лет. Кроме того, длительное время регулярно при прополке 1–2 раза за сезон из почв удаляли азот, связанный с сорными растениями.

Осенью 2017 г. содержание минерального азота в большинстве образцов почв (в 17-ти из 22-х) с неизвесткованных площадок было от 9 до 305% больше по сравнению с осенью 2016 г., хотя весной 2016 г. также вносили минеральные удобрения. Тем не менее, и осенью 2017 г. 77% площадок характеризовались очень низкой обеспеченностью минеральными формами азота, 23% – низкой. U -критерий Манна–Уитни показал, что содержание минеральных форм азота ($N-NO_3 + N-NH_4$) осенью 2017 г. было значимо ($p \leq 0.01$) больше по сравнению с осенью 2016 г.: $U_{\text{эмп}} = 156$, $U_{\text{кр}, 0.01} = 180$. То есть, в отличие от фосфора и калия, обеспе-

ченность почв коллекционных питомников доступными минеральными формами азота характеризовалась как очень низкая. Для поддержания плодородия почв коллекционного питомника на всех площадках требуется внесение больших доз азотных удобрений.

В начале вегетационного периода в 2017 г. содержание минеральных форм азота в почвах 5-ти площадок было значительно больше по сравнению с осенью 2016 г. на всех площадках, кроме пл. 29 (рис. 2), но все показатели оставались в очень низкой области обеспеченности азотом (<15 мг/кг). Повышение содержания минеральных форм азота в начале лета и снижение к осени является характерным для его сезонной динамики в регионе [22]. Через неделю после внесения удобрений и извести содержание минеральных форм азота увеличилось по сравнению с началом вегетационного периода от 68.1 (пл. 25) до 202% (пл. 29). Наибольший вклад в увеличение содержания минеральных форм азота внес аммиачный азот: от 52 (пл. 14) до 93% (пл. 11). При этом все площадки, кроме пл. 29, по содержанию минеральных форм азота остались в области низкой обеспеченности азотом. К осени 2017 г. содержание минеральных форм азота резко снизилось. Уровни содержания минеральных форм азота на 3-х площадках (пл. 5, 11, 14) характеризовались как очень низкие, на 2-х площадках (пл. 25 и 29) – как низкие. Осенью 2-х последующих лет (2018 и 2019 гг.) суммарное содержание аммиачного и нитратного азота на всех известкованных площадках не превышало 1.2 мг/100 г почвы, и обеспеченность минеральными формами азота характеризовалась как очень низкая. Из-за высокого временного варьирования, различия между площадками по содержанию минеральных форм азота не были значимыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агрохимическое обследование показало, что искусственно созданный гумусовый горизонт P_{rh} на участках, длительно используемых под посадки интродуцированных многолетних лекарственных травянистых растений, в настоящее время характеризуется небольшой мощностью (12–15 см), легким песчаным или супесчаным гранулометрическим составом и низкой полевой влажностью. Несмотря на гумидный климат в отдельные гидрологические периоды вегетационного сезона влажность почв снижается до наименьшей влагоемкости.

При длительном отсутствии известкования, величина pH_{KCl} почв на обследованных площад-

ках коллекционного питомника варьировала от 4.5 до 6.4 ед. На 22-х площадках из 27-ми (82%) pH_{KCl} был ниже 5.5 ед., и почва нуждалась в известковании. На однократное внесение доломитовой муки почва на площадках коллекционного питомника среагировала значительным снижением кислотности, однако в условиях промывного режима эффект от внесения извести был непродолжительным. Через год или два, в зависимости от площадки, кислые почвы снова нуждались в известковании. В сельскохозяйственной практике в регионе ежегодное известкование почв является необходимым агротехническим мероприятием.

Как и окультуренные почвы в регионе, почвы на площадках коллекционного питомника характеризовались высоким содержанием доступного для растений фосфора и калия. Сельскохозяйственные растения хорошо отзываются на дополнительное внесение этих элементов, и ежегодное применение фосфорных и калийных удобрений также является обязательным агротехническим мероприятием для поддержания плодородия окультуренных почв в регионе.

Сложившаяся практика ухода за почвами коллекционного питомника с ежегодным внесением только небольших доз комплексных минеральных удобрений привела к обеднению почв минеральными формами азота, особенно нитратного. На 89% площадок почва характеризовалась очень низкой обеспеченностью минеральными формами азота. Даже через неделю после внесения азота с АЗФК в дозе N_{60} почвы оставались в области низкой обеспеченности минеральными формами азота. Как было показано в предыдущих исследованиях, активность микроорганизмов в окультуренных почвах в регионе зависит от наличия свежего органического вещества, поэтому для поддержания в почвах достаточного уровня доступного азота требуется ежегодное внесение больших доз органических удобрений (навоз 40–90 т/га) и минеральных форм азота (до N_{120}).

Поскольку многие агрохимические показатели плодородия зависят от содержания органического вещества, первоочередной задачей повышения плодородия искусственно-созданного гумусового горизонта коллекционного питомника травянистых лекарственных растений является повышение его содержания за счет внесения больших доз свежих органических удобрений. Необходимо также провести известкование на большей части площадок и значительно увеличить дозу минеральных азотных удобрений.

При этом, из-за высоких различий всех агрохимических показателей между площадками, не-

обходимо разрабатывать индивидуальную для каждой площадки систему агромелиоративных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матинян Н.Н., Урусевская И.С. Почвы острова Валаам. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 32 с.
2. Урусевская И.С., Матинян Н.Н. Антропогенно-преобразованные почвы островных монастырей таежно-лесной зоны России // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1069–1079.
3. Строганова М.Н., Раппопорт А.В. Антропогенные почвы ботанических садов крупных городов южной тайги // Там же. С. 1094–1101.
4. Чупина В.И. Антропогенные почвы ботанических садов (Обзор) // Почвоведение. 2020. № 4. С. 495–506. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040048>
5. Чупина В.И. Почвы Никитского ботанического сада и их геохимические свойства // Вестн. МГУ. Сер. 5: География. 2020. № 1. С. 35–41.
6. Клименко О.Е., Орел Т.И., Новицкий М.Л. Оценка агроэкологических условий для закладки коллекционных насаждений плодовых культур // Бюл. Гос. Никитского бот. Сада. 2019. Вып. 131. С. 15–24. <https://doi.org/10.25684/NBG.boolt.131.2019.02>
7. Чупина В.И. Природные и антропогенные почвы Полярно-альпийского ботанического сада (г. Кировск) // Вестн. МГУ. Сер. 17: Почвоведение. 2020. № 2. С. 3–9.
8. Елсаков Г.В., Горелова А.П., Миронова Р.А. Роль удобрений при возделывании лекарственных культур в Заполярье // Агрохимия. 2001. № 2. С. 40–45.
9. Переверзев В.Н., Кислых Е.Е. Азот в почвах Кольского полуострова. Л.: Наука, 1978. 126 с.
10. Переверзев В.Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.
11. Елсаков Г.В. Влияние минеральных удобрений на урожай горохово-овсяной смеси // Агрохимия. 1978. № 6. С. 76–78.
12. Елсаков Г.В. Агрономическая эффективность органических удобрений в условиях Мурманской области // Агрохимия. 1983. № 1. С. 76–80.
13. Переверзев В.Н. Культурное почвообразование на Крайнем Севере. Апатиты: Кольский НЦ РАН, 1993. 156 с.
14. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.
15. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
16. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
17. Семко А.П. Гидротермический режим почв лесной зоны Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1982. 142 с.
18. Переверзев В.Н. Биохимия гумуса и азота почв Кольского полуострова. Л.: Наука, 1987. 303 с.
19. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / Под ред. Державина Л.М., Булгакова Д.С. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.
20. Гамзиков Г.П. Научные основы и рекомендации по диагностике и оптимизации минерального питания зерновых и других культур. М.: ВИУА, 2000. 99 с.
21. Данилова А.А. Минерализационные процессы в криоаридных почвах Центральной Якутии // Агрохимия. 2018. № 8. С. 3–13. <https://doi.org/10.1134/S0002188118080069>
22. Барановская А.В., Левина В.И., Переверзев В.Н. Сезонная динамика почвенных процессов на Полярном Севере. Л.: Наука, 1969. 119 с.

Agrochemical Characteristic of the Soils of the Collection of Introduced Medicinal Herbaceous Plants of the Polar-Alpine Botanical Garden

G. M. Kashulina^{a, #}, N. M. Korobeynikova^a, L. L. Viracheva^a, and N. V. Chueva^a

^a Polar-Alpine Botanical Garden-Institute KSC RAS
ul. Fersmana 18a, Murmansk district, Apatity 194209, Russia

[#] E-mail: galina.kashulina@gmail.com

The agrochemical survey of the artificially created humus horizon on 27 sites of the collection of introduced medicinal herbaceous plants was carried out. Studies have shown that the soil in 82% of collectible sites is acidic and needs lime. Under the free drainage conditions, the effect of one-time application of 200 g/m² of dolomite flour remained only 1–2 years, depending on the original acidity. The content of the plant-available forms of phosphorus and potassium in the soils was high, mineral forms of nitrogen, on the contrary, very low. The first tasks of increasing the fertility of the soils are to make large doses of fresh organic fertilizers, carry out liming and increase the dose of mineral nitrogen fertilizers. Due to the high differences between the sites in all agrochemical parameters, it is necessary to develop an individual system of agro-ameliorative measures for each site.

Key words: gran size composition, pH_{KCl}, plant-available forms of phosphorus and potassium, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen, liming, man-made soils of botanical garden, Kola Peninsula.

УДК 631.415:631.445.24:631.878

ДИНАМИКА КИСЛОТНОСТИ И ЕМКОСТИ КАТИОННОГО ОБМЕНА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ

© 2021 г. Л. В. Бойцова^{1,*}, Е. Я. Рижия^{1, 2}, В. И. Дубовицкая¹¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия² Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79, Россия

*E-mail: larisa30.05@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.

После доработки 21.04.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

В двухлетнем вегетационно-полевом эксперименте и 7-месячном лабораторном опыте изучили влияние внесения биоугля в дозе 20 т/га на величины кислотности и емкости катионного обмена. Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре МОС-АФИ (Ленинградская обл.). Дерново-подзолистые супесчаные разновидности почв различались по степени окультуренности: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). Схема опыта: контроль (без биоугля) и почва с биоуглем в дозе 20 т/га. Лабораторный эксперимент проводили в течение 7 мес. в вегетационных сосудах объемом 500 мл, инкубированием в биологическом шкафу при температуре 28°C при постоянной влажности почвы. Почва для лабораторного эксперимента отобрана в вариантах полевого эксперимента. Цель работы — оценка временных изменений кислотности почв и их емкости катионного обмена при внесении биоугля. В результате полевых исследований установлено, что внесение древесного биоугля в почву в дозе 20 т/га не оказало существенного влияния на изменение кислотности почвы как в варианте СОК, так и в варианте ВОК. Прослежен тренд снижения потенциальной кислотности на 0.2–0.3 ед. Внесение биоугля в почву способствовало повышению емкости катионного обмена почвы, в среднеокультуренной почве на 14.0%, в высокоокультуренной почве — на 18.5% по истечении 2-х лет. В лабораторном эксперименте сохранилась та же тенденция. Внесение биоугля привело к увеличению $pH_{КС}$ к окончанию инкубирования в варианте СОК на 0.4 ед., в варианте ВОК — на 0.2–0.3 ед. В регулируемых условиях внесение биоугля оказало положительное действие на увеличение ЕКО по сравнению с почвами без биоугля. Во всех вариантах почв с разной влажностью определено достоверное увеличение ЕКО в почвах с биоуглем по сравнению с почвами без биоугля ($p < 0.05$). Увеличение ЕКО к окончанию инкубирования произошло в варианте СОК на 9, в варианте ВОК — на 33%.

Ключевые слова: потенциальная кислотность, емкость катионного обмена, древесный биоуголь, дерново-подзолистая почва, степень окультуренности.

DOI: 10.31857/S0002188121090052

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для улучшения физико-химических свойств почв в качестве мелиоранта предлагают использовать биоуголь. Большинство биоуглей характеризуются щелочной реакцией, ввиду того, что во время карбонизации органического материала из него удаляются кислотные функциональные группы и происходит обогащение солями щелочных и щелочноземельных элементов [1]. Внесение данного продукта в почву рассматривают в качестве одного из способов снижения кислотности почвы. Однако длительность эффекта от разовой процедуры внесения

различных биоуглей в кислые почвы может быть различной и будет зависеть не только от дозы мелиоранта, но и от типа первоначального сырья, способа заделки и исходных почвенных условий.

Показано, что добавки биоугля в образцы песчаной и супесчаной почв в дозах 1–5% от массы снижали кислотность почвенной среды [2, 3]. Зафиксировано изменение величин pH водной и солевой вытяжек в 1.1–1.4 раза по сравнению с контролем в дерново-подзолистой песчаной почве при внесении в нее 2 и 5% биоугля [4]. В ходе краткосрочного вегетационного опыта установлено, что добавление древесного биоугля в коли-

честве 5% к дерново-подзолистой песчаной почве вызывало снижение почвенной кислотности [5]. Таким образом, в данном опыте при внесении биоугля в супесчаную почву в дозе как 5, так и 25 т/га, наблюдали увеличение pH_{KCl} почв. В опыте [6] внесение березового биоугля в дерново-подзолистую супесчаную почву в дозе 1–5% не вызвало значимых изменений в реакции среды и ЕКО. Авторы связали данный факт с тем, что в опыте в почву с нейтральной средой вносили биоуголь с кислой реакцией pH 5.4. В работе [3] отмечали, что эффект подщелачивания полезен для кислых почв, но может оказаться вредным для почв, имеющих нейтральную или слабощелочную реакцию. Повышение величин pH при внесении биоугля щелочной природы в кислые песчаные почвы отмечено в работах [7, 8].

Во многих литературных источниках выявлена тесная корреляционная связь между увеличением pH почвы и дозой биоугля [9]. Ученые обращают внимание, что мелиорирующий эффект “известкования биоуглем” зависит как от его количества, внесенного в почву, так и от исходного состава биомассы, из которой приготовлен биоуголь. Например, в работе [9] показано, что pH почвы изменился интенсивнее при внесении биоугля из соломы бобовых растений, чем биоугля из бобовых культур. Например, pH почвы увеличился на 0.42–0.66 ед. после инкубации кислых почв с 1% биоугля из соломы риса, кукурузы или пшеницы и на 0.95–1.0 ед. при внесении биоугля из вики, сои или люпина.

Продолжительность влияния биоугля на кислотность почв остается предметом дискуссии. Например, в работе [10] отмечено значительное повышение pH почвы сразу после внесения древесного биоугля в почву и постепенное снижение этого показателя через 14 мес. При этом связывали ослабление эффекта известкования биоуглем в последующие годы с постепенным вымыванием щелочных соединений из продукта. Большинство ученых считает, что для нейтрализующего эффекта биоугля наиболее эффективно его вносить в почву каждые 3 года. Находясь в почве, биоуголь, как щелочной мелиорант, начинает менять свои кислотные показатели. Остается открытым вопрос, что происходит с почвенными свойствами при внесении биоугля в почву, и как долго сохраняется его мелиорирующий эффект.

Помимо минералогического и гранулометрического состава почвы, содержание органических веществ и карбоксильных групп оказывает влияние на емкость катионного обмена [11]. Высокая ЕКО означает, что почва может содержать значительное количество катионов, необходимых для роста и развития растений. При низком показате-

ле питательные вещества не связаны частицами гумуса и глины, поэтому легко вымываются в подпахотный слой. ЕКО различных биоуглей зависит от состава биомассы, температуры и скорости пиролиза [12, 13], поэтому сильно варьирует от 5 до 50 ммоль/100 г почвы [14, 15] и может даже достигать величин от 69 до 204 ммоль/100 г почвы [16, 17]. ЕКО в биоугле начинает меняться, когда продукт подвергается воздействию кислорода и воды, через изменение поверхностных функциональных групп оксигенации. Ряд исследований показал, что внесение биоугля увеличивает ЕКО почвы и содержание обменных Ca^{2+} и K^+ , что соответственно улучшает свойства почвы. В опыте [4] для дерново-подзолистой супесчаной почвы также было показано увеличение емкости катионного обмена в 1.1–1.5 раза прямо пропорционально увеличению pH среды. Характер изменения величин pH и ЕКО в тяжелосуглинистой почве имел ту же тенденцию, но она была выражена слабее.

Цель работы — оценка временных изменений кислотности почв и их емкости катионного обмена при внесении биоугля.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре Меньковской опытной станции (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) на дерново-подзолистых супесчаных почвах [18], различавшихся по степени окультуренности: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). Различия в степени окультуренности почв достигнуты внесением в почву в 2003–2005 гг. разных доз навоза крупного рогатого скота: 220 т/га для среднеокультуренной почвы и 540 т/га для высокоокультуренной почвы [19]. Опыт проводили в течение 2019–2020 гг. Схема опыта, варианты: 1 — контроль без биоугля (**К**) и 2 — почва с биоуглем в дозе 20 т/га (**Б**). Почва участков характеризовалась следующими агрохимическими параметрами. Среднеокультуренная почва имела pH_{KCl} 5.3, $C_{орг}$ — 1.53%, $N_{общ}$ — 0.17%, $N-NO_3$ — 16.4, $N-NH_4$ — 5.6 мг/кг почвы, подвижные (по Кирсанову) P_2O_5 — 255, K_2O — 112 мг/кг почвы. Высокоокультуренная почва имела pH_{KCl} 6.4, $C_{орг}$ — 2.92%, $N_{общ}$ — 0.28%, $N-NO_3$ — 22.3, $N-NH_4$ — 6.7 мг/кг почвы, подвижные (по Кирсанову) P_2O_5 — 994, K_2O — 542 мг/кг почвы.

В качестве биоугля использовали древесный уголь из березы сорта Премиум (береза 1-го класса), фракцию с размером частиц угля 0.5–5.0 см. Биоуголь произведен быстрым пиролизом при температуре 600°C. Химический состав биоугля: $C_{орг}$ — 88.9%, $N_{общ}$ — 0.43%, H — 3.2%, O — 5.1%, pH_{H_2O} 8.3, $W_{гв}$ — 3.1%, зольность — 1.8%. В экспе-

рименте использовали фракции биоугля <2 см в диаметре. Биоуголь в дозе 20 т/га вносили в верхний слой 0–10 см почвы. На делянках в 2019 г. в качестве тест-объекта возделывали викоовсяную смесь (вика посевная яровая сорта Львовский (*Vicia sativa* L.) и овес яровой сорта Борпус (*Avena sativa* L.) в соотношении 30 : 70 соответственно) из расчета 200 кг семян/га. В 2020 г. возделывали люпин белый сорт Дега (*Lupinus albus* L.) как сидерат под озимую пшеницу. Отбор почвенных образцов проводили по стандартной методике [20] с помощью почвенного бура из слоя 0–10 см через каждые 10–12 сут с момента закладки эксперимента.

Лабораторный опыт проводили в течение 7 мес. (с мая по декабрь) в регулируемых условиях: в вегетационных сосудах объемом 500 мл, инкубированием в биологическом шкафу при температуре 28°C и при постоянной влажности почвы, поддерживаемой поливом почвы до постоянного веса 3 раза в неделю. Почва для лабораторного эксперимента была отобрана из вариантов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности на Агрофизическом стационаре МОС-АФИ. Время отбора образцов почвы – конец апреля 2019 г. Почву предварительно высушивали при комнатной температуре и просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. В каждый сосуд вносили по 300 г воздушно-сухой почвы. Было задано 3 уровня содержания влаги в почве (табл. 1).

Исследованные почвы характеризовались различной наименьшей влагоемкостью (*НВ*). Поэтому, а также в связи с наблюдаемыми в последние годы в Ленинградской обл. регулярными засухой или переувлажнением почв, приняли решение изучить временную изменчивость основных характеристик почв при различных уровнях содержания влаги. Поддерживали следующие уровни содержания влаги, варианты: 1 – норма, которая соответствовала *НВ* почвы, 2 – ниже нормы, 3 – выше нормы.

В течение 7-ми сут, до внесения биоугля в почву, проводили предварительное инкубирование увлажненных образцов почвы в сосудах с целью достижения равновесного состояния микробного сообщества. Было заложено в каждом варианте 21 сосуд для почв с СОК и ВОК без биоугля и такое же количество для почв с внесением биоугля (всего 84 сосуда). Контрольные варианты без биоугля обозначены *К*, варианты с внесением биоугля – *Б*.

Кислотность почвы и емкость катионного обмена определяли с помощью стандартного метода (ГОСТ 26423-85, ГОСТ 17.4.4.01-84).

Все анализы выполнены в трехкратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ “Microsoft Excel”. Определены средние величины и

Таблица 1. Содержание влаги в почве в течение эксперимента

Почва	W, % от массы		
	Ниже нормы	Норма (<i>НВ</i>)	Выше нормы
СОК	19	21	23
ВОК	22	24	26

Примечание. СОК – среднеокультуренная, ВОК – высокоокультуренная почва. То же в табл. 2, на рис. 1–5.

их стандартные отклонения, корреляции Пирсона, достоверность различий средних при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики pH_{KCl} дерново-подзолистой супесчаной почвы разного качества в 2019 г. показал, что между вариантами почвы с разной степенью окультуренности наблюдали достоверные различия по показателю потенциальной кислотности ($p < 0.05$) в течение вегетационного периода (рис. 1а). В почве варианта СОКК pH_{KCl} варьировал от 5.3 ед. в начале вегетационного периода до 5.2 ед. к его окончанию, а в варианте ВОКК – соответственно от 6.4 до 6.2 ед.

Внесение в почву биоугля, обладавшим высоким pH , составлявшим 8.3 ед., позволило достоверно повысить pH_{KCl} в СОК почве с 5.3 до 5.5 ед., в ВОК почве – от 6.4 до 6.6 ед. Полученные результаты подтвердили мелиорирующую способность биоугля в снижении кислотности почвы, что согласовалось с результатами исследований зарубежных ученых [21, 22]. Улучшение данного показателя почв при использовании биоугля в качестве мелиоранта часто трактуется как один из наиболее эффективных подтвержденных механизмов повышения почвенного плодородия.

Исследование потенциальной кислотности почвы с разной окультуренностью в лабораторном эксперименте согласовались с данными полевого эксперимента (табл. 2). В контролируемых условиях и в отсутствии растительности pH_{KCl} почвы без биоугля снижался от начала инкубации к ее окончанию. Различная влажность почвы не влияла на величину данного показателя. В СОК почве pH_{KCl} варьировал от 5.3 до 5.0, в ВОК почве – от 6.4 до 6.6 ед.

Достоверные различия в величинах pH_{KCl} наблюдали только между вариантами с разной окультуренностью почвы ($p < 0.05$). Внесение биоугля привело к увеличению pH_{KCl} к окончанию инкубирования в варианте СОК на 0.4 ед., в варианте ВОК – на 0.2–0.3 ед.

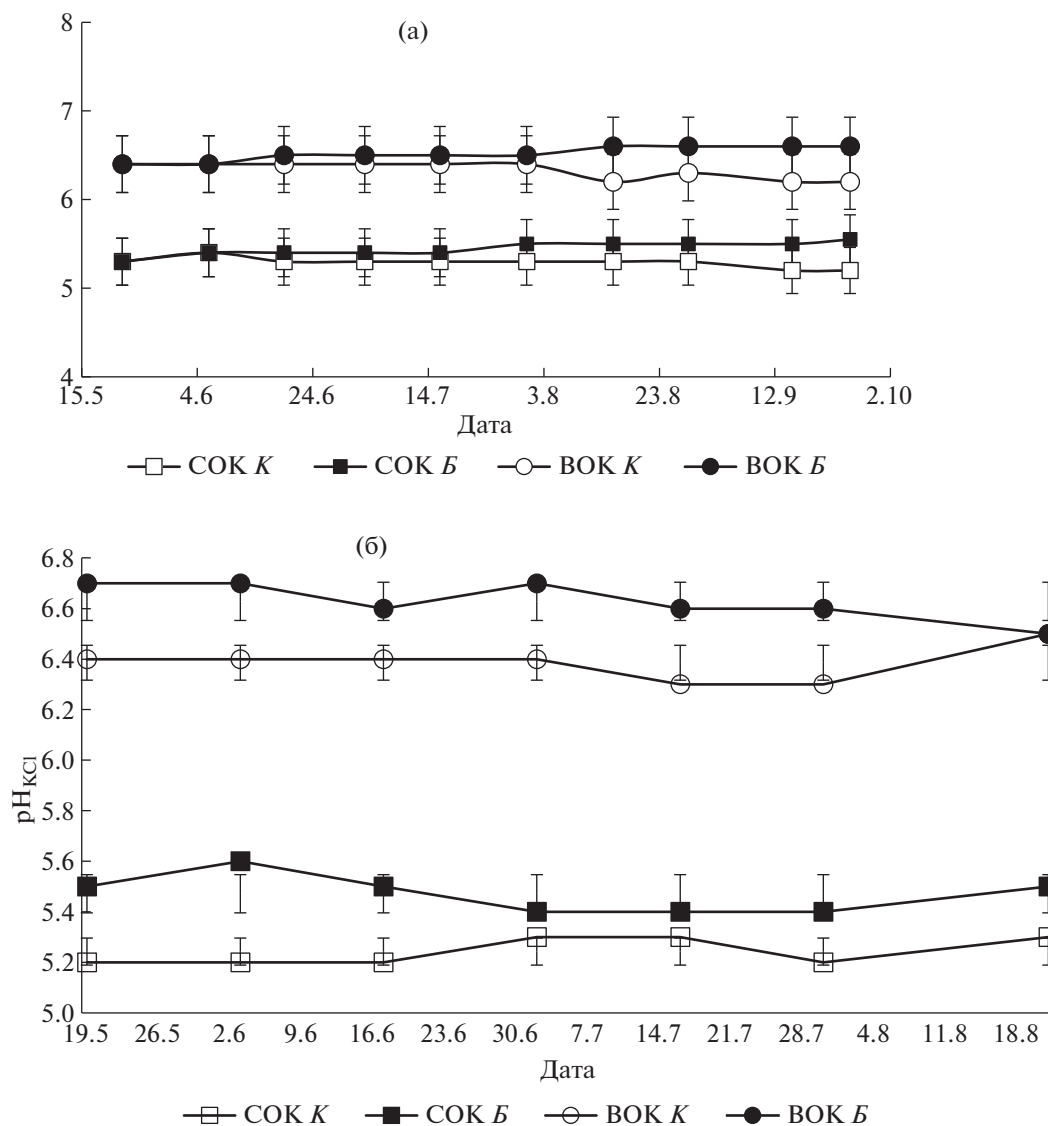


Рис. 1. Динамика pH_{KCl} дерново-подзолистей супесчаной почвы с разной окультуренностью с внесением биоугля и без биоугля (полевой эксперимент): (а) – 2019 г., (б) – 2020 г.

Полевые исследования, проведенные в 2020 г., показали, что между вариантами почвы с различной степенью окультуренности наблюдали достоверные различия по показателю потенциальной кислотности ($p < 0.05$) в течение вегетационного периода (рис. 1б). В почве варианта СОКК данный показатель варьировал от 5.2 ед. в начале вегетационного периода до 5.3 ед. к его окончанию, в почве варианта ВОКК – соответственно от 6.4 до 6.5 ед. Внесение биоугля привело к повышению pH_{KCl} в варианте СОКБ до 5.5 ед., в варианте ВОКБ – до 6.7 ед. в начале периода наблюдений и до 6.5 ед. – в конце.

Полевые исследования 2019 г. показали, что величины емкости катионного обмена СОК почвы достоверно были меньше ($p < 0.05$) в среднем

на 17–20%, чем данный показатель в ВОК почве, что связано с различным содержанием органического вещества и физической глины в сравниваемых почвах. Предположили, что внесение биоугля в почву должно изменить величину емкости катионного обмена, судя по наличию большого количества карбоксильных групп ($-COOH$) в данном мелиоранте, обладающих строгим сродством к ассоциации с катионами при нейтральной реакции, которая наиболее типична для верхних горизонтов дерново-подзолистых почв с высоким содержанием гумуса.

Однако полевые исследования не подтвердили данный факт (рис. 2а). Внесение биоугля в дозе 20 т/га вызвало незначительное увеличение емкости катионного обмена в варианте СОКБ с

9.8 ммоль/100 г в начале вегетационного периода до 10.8 ммоль/100 г к его окончанию. В контрольном варианте СОК ЕКО также практически не изменялась в течение вегетации и варьировала от 10.2 до 9.8 ммоль/100 г.

В почве ВОК емкость катионного обмена незначительно уменьшилась к окончанию вегетационного периода, в контроле с 22.6 до 20.4 ммоль/100 г, в почве с биоуглем с 23.5 до 21.6 ммоль/100 г. Внесение биоугля вызвало незначительное увеличение ЕКО во всех вариантах опыта, в варианте СОК — на 10, в варианте ВОК — на 6%. Возможно, непродолжительное влияние биоугля и изменяющихся погодных условий на ЕКО оказалось недостаточным для ее достоверных изменений.

Результаты лабораторного эксперимента в 2019 г. показали, что почва с ВОК изначально обладала более высокой емкостью катионного обмена, в среднем в 2 раза выше по сравнению с почвой СОК, в связи с большей гумусированностью почвы и реакцией среды. В регулируемых условиях внесение биоугля оказало положительное действие на увеличение ЕКО по сравнению с почвами без биоугля. Во всех вариантах почв с разной влажностью определено достоверное увеличение ЕКО в почвах с биоуглем по сравнению с почвами без биоугля ($p < 0.05$). Также во всех вариантах эксперимента наблюдали одинаковый характер динамики изменения ЕКО, а именно, уменьшение данного показателя от начала инкубации к ее окончанию. Установлено (рис. 3), что емкость катионного обмена СОК почвы в слое 0–10 см уменьшалась в течение эксперимента при 3-х уровнях заданной влажности как в контроле, так и в почве с внесением биоугля, и варьировала от 11.9 до 10.0 ммоль/100 г в почве контрольного варианта и от 13.7 до 10.9 ммоль/100 г в почве с биоуглем.

Такая же тенденция зафиксирована в почве с ВОК. В контрольном варианте данной почвы величины ЕКО снижались от 25.4 до 17.3 ммоль/100 г. В варианте ВОКБ величины емкости катионного обмена варьировали в меньшем диапазоне — от 26 до 23 ммоль/100 г. Максимальные средние величины емкости катионного обмена отмечены в вариантах с наибольшим содержанием влаги в обеих почвах.

Таким образом, в контролируемых условиях наблюдали снижение емкости катионного обмена в процессе инкубирования почвы на 8–20% в СОК почве и на 12–32% в ВОК почве от начала к окончанию периода наблюдений в обоих вариантах. Считается, что емкость катионного обмена строго увеличивается по мере повышения степени окисления биоугля (увеличение отношения $O : C$), его устойчивость к воздействию абиотиче-

Таблица 2. Динамика pH_{KCl} дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной окультуренностью в вариантах с внесением и без внесения биоугля (лабораторный опыт)

Почва	Вариант	Время инкубирования, сут						
		1	30	62	93	122	154	184
СОК	KW19	5.3	5.2	5.2	5.1	5.1	5.0	5.0
	BW19	5.5	5.5	5.6	5.6	5.5	5.5	5.4
	KW21	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.1	5.1
	BW21	5.5	5.5	5.6	5.6	5.6	5.5	5.5
	KW23	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.1
	BW23	5.4	5.5	5.6	5.6	5.6	5.5	5.5
HCP ₀₅		0.4						
ВОК	KW22	6.4	6.4	6.3	6.3	6.3	6.2	6.2
	BW22	6.4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.4
	KW24	6.4	6.4	6.4	6.3	6.3	6.2	6.2
	BW24	6.5	6.5	6.6	6.6	6.6	6.5	6.5
	KW26	6.4	6.4	6.4	6.3	6.3	6.2	6.2
	BW26	6.5	6.5	6.6	6.6	6.6	6.5	6.5
HCP ₀₅		0.5						

Примечание. К — контроль, Б — почва с биоуглем, W — влажность почвы, числа 19, 21, 22, 23, 24, 26 — влажность почвы в %.

ских и биотических факторов уменьшается [23]. Поэтому увеличение емкости катионного обмена и буферной способности биоугля должно происходить только за счет повышения степени окисленности поверхностного слоя угля под воздействием абиотических и биотических факторов. Снижение емкости катионного обмена исследованных почв могло быть обусловлено уменьшением плотности карбоксильных групп на поверхности твердой фазы почвы и биоугля в результате их конденсации или взаимодействия с другими функциональными группами [24].

Внесение биоугля в дозе 20 т/га вызвало увеличение емкости катионного обмена в 2020 г. в СОК почве в среднем на 14% по сравнению с ЕКО почвы в контрольном варианте (рис. 2б). Внесение биоугля в ВОК почву вызвало увеличение данного показателя на 18.5%. Известно, что в реакциях катионного обмена почвенный поглощающий комплекс проявляет себя как анион кислотной природы. На его поверхности существуют сильно-кислотные и слабокислотные обменные позиции, определяемые по гетерополярному (ионному) и ковалентному (полярному) связыванию обменно-адсорбируемых водородных ионов. Внесение биоугля определяет освобождение мест обмена в ППК, блокированных ранее алюминием, и является следствием его осаждения в виде нерастворимых гидроксидов и вовлечением в реакции об-

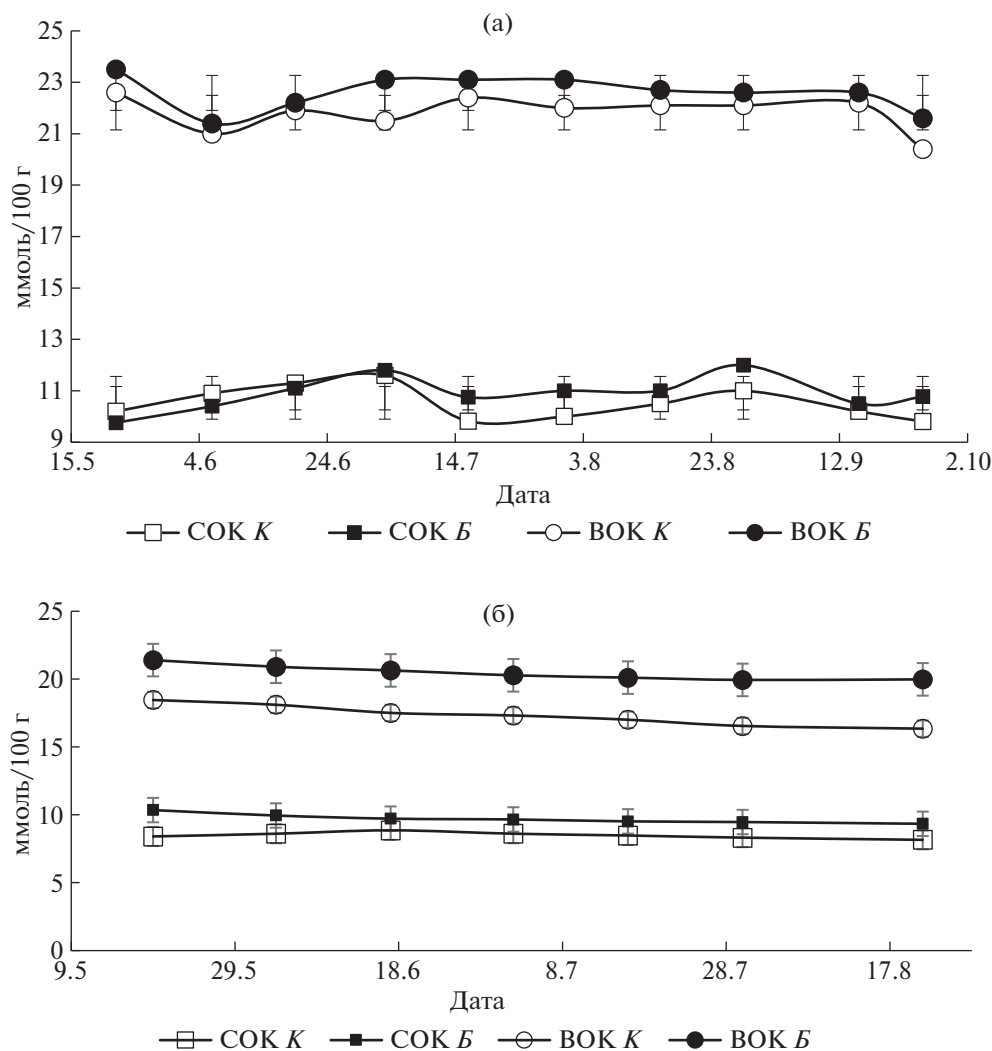


Рис. 2. Изменение ЕКО дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной окультуренностью с биоуглем и без биоугля (полевой эксперимент): (а) – 2019 г., (б) – 2020 г.

мена карбоксильных и отчасти гидроксильных групп гумусовых веществ.

В 2020 г. средние величины емкости катионного обмена СОК почвы были достоверно ниже ($p < 0.05$) в 2 раза, чем данный показатель в ВОК почве, что связано с различным содержанием органического вещества, карбоксильных групп и физической глины в сравниваемых почвах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесный биоуголь, внесенный в почвы из расчета 20 т/га, не оказывал существенного влияния на изменение кислотности, как в среднеокультуренной (СОК) почве, так и в высокоокультуренной (ВОК). Прослежен тренд снижения кислотности на 0.2–0.3 ед. pH, соответственно в вариантах с различной степенью окультуренности.

Полевые исследования 2020 г. показали, что величины ЕКО в изученных почвах по сравнению с 2019 г. снизились: в почве контрольных вариантов на 19–20, в вариантах с биоуглем – на 11%. Внесение биоугля в почву способствовало повышению емкости катионного обмена почвы в среднеокультуренной почве на 14.0, в высокоокультуренной – на 18.5% по истечении 2-х лет. Корреляционный анализ выявил в полевом опыте 2019 г. среднюю положительную связь между величинами pH_{KCl} и ЕКО для среднеокультуренной почвы ($r = 0.40–0.44$). В опыте 2020 г. зафиксировали среднюю положительную связь между величинами pH_{KCl} и ЕКО в вариантах с биоуглем ($r = 0.47–0.68$), при этом данная связь была теснее для высокоокультуренной почвы. Двухфакторный дисперсионный анализ выявил в полевом эксперименте 2019 г. преимущественное положительное влия-

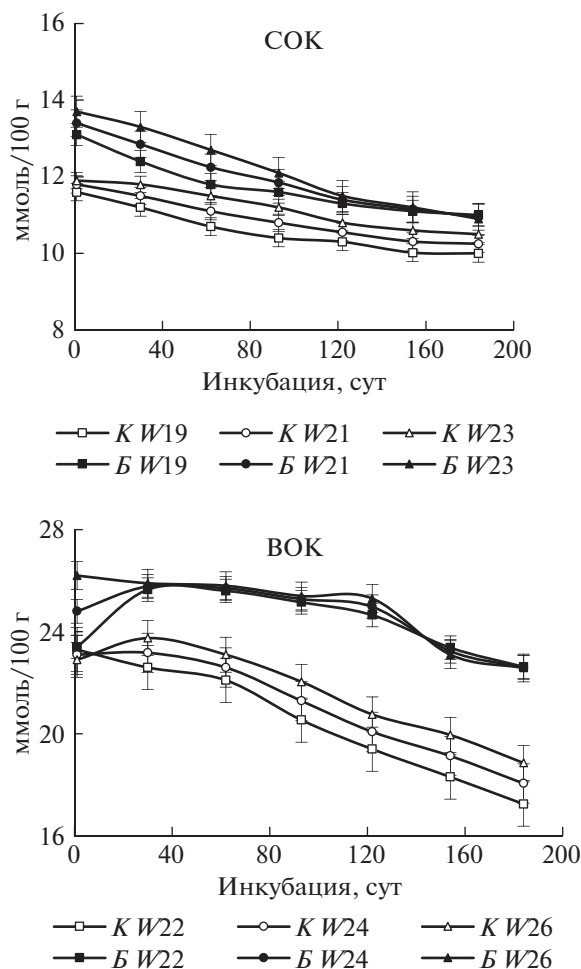


Рис. 3. Изменение емкости катионного обмена (лабораторный опыт) дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной окультуренностью при различной влажности почвы (2019 г.).

ние на величины pH_{KCl} и ЕКО степени окультуренности почвы, $F_{факт} > F_{крит}$ ($4946.77 > 161.45$ для pH_{KCl} , $3468.9 > 161.45$ для ЕКО при $p < 0.01$). В полевом эксперименте 2020 г. зафиксировано положительное влияние на изменение pH_{KCl} почвы 2-х факторов: дозы органических удобрений и внесения биоугля ($F_{факт} > F_{крит}$). Однако степень окультуренности оказала большее влияние на изменение pH_{KCl} , чем внесение биоугля ($53361 > 161.45$ для pH , при $p < 0.002$ и $2209 > 161.45$ для pH_{KCl} , при $p < 0.01$ соответственно). Влияние степени окультуренности почвы и внесения биоугля на ЕКО в 2020 г. не выявили.

Внесение биоугля в лабораторном эксперименте привело к увеличению pH_{KCl} к окончанию инкубирования в варианте СОК на 0.4 ед., в варианте ВОК — на 0.2–0.3 ед. В регулируемых условиях внесение биоугля оказало положительное

действие на увеличение ЕКО по сравнению с почвами без биоугля. Во всех вариантах почв с разной влажностью показано достоверное увеличение ЕКО в почвах с биоуглем по сравнению с почвами без биоугля ($p < 0.05$). Увеличение ЕКО к окончанию инкубирования произошло в варианте СОК на 9, в варианте ВОК — на 33%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fuertes A.B., Camps-Arbestain M., Sevilla M., Maciá-Agulló J.A., Fiol S., López R., Smernik R.J., Aitkenhead W.P., Arce F., Macías F.* Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover // *Soil Res.* 2010. V. 48. P. 618–626.
2. *Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А.* Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // *Труды Карел. НЦ РАН.* 2020. № 3. С. 31–44. <https://doi.org/10.17076/eb1087>
3. *Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Иванова Т.Г., Попеня М.В., Войникова Е.В.* Характеристики дерново-подзолистых почв после внесения биоугля // *Изв. НАН Беларуси. Сер. хим. науки.* 2015. № 2. С. 87–94.
4. *Дубровина И.А.* Динамика физико-химических свойств дерново-подзолистых почв при внесении биоугля // *Пробл. агрохим. и экол.* 2019. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.26178/AE.2019.51.56.004>
5. *Дурова А.С., Жигунов А.В.* Влияние биоугля на показатели плодородия почв и рост сеянцев ели в посевных отделениях лесных питомников // *Изв. СПб. лесотехн. акад.* 2018. Вып. 223. С. 140–153. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.223.140-153>
6. *Григорьян Б.Р., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Сунгатулина Л.М., Кольцова Т.Г., Рязанов С.С.* Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // *Вестн. техн. ун-та.* 2016. Т. 19. № 11. С. 185–189.
7. *Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // *Агрохимия.* 2016. № 9. С. 46–53.
8. *Дубровина И.А.* Пролонгированное влияние биоугля на агрохимические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Мат-лы Международ. научн. семинара “Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду”.* АФИ, С.-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г. СПб.: АФИ, 2020. С. 28–30.
9. *Yuan J.H., Xu R.K., Zhang H.* The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures // *Biores. Technol.* 2011. V. 102. P. 3488–3497.
10. *Cornelissen G., Nurida N.L., Hale S.E., Martinsen V., Silvani L., Mulder J.* Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons

- in an Indonesian Ultisol // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 634. P. 561–568.
11. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 326 с.
 12. Budai A., Wang L., Gronli M., Strand L.T., Antal M.J., Abiven S. Surface properties and chemical composition of corncob and miscanthus biochars: effects of production temperature and method // *J. Agric. Food Chem.* 2014. V. 62. P. 3791–3799.
 13. Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.-M., Dallmeyer I., Garcia-Perez M. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties // *Biomass and Bioenergy.* 2016. V. 84. P. 37–48.
 14. Agegnehu G., Bass A.M., Nelson P.N., Bird M.I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 543. P. 295–306.
 15. Berek A.K., Hue N.V. Characterization of biochars and their use as an amendment to acid soils // *Soil Sci.* 2016. V. 181. P. 412–426.
 16. Lou Y., Joseph S., Li L., Graber E.R., Liu X., Pan G. Water extract from straw biochar used for plant growth promotion // *Initial Test. Biores.* 2016. V. 11. P. 249–266.
 17. Pandit N.R., Mulder J., Hale S.E., Martinsen V., Schmidt H.P., Cornelissen G. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 625. P. 1380–1389.
 18. Моисеев К.Г., Гончаров В.Д., Зинчук Е.Г., Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Гуринов П.Д., Старцев А.С., Пищик В.Н. База данных почвенного покрова Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии (структура почвенного покрова, геоморфологическое строение, физические и геохимические свойства почв). Свид-во о регистрации базы данных RU2013620682. Заяв. № 2013620301 от 22.03.2013.
 19. Оленченко Е.А., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистого супесчаного почв на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // *Агрофизика.* 2012. № 4. С. 8–18.
 20. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
 21. Ajayi A.E., Horn R. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar // *Soil Till. Res.* 2016. V. 164. P. 34–44.
 22. Glaser B., Lehmann J., Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review // *Biol. Fertil. Soils.* 2002. V. 35. № 4. P. 219–230.
 23. Spokas K.A., Novak J.M., Stewart C.E., Cantrell K.B., Uchimiya M., DuSaire M.G., Ro K.S. Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar // *Chemosphere.* 2011. V. 85. № 5. P. 869–882.
 24. Bakshi S., Aller D.M., Laird D.A., Chintala R. Comparison of the physical and chemical properties of laboratory and field-aged biochars // *J. Environ. Qual.* 2016. V. 45. № 5. P. 1627–1634.

Dynamics of Acidity and Cation Exchange Capacity in Sandy Loam Sod–Podzolic Soil after Application of Biochar

L. V. Boitsova^{a, #}, E. Y. Rizhiya^{a, b}, and V. I. Dubovitskaya^a

^a Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia

^b Russian State Hydrometeorological University
Voronezhskaya ul. 79, St. Petersburg 192007, Russia

[#]E-mail: larisa30.05@mail.ru

In a two-year vegetation-field experiment and a 7-month laboratory experiment, applying biochar at a dose of 20 t/ha into sod-podzolic soils with different soil fertility (medium soil fertility and high soil fertility) on the values of acidity and cation exchange capacity were studied. The vegetation-field experiment was established at the Agrophysical Station MOS-AFI (Leningrad region). Experiment scheme: control (without biochar) and soil with biochar at a dose of 20 t/ha. A laboratory experiment with soils selected from the field experiment was carried out for 7 months in growing vessels with a volume of 500 ml, incubating in a biological safety cabinet at a temperature of 28°C at constant soil moisture. The purpose of the experiments is to assess the temporal changes in soil acidity and their cation exchange capacity upon introducing biochar. Application of wood biochar into the soil at a 20 t/ha dose did not significantly affect the change in soil acidity, both in the soils with medium (MF) and high fertility (HF). There was only a trend towards a decrease in potential acidity by 0.2–0.3 units. After two years of biochar application to the soils, an increase in the soil's cation exchange with MF by 14.0 and with HF by 18.5% was found. In a laboratory experiment, the same trend persisted. The incorporation of biochar led to increased pH_{KCl} by the end of incubation in the soil with medium fertility by 0.4 units, in the high fertility by 0.2–0.3 units. Under controlled conditions, biochar's application positively affected increasing CEC compared to soils without biochar. In all variants of soils with different moisture content, a significant increase in CEC was determined in soils with biochar compared to soils without biochar ($p < 0.05$). An increase in CEC by the end of incubation occurred in the soil with medium fertility by 9, in the soil with high fertility – by 33%.

Key words: potential acidity, cation exchange capacity, woody biochar, Sod-podzolic soil, soil fertility.

УДК 631.87:633.1:631.445.24:631.459

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ МИКРОБНОЙ КОМПОЗИЦИИ В ПОСЕВАХ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ЭРОДИРОВАННЫХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВАХ

© 2021 г. Н. А. Михайловская¹, Д. В. Войтка^{2,*}, Н. Н. Цыбулько¹,
Т. Б. Барашенко¹, С. В. Дюсова¹

¹ Институт почвоведения и агрохимии
220108 Минск, ул. Казинца, 90, Беларусь

² Институт защиты растений
223011 Прилуки, ул. Мира, 2, Беларусь

*E-mail: bionf1@yandex.ru

**E-mail: d.voitka@tut.by

Поступила в редакцию 31.03.2021 г.

После доработки 13.04.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

В Центральной почвенной провинции Беларуси в длительном стационарном опыте “Стоковые площадки” на дерново-подзолистой суглинистой почве, в разной степени подверженной водно-эрозионной деградации, изучена эффективность трехкомпонентной микробной композиции *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum*. Установлено, что микробная композиция (МК) сочетает свойства биоудобрения, регулятора роста и биофунгицида. Ее применение для обработки посевов озимых зерновых культур стимулирует развитие корней, формирование продуктивных стеблей, увеличивает число и массу семян в колосе. МК обеспечивает эффективный биологический контроль корневых фитопатогенов в течение вегетации с биологической эффективностью в пределах 50.2–75.2% по почвенно-эрозионной катене. Синергетическое действие бактериальных и грибного компонентов МК способствует адаптации озимых зерновых культур в стрессовых условиях и обеспечивает прибавки урожайности зерна от 4.8 до 9.3%. Компоненты МК влияют на метаболизм растений и активизируют процессы ассимиляции азота, обеспечивая повышение его содержания в зерне озимых зерновых культур. Отмечена тенденция к повышению эффективности МК на эродированных почвах.

Ключевые слова: микробная композиция, *A. brasilense*, *B. circulans*, *T. longibrachiatum*, эродированные дерново-подзолистые суглинистые почвы, озимые зерновые культуры, стимуляция роста, биологический контроль корневой гнили, адаптация.

DOI: 10.31857/S000218812109009X

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы экологизации возделывания зерновых культур на эродированных почвах актуальны для Беларуси, где такие почвы приурочены преимущественно к пахотным землям и составляют 9.4% от общей площади пашни [1]. Перспективным приемом экологизации является применение микробных средств разного назначения, позволяющих активизировать биологические механизмы регуляции роста, минерального питания и защиты растений. Результаты исследований, проведенных с однокомпонентными бактериальными удобрениями, азобактерином и калиплантом, в полевых опытах на эродированных дерно-

во-подзолистых суглинистых почвах, свидетельствовали о существенном стимулирующем действии азотфиксирующих и калиймобилизующих бактерий на продуктивный статус зерновых культур [2–4]. Входящие в состав бактериальных удобрений ризобактерии влияют на метаболизм растений, оказывают гормональный эффект, при дефиците элементов питания активизируют микробную мобилизацию калия, фосфора, фиксацию азота из атмосферы, что способствует повышению продуктивности растений [4–6].

Современным приемом повышения эффективности микробных препаратов является создание многокомпонентных композиций, включаю-

щих микроорганизмы с разными полезными свойствами для полифункционального воздействия на растения. Такой прием биологически обоснован, экологически приемлем и экономически целесообразен.

Принимая во внимание значимость и синергизм азотного и калийного питания зерновых культур, целесообразно совместное применение азотфиксирующих и калиймобилизующих бактерий. Важнейшим условием повышения эффективности микробных препаратов является включение в их состав активных агентов биологического контроля фитопатогенов, способных обеспечить эффективную биологическую защиту от корневых инфекций, которые приводят к значительному снижению урожайности зерновых культур на эродированных почвах. Этот вопрос приобретает особую актуальность при возделывании озимых зерновых культур, подверженных заболеваниям в осенний, зимний и ранневесенний периоды. Наиболее перспективным компонентом для обеспечения эффективного биологического контроля корневых фитопатогенов являются грибы-антагонисты р. *Trichoderma*.

Для экологизации возделывания зерновых культур в эрозионных агроландшафтах создана трехкомпонентная микробная композиция (МК), включающая бактерии *Azospirillum brasilense*, *Bacillus circulans* и гриб-антагонист *Trichoderma longibrachiatum*. Компоненты микробной композиции характеризуются широким спектром приспособительных свойств — гормональным эффектом, азотфиксацией, калиймобилизацией, растворением фосфатов, биологическим контролем фитопатогенов, что способствует их разностороннему положительному влиянию на растения.

Цель работы — изучение эффективности трехкомпонентной микробной композиции *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* в посевах озимых зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила трехкомпонентная микробная композиция, включающая азотфиксирующие ризобактерии *Azospirillum brasilense* Tarrand, Krieg & Döbereiner 2(в)3, калиймобилизующие ризобактерии *Bacillus circulans* Jordan K-81 и гриб-антагонист *Trichoderma longibrachiatum* L-7 из коллекционных фондов Института почвоведения и агрохимии и Института защиты растений НАН Беларуси.

Азотфиксирующие бактерии *A. brasilense* 2(в)3 отличаются многообразием метаболизма азота,

осуществляют все реакции цикла азота, исключая нитрификацию, при дефиците доступного азота проявляют высокую активность азотфиксации, способны растворять трехзамещенные фосфаты кальция. Штамм положителен по нитратредуктазе. Среди представителей *Azospirillum* spp. наиболее активными стимуляторами роста считаются *A. brasilense* [5–7].

Калиймобилизующие бактерии *B. circulans* K-81 характеризуются способностью повышать подвижность запасов почвенного калия за счет его мобилизации из труднодоступных форм, в том числе из калийсодержащих минералов — мусковита, гидромусковита и биотита [8], оказывают значимое гормональное действие на растения. К преимуществам штамма относится способность к растворению ортофосфатов кальция, что может обеспечивать растения физиологическими количествами фосфора [7].

Гриб *T. longibrachiatum* L-7 проявляет высокую антагонистическую активность по отношению к основным возбудителям фузариозной гнили и других корневых инфекций зерновых культур — *F. culmorum* (66.5–75.0%), *F. poae* (73.7–100%), *F. oxysporum* (64.5–100%), *F. solani* (64.9–71.0%), *A. alternata* (68.4–100%), *B. sorokiniana* (71.7–86.2%), *Sclerotinia* sp. (59.8–100%). Штамм характеризуется комплексной антагонистической активностью по отношению к фитопатогенам, включающей антибиотический, территориальный и гиперпаразитический антагонизм.

Исследования включали постановку *in vitro* экспериментов и проведение стационарного полевого опыта “Стоковые площадки”.

Влияние ризобактерий на биометрические показатели тест-культуры пшеницы яровой (in vitro). Стимулирующее действие ризобактерий изучали на проростках яровой пшеницы сорта Тома с применением метода рулонов в соответствии с ГОСТ 12044-93 [9]. Семена пшеницы предварительно калибровали по размеру и выполненности. Поверхностную стерилизацию семян проводили 10%-ным раствором H_2O_2 в течение 30 мин с последующим отмыванием стерильной водой. Стерильные семена обрабатывали по схеме: 1 — контроль, без поверхностной стерилизации и без инокуляции, 2 — поверхностная стерилизация семян без инокуляции, 3) инокуляция семян *A. brasilense*, 4 — инокуляция семян *B. circulans*, 4 — инокуляция семян *A. brasilense* + *B. circulans*. Обработанные семена в течение 1 ч выдерживали на качалке при 160 об./мин и $T = 22^\circ C$. На полосу полиэтиленовой пленки (10 × 55 см) накладывали равную по размеру полосу фильтровальной бума-

Таблица 1. Характеристика почвы полевого стационара и гидротермических условий периода исследования

Годы исследования	Гумус, % (ГОСТ 26213-91)	рН _{KCl} (ГОСТ 26483-85)	(ГОСТ 26207-91), мг/кг		ГТК (по Селянинову)
			P ₂ O ₅	K ₂ O	
2018 г. (стоковая площадка 8)	1.8–2.1	5.4–5.8	360–428	233–300	1.66
2019 (стоковая площадка 7)	2.1–2.2	5.2–5.3	359–434	248–321	1.49
2020 (стоковая площадка 8)	1.8–2.0	5.3–5.5	366–415	231–357	1.95

ги, увлажненную до полной влагоемкости. Обработанные семена раскладывали на фильтровальную бумагу, соблюдая интервал 1–2 см, затем закрывали такой же полосой фильтровальной бумаги, сворачивали в рулоны и устанавливали вертикально в химические стаканы. Экспозиция при $T = 22–25^{\circ}\text{C}$ в течение 7-ми сут. Определяли всхожесть семян и их морфометрические характеристики – длину, количество и сухую массу корней, длину и сухую массу проростков.

Влияние концентрации культуральной жидкости гриба T. longibrachiatum на рост и развитие тест-культуры салата листового (in vitro). Семена тест-культуры – салата листового сорта сорта Афицион – проращивали в чашках Петри на фильтровальной бумаге, пропитанной культуральной жидкостью (КЖ) гриба *T. longibrachiatum* L-7 различных концентраций: 10.0, 4.0, 2.0, 1.0, 0.1%. Экспозиция происходила при $T = 22^{\circ}\text{C}$ в течение 5-ти сут. В ходе эксперимента определяли следующие показатели: энергию прорастания семян (на 2-е сут), всхожесть семян, длину надземной части проростков и корневой системы (на 5-е сут).

Полевой стационар “Стоковые площадки”. Изучение эффективности микробной композиции *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* проведено в полевом стационаре “Стоковые площадки” на эродированных дерново-подзолистых почвах, сформированных на мощных лессовидных суглинках в Центральной почвенно-экологической провинции (СПК “Щомыслица”, Минский р-н). Стационар заложен по геоморфологическому профилю от водораздельной равнины до подножия склона северной экспозиции ($5–6^{\circ}$). Агрохимические свойства пахотного слоя почвы и условия вегетации растений представлены в табл. 1.

Эффективность обработки посевов микробной композицией изучали на озимых зерновых культурах – ржи озимой (*Secale cereale* L.) сорта Пламя (2018 г.) и тритикале озимом (*Triticosekale*) сорта Динаро (2019–2020 гг.). Фон минеральных

удобрений под рожь и тритикале – N90+30P50K100. Фосфорные (АФ) и калийные (К_x) удобрения применяли для основного внесения, азотные (N_m) – для основного внесения и подкормки. Повторность в стационарном опыте трехкратная. Общая площадь делянки 22 м² (2.2 × 10 м), учетная – 20 м² (2.0 × 10 м).

Способ применения микробной композиции – обработка посевов весной в фазе кушения озимых зерновых культур. Рабочую жидкость готовили непосредственно перед применением, соотношение компонентов 1 : 1 : 1. Концентрация рабочей жидкости – 5.0% при следующих титрах компонентов: *A. brasilense* – 1.0–2.0 × 10⁹ КОЕ/мл, *B. circulans* – 1.0–2.0 × 10⁹ КОЕ/мл *T. longibrachiatum* – 1.1 × 10⁹ спор/мл.

Показатели продукционного процесса оценивали в фазе восковой спелости тритикале озимого в 2019–2020 гг.

Оценка фитопатологического состояния посевов. Растительные образцы для учета распространности и развития корневой гнили в посевах ржи озимой отбирали в фазе молочной спелости (2018 г.), в посевах тритикале озимого – в фазе цветения (2019 г.) и в фазе колошения (2020 г.). Распространенность болезни (*P*, % пораженных растений) рассчитывали по формуле: $P = (n \times 100) : N$, где *n* – количество больных растений в пробах (экз.), *N* – общее количество растений в пробах (экз.). Развитие болезни (*R*, %) рассчитывали по формуле: $R = (\sum ab \times 100) : (N \times k)$, где *ab* – произведение числа растений (*a*) на соответствующий балл поражения (*b*), *N* – количество взятых для учета растений (экз.), *k* – наивысший балл шкалы оценки поражения корневой системы в варианте опыта. Биологическую эффективность (БЭ, %) рассчитывали по показателю развития болезни или степени поражения по формуле: $БЭ = (П_k - П_0) \times 100 : П_k$, где *П_k* – процент развития или степень поражения растений в контроле, *П₀* – процент развития или степень поражения в варианте опы-

Таблица 2. Влияние *A. brasilense* и *B. circulans* на биометрические показатели проростков пшеницы (*in vitro*, 2017 г.)

Вариант	Число корней		Суммарная длина корней 1 растения		Сухая масса корней		Средняя длина проростка		Сухая масса наземной части, г	
	шт.	%	см	%	г	%	см	%	г	%
Контроль	4.43	%	32.8	100	0.25	100	8.7	100	0.18	100
Поверхностная стерилизация	4.61	100	34.6	105	0.27	108	9.2	106	0.20	111
<i>A. brasilense</i>	4.83	104	40.2	123	0.31	124	10.3	118	0.24	133
<i>B. circulans</i>	4.82	109	40.6	124	0.29	116	10.1	116	0.22	122
<i>A. brasilense</i> + + <i>B. circulans</i>	4.88	109	41.0	125	0.32	128	10.5	121	0.24	133
<i>HCP</i> ₀₅	0.16	110	2.1		0.05		0.3		0.04	

Примечание. Титры *A. brasilense* и *B. circulans* – 1.2×10^7 КОЕ/мл.

та [10]. Балльная шкала оценки степени пораженности корневой системы растений: отсутствие поражения – 0, поражение до 1/3 корневой системы – 1, поражение от 1/3 до 2/3 корневой системы – 2, поражение >2/3 корневой системы – 3.

Учет урожайности зерновых культур производили поделочно. Содержание элементов питания в зерне определяли методом ИК-спектроскопии (NIR Systems 4500). Для статистической обработки результатов применяли дисперсионный анализ и MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние ризобактерий на морфометрические показатели проростков (in vitro). По результатам эксперимента, наиболее значимый гормональный эффект отмечен при совместном применении азотфиксирующих и калиймобилизующих бактерий *A. brasilense* + *B. circulans* для инокуляции семян: стимуляция длины проростка составила 21, суммарной длины корней одного растения – 25, числа корней – 10, сухой массы корней – 28, сухой массы надземной части – 33% (табл. 2). За счет инокуляции семян *A. brasilense* средняя длина проростков пшеницы увеличилась на 18, суммарная длина корней/растение – на 23, число корней – на 9, сухая масса корней – на 24, сухая масса надземной части – на 33%, при инокуляции семян *B. circulans* – на 16, 24, 9, 16 и 22% соответственно.

Полученные данные показали значительный потенциал ризобактерий *A. brasilense* и *B. circulans* по повышению адаптивных возможностей растений, в особенности при совместном применении. Гормональный эффект часто признается определяющим фактором воздействия азоспирилл на растения [5, 6, 11, 12]. Выраженное гормональное

действие свидетельствовало о перспективности изученных ризобактерий в качестве составных элементов микробной композиции. Следует отметить, что ризобактерии вызывают не только морфологические изменения, увеличивающие поглощающую поверхность, но и физиологические изменения в корнях. Под влиянием азоспирилл происходит снижение активности окислительных ферментов в корнях и повышается скорость усвоения нитратов, калия, фосфатов и воды [13, 14].

Влияние гриба-антагониста на посевные качества и морфометрические показатели проростков (in vitro). В ходе эксперимента фиксировали энергию прорастания, всхожесть, длину надземной части проростков и корня. При использовании 2.0 и 1.0% КЖ отмечено повышение энергии прорастания на 11.3 и 11.0, всхожести – на 8.7% соответственно по сравнению с контролем. Это свидетельствовало о том, что КЖ в указанных концентрациях оказывала стимулирующее действие, которое проявлялось в увеличении длины проростков на 14.3 и 15.4 и длины корня на 26.9 и 31.5% соответственно. По результатам исследований, целесообразно применение 1.0%-ного КЖ в качестве рабочей концентрации грибного компонента МК – *T. longibrachiatum* L-7. При использовании 4.0- и 10.0%-ной концентраций культуральной жидкости *T. longibrachiatum* L-7 отметили среднюю и высокую степень фитотоксичности (табл. 3).

Влияние трехкомпонентной микробной композиции (МК) на показатели продукционного процесса тритикале озимого Динаро. В полевом стационаре “Стоковые площадки” на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах изучено влияние трехкомпонентной МК на густоту продуктивного стеблестоя, число и массу семян в ко-

Таблица 3. Влияние концентрации культуральной жидкости (КЖ) гриба *T. longibrachiatum* L-7 на посевные качества и морфометрические показатели проростков салата листового сорта Афицион

Концентрация КЖ	Энергия прорастания	Всхожесть	Длина корня	Длина проростка
	%		мм	
Контроль (вода)	86.7	89.3	13.0 ± 1.1	27.3 ± 2.3
0.1	82.0	89.7	15.2 ± 0.6	27.2 ± 1.3
1.0	97.7	98.0	17.1 ± 1.3	31.5 ± 1.8
2.0	98.0	98.0	16.5 ± 1.1	31.2 ± 1.7
4.0	47.3	49.5	8.4 ± 0.7	22.0 ± 1.9
10	26.7	28.0	7.8 ± 1.4	17.4 ± 3.0

Примечание. Культуральная жидкость — 1.1×10^9 спор/мл.

Таблица 4. Влияние микробной композиции (МК) на показатели продукционного процесса тритикале озимого сорта Динаро (“Стоковые площадки”, 2019–2020 гг.)

Степень эродированности почвы	Вариант	Число продуктивных стеблей, шт./м ²	Число семян в колосе, шт.	Масса семян в колосе, г
Неэродированная	Контроль	554	33.8	1.21
	МК	559	34.6	1.28
Слабоэродированная	Контроль	538	33.9	1.19
	МК	556	34.8	1.26
Среднеэродированная	Контроль	511	33.4	1.16
	МК	540	34.2	1.23
<i>HCP</i> ₀₅ А (почва)		15	0.5	0.04
В (инокуляция)		19	0.6	0.05

лосе. По средним данным за 2019–2020 гг., обработка посевов МК обеспечивала число продуктивных стеблей — 540–559 шт./м², число семян в колосе — 34.2–34.8 шт., массу колоса — 1.23–1.28 г на неэродированной, слабо- и среднеэродированных почвах. В контрольных вариантах без инокуляции посевов получены следующие данные: число продуктивных стеблей — 511–554 шт./м², число семян в колосе — 33.4–33.9 шт., масса колоса — 1.16–1.21 г. В полевых условиях применение микробной композиции также способствовало улучшению показателей продукционного процесса тритикале озимого (табл. 4).

Влияние микробной композиции на фитопатологическое состояние посевов озимых зерновых культур. Внесение трехкомпонентной микробной композиции путем обработки посевов снижало интенсивность патологического процесса и поражаемость озимых зерновых культур корневой гнилью в течение всего периода вегетации.

При оценке пораженности посевов ржи озимой сорта Пламя в фазе молочной спелости снижение распространенности корневой гнили со-

ставляло 45.0, 42.4 и 42.9%, развития болезни — в 2.6, 2.1 и 2.0 раза на неэродированной, слабо- и среднеэродированной почвах соответственно. Биологическая эффективность МК варьировала в пределах 50.2–61.2% по почвенно-эрозионной катене (табл. 5).

В посевах тритикале озимого сорта Динаро микробная композиция *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* также обеспечивала значимый эффект в качестве биофунгицида. В 2019 г. при оценке фитопатологического состояния посевов в фазе цветения установлено снижение развития болезни в 3.9, в 3.1 и 2.7 раза. При этом распространенность корневой инфекции была меньше контроля на 21.2, 25.5 и 20.0% на неэродированной, слабо- и среднеэродированной почвах соответственно. Биологическая эффективность МК составила 63.0–74.0% по почвенно-эрозионной катене. По результатам оценки состояния посевов в фазе колошения тритикале озимого (2020 г.), распространенность корневой гнили снижалась на 20, 25 и 21.4%, развитие болезни — в 4.0, 3.9 и 3.3 раза на водоразделе, слабо- и среднеэродированной почвах. Показатели биологической эф-

Таблица 5. Влияние микробной композиции (МК) на развитие и распространенность корневой гнили озимых зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах (“Стоковые площадки”, 2018–2020 гг.)

Степень эродированности почвы	Вариант	Рожь озимая 2018 г. (молочная спелость)			Тритикале озимое					
					2019 г. (цветение)			2020 г. (колошение)		
		<i>P</i>	<i>R</i>	БЭ	<i>P</i>	<i>R</i>	БЭ	<i>P</i>	<i>R</i>	БЭ
		%								
Неэродированная	Контроль	73.3	18.3	—	35.0	18.1	—	30.0	12.5	—
	МК	28.3	7.1	61.2	13.8	4.7	74.0	10.0	3.1	75.2
Слабо-эродированная	Контроль	80.9	20.2	—	43.8	21.9	—	38.8	15.6	—
	МК	38.5	9.6	52.5	18.3	7.0	68.0	13.8	4.1	73.7
Средне-эродированная	Контроль	85.3	21.3	—	42.5	21.9	—	32.5	12.5	—
	МК	42.4	10.6	50.2	22.5	8.1	63.0	11.1	3.8	69.6

Примечание. *P* – развитие болезни (%), *R* – распространенность болезни (%), БЭ – биологическая эффективность (%).

эффективности МК композиции в вариантах опыта были в пределах 69.6–75.2%.

Результаты исследования 2018–2020 гг. свидетельствовали о высоком потенциале микробной композиции *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* в качестве биологического фунгицида на разных этапах развития озимых зерновых культур в течение вегетации.

Влияние микробной композиции на урожайность озимых зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах. Значимое стимулирующее действие микробной композиции *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* на развитие растений, продукционный процесс и ее высокая эффективность в качестве биофунгицида обеспечивали повышение урожайности озимых зерновых культур. Синергетический эффект

бактериальных (*A. brasilense* + *B. circulans*) и грибного (*T. longibrachiatum*) компонентов микробной композиции приводил к повышению адаптивных возможностей и продуктивного статуса озимых зерновых культур, что наиболее заметно проявлялось в условиях стресса. По результатам трехлетних исследований можно отметить тенденцию к повышению эффективности МК на среднеэродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах (рис. 1).

При возделывании ржи озимой сорта Пламя прибавки урожайности достигали 3.8, 3.8, 4.5 ц/га (7.0, 7.4, 9.8%) при урожайности в контроле 57.8, 55.1 и 50.6 ц/га по почвенно-эрозионной катене.

В течение 2-х лет изучали эффективность МК в посевах тритикале озимого сорта Динаро. В среднем за 2019–2020 гг. эффективность при-

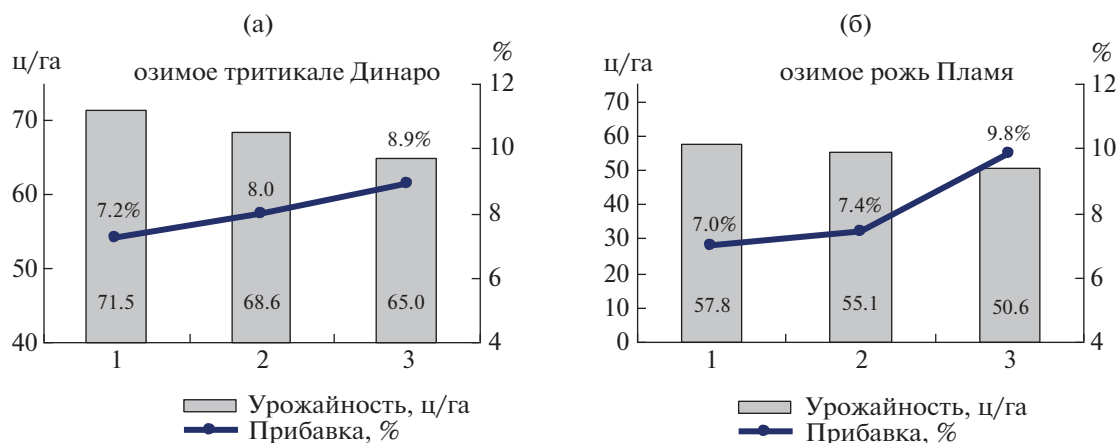


Рис. 1. Влияние МК на урожайность тритикале озимого сорта Динаро (а) и ржи озимой сорта Пламя (б) (2018–2020 гг.) на эродированной дерново-подзолистой суглинистой почве: 1 – неэродированная, 2 – слабоэродированная, 3 – среднеэродированная почва.

Таблица 6. Влияние микробной композиции (МК) на содержание сырого протеина в зерне озимых зерновых культур (Стоковые площадки, 2018–2020 гг.)

Вариант	Сырой протеин, %		
	1	2	3
Рожь озимая сорта Пламя, 2018 г.			
Контроль	9.6	9.1	9.1
<i>A. brasilense</i> + <i>B. cirulans</i> + <i>T. longibrachiatum</i>	11.0	10.5	10.5
<i>HCP</i> ₀₅ фактор <i>A</i> (почва) – 0.4, фактор <i>B</i> (инокуляция) – 0.7			
Тритикале озимое сорта Динаро, 2019–2020 гг.			
Контроль	11.6	10.8	10.3
<i>A. brasilense</i> + <i>B. cirulans</i> + <i>T. longibrachiatum</i>	12.8	12.5	12.1
<i>HCP</i> ₀₅ фактор <i>A</i> (почва) – 0.4, фактор <i>B</i> (инокуляция) – 0.6			

Примечание. В графе 1 – незероэродированная, 2 – слабоэродированная, 3 – среднеэродированная почва.

менения композиции *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* составила 4.8 (7.2%), 5.1 (8.0%) и 5.3 (8.9%) ц/га при урожайности 71.5, 68.6 и 65.0 ц/га на незероэродированной, слабо- и среднеэродированной почвах соответственно.

При возделывании озимых зерновых культур микробную композицию применяли путем обработки посевов весной в фазе кушения. В экспериментах *in vitro* по оценке стимулирующего действия бактериальных (табл. 2) и грибного (табл. 3) компонентов МК применяли обработку семян тест-культур. В связи с этим необходимо пояснить, что на начальных этапах исследования проводили сравнение эффективности разных способов внесения бактериальных удобрений – предпосевная инокуляция семян и обработки посевов в полевых условиях. Сравнительные испытания азобактерина (*A. brasilense*) показали, что предпосевная инокуляция семян и обработка посевов сравнимы по эффективности [4]. Это в значительной степени было обусловлено высокой подвижностью ризобактерий, в особенности азоспирилл, что позволяет им передвигаться в зоны с благоприятными условиями питания – к корням растений. В классических работах [15] представлены экспериментальные доказательства свободного движения *A. brasilense* через водную пленку.

Влияние МК на содержание сырого протеина в зерне озимых зерновых культур. Установлено, что микробная композиция *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* влияла на метаболизм растений и активизировала процессы ассимиляции азота, обеспечивая повышение его содержания в зерне озимых зерновых культур. При возделывании тритикале озимого содержание сырого про-

теина в зерне в контрольных вариантах варьировало в пределах 10.3–11.6%, в вариантах с обработкой посевов – в пределах 12.1–12.8% на незероэродированной, слабо- и среднеэродированной почвах. Сходные данные по влиянию на ассимиляцию азота были получены при возделывании ржи озимой: в вариантах без применения МК содержание сырого протеина в зерне составило 9.1–9.6%, за счет применения микробной композиции содержание сырого белка в зерне возрастало до 10.5–11.0% (табл. 6). Наиболее вероятно, что этот эффект был обусловлен 2-мя факторами – наличием в составе МК ассоциативных азотфиксирующих бактерий *A. brasilense*, а также значительным повышением адаптационного потенциала растений. Факт влияния *A. brasilense* на процессы ассимиляции азота неоднократно отмечен в научной литературе [11, 16–18]. Проведенные нами полевые исследования с бинарной бактериальной композицией *A. brasilense* + *B. circulans* показали, что азоспириллы оказывали положительное действие на содержание сырого протеина в зерне как в виде моноинокулянта, так и в сочетании с калиймобилизующими бактериями *B. circulans* [19].

Возможными механизмами влияния азоспирилл на метаболизм азота могут быть как азотфиксация, так и денитрификация. Входящий в состав МК штамм *A. brasilense* положителен по нитратредуктазе, что указывает на определенную роль бактериальной нитратредуктазы в повышенной аккумуляции азота озимыми культурами [20, 21]. Наряду с азотфиксацией и нитратредукцией, большую роль играет фактор улучшения адаптивных возможностей растений, что также приводит к усилению ассимиляции азота [5, 22, 23].

Следует отметить, что калиймобилизующие бактерии *B. circulans* также оказывают влияние на метаболизм растений и качество зерна. В наших исследованиях с однокомпонентным бактериальным удобрением калиплант (*B. circulans*) на дерново-подзолистой супесчаной почве было установлено повышение содержания белка в зерне озимых зерновых культур: озимой ржи – на 0.4–0.5, озимого тритикале – на 0.7–1.3% [8]. При возделывании разных сортов яровой пшеницы на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах действие калипланта проявлялось в улучшении качества белка по содержанию критических (Lys*, Thr* и Met*) и незаменимых (Val, Phe, Ile, Leu) аминокислот [2].

Применение многокомпонентных микробных препаратов позволяет эффективнее использовать природные механизмы стимуляции роста, минерального питания и защиты растений. В этом их преимущество по сравнению с однокомпонентными препаратами. Актуальность экологизации возделывания зерновых культур не только на эродированных почвах, за счет более широкого использования полифункциональных микробных средств обусловлена их безопасностью для человека и окружающей среды, возможностью снижения химической нагрузки на почвы, а также экономическими преимуществами. В настоящее время вопросы рационального и безопасного поддержания стабильности агроэкосистем приобретают приоритетное значение, т.к. интенсификация сельскохозяйственного производства повышает риск возникновения экологических проблем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, трехкомпонентная микробная композиция (МК) *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. Longibrachiatum* сочетает свойства биоудобрения, регулятора роста и биофунгицида. Ее применение для обработки посевов стимулирует развитие корней, формирование продуктивных стеблей, увеличивает число и массу семян в колосе озимых зерновых культур. Результаты исследований свидетельствуют о высоком потенциале микробной композиции в качестве биологического фунгицида в посевах зерновых культур. МК обеспечивает эффективный биологический контроль корневой гнили в течение вегетационного периода с биологической эффективностью в пределах 50.2–75.2% по почвенно-эрозионной катене. Синергетическое действие бактериальных и грибного компонентов способствует адаптации озимых зерновых культур, существенно повышает их продуктив-

ный статус и обеспечивает прибавки урожайности зерна от 4.8 до 9.3% в зависимости от степени эрозионной деградации почвы и возделываемой культуры. Компоненты МК влияют на метаболизм растений и активизируют процессы ассимиляции азота, обеспечивая повышение его содержания в зерне озимых зерновых культур. Отмечена тенденция к повышению эффективности МК на эродированных почвах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыбулько Н.Н., Черныш А.Ф. Обработка почвы в эрозийных и загрязненных радионуклидами агроландшафтах. Минск: ИВЦ Минфина, 2014. 423 с.
2. Лана В.В., Михайловская Н.А., Касьянчик С.А., Цыбулько Н.Н., Барашенко Т.Б. Эффективность бактериальных удобрений азобактерин и калиплант при возделывании зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2020. № 2. С. 28–36.
3. Черныш А.Ф., Михайловская Н.А., Касьянчик С.А., Юхновец А.В., Тарасюк Е.Г., Барашенко Т.Б. Эффективность бактериального удобрения Калиплант на посевах яровой пшеницы на эродированных дерново-подзолистых почвах на моренных суглинках // Вести НАН Беларуси. Сер. аграр. наук. 2013. № 1. С. 51–57.
4. Михайловская Н.А., Курилович Н.Н., Барашенко Т.Б., Дюсова С.В. Эффективность бактериализации ячменя на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Почвовед. и агрохим. 2005. № 2 (35). С. 146–152.
5. Bashan Y., Levanyon H. Current status of *Azospirillum* inoculation technology: *Azospirillum* as a challenge for agriculture // Canad. J. Microbiol. 1990. V. 36. P. 591–608.
6. Dobbelaere S., Vanderleyden J., Okon Y. Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere // Critic. Rev. Plant Sci. 2003. V. 22. P. 107–149.
7. Михайловская Н.А., Миканова О., Барашенко Т.Б., Барашенко Т.В. Активность фосфатмобилизации у ризобактерий // Почвовед. и агрохим. 2007. № 1 (38). С. 225–231.
8. Михайловская Н.А. Количественная оценка активности калиймобилизующих бактерий и их эффективность на посевах озимой ржи // Вести НАН Беларуси. Сер. аграр. наук. 2006. № 3. С. 41–46.
9. ГОСТ 12044-93. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. Введен в действие постановлением Белстандарта от 30 декабря 1993 г. № 15 непосредственно в качестве государственного стандарта Республики Беларусь с 1 января 1996 г. Переиздание (январь 2013 г.) с Поправкой (ИУС РБ № 4-2000). Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1993.
10. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / НППЦ НАН Беларуси по земледелию, Ин-т защиты

- растений, под ред. Ф. Буга. Несвиж: типогр. им. С. Будного, 2007. 508 с.
11. Okon Y., Labandera-Gonzalez C.A. Agronomic application of *Azospirillum*: an evaluation of 20 years worldwide field inoculation // Soil Biol. Biochem. 1994. V. 26. P. 1591–1601.
 12. Okon Y., Vanderleyden J. Root-associated *Azospirillum* species can stimulate plants // Amer. Soc. Microbiol. News. 1997. V. 63. P. 366–370.
 13. Kennedy I.R., Tchan Y. Biological nitrogen fixation in non-leguminous field crops: recent advances // Plant Soil. 1992. V. 141. P. 93–118.
 14. Okon Y., Kapulnik Y. Development and function of *Azospirillum*–inoculated roots // Plant Soil. 1986. V. 90. P. 3–16.
 15. Bashan Y. Migration of the rhizosphere bacteria *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens* towards wheat roots in the soil // J. Gen. Microbiol. 1986. V. 132. P. 3407–3414.
 16. Михайловская Н.А. Эффективность бактеризации разных видов трав *Azospirillum brasilense* // Почвовед. и агрохим. 2006. № 1 (36). С. 202–207.
 17. Михайловская Н.А., Курилович Н.Н., Барашенко Т.Б., Дюсова С.В. Эффективность бактеризации ячменя на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Почвовед. и агрохим. 2005. № 2 (35). С. 146–152.
 18. Boddey R.M., Baldani V.L.D., Baldani J.I., Dobereiner J. Effect of inoculation of *Azospirillum* spp. on nitrogen assimilation of field-grown wheat // Plant Soil. 1986. V. 95. P. 109–121.
 19. Михайловская Н.А., Цыбулько Н.Н., Войтка Д.В., Касьянчик С.А., Устинова А.М., Барашенко Т.Б., Дюсова С.В. Влияние ризобактерий *A. brasilense* и *B. circulans* на урожайность, качество и фитопатологическое состояние посевов зерновых культур при возделывании на эродированных почвах // Почвовед. и агрохим. 2020. № 2 (65). С. 129–140.
 20. Boddey R.M., Dobereiner J. Nitrogen fixation associated with grasses and cereals: Recent progress and perspectives for future // Fertil. Res. 1995. V. 42. P. 241–250.
 21. Danneberg G., Kronenberg A., Neuer G., Bothe H. Aspects of nitrogen fixation and denitrification by *Azospirillum* // Plant Soil. 1986. V. 90. P. 193–202.
 22. Michiels K., Vanderleyden J., Gool A. *Azospirillum* – plant root associations: A review // Biol. Fertil. Soils. 1989. V. 8. P. 356–368.
 23. Dobbelaere S., Vanderleyden J., Okon Y. Plant growth–promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere // Critic. Rev. Plant Sci. 2003. V. 22. P. 107–149.

Efficiency of Ternary Microbial Composition for Winter Grain Crops Growing on Eroded Luvisol Sandy Loam Soils

N. A. Mikhailouskaya^{a, #}, D. V. Voitka^{b, ##}, N. N. Tsybulko^a,
T. B. Barashenko^a, and S. V. Dyusova^a

^a Belarusian Research Institute for Soil Science and Agrochemistry
ul. Kazintsya 90, Minsk 220108, Belarus

^b Belarusian Research Institute for Plant Protection
ul. Mira 2, Priluki 223011, Belarus

[#]E-mail: bionf1@yandex.ru

^{##}E-mail: d.voitka@tut.by

Efficiency of ternary microbial composition *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum* was studied in long term stationary field experiment on Luvisol sandy loam soil in different degree undergone by water erosion. It was found that microbial composition (MC) combines growth promotion, biofertilizer and biofungicide properties. Its application for the treatment of winter grain crops sowings on eroded soils resulted in the stimulation of roots growth, formation of generative steams, increasing of number and mass of seeds per one ear. Microbial composition implementation provided effective biological control of root pathogens during grain crops vegetation, in diapason of 50.2–75.2% according soil erosion catena. Synergetic action of bacterial and fungi components of MC promotes better adaptation of winter grain crops in stress conditions on eroded soils that results in significant yield increase and crop responses – from 4.8 up to 9.3%. MC components affect plant metabolism and activate of nitrogen assimilation processes thereby increased its content in grain. The tendency of MC efficiency rise on eroded soils was observed.

Key words: microbial composition *A. brasilense* + *B. circulans* + *T. longibrachiatum*, eroded Luvisol sandy loamy soils, winter grain crops, growth stimulation, biological control of root infection, adaptation.

УДК 631.811.631.871:631.584.5:633.31./37

УДОБРИТЕЛЬНАЯ ЦЕННОСТЬ БОБОВОГО КОМПОНЕНТА В СИДЕРАЛЬНЫХ СМЕШАННЫХ ПОСЕВАХ

© 2021 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 14.12.2020 г.

После доработки 04.02.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Показано, что увеличение урожайности сидеральной массы и повышение содержания в ней элементов питания растений определяет удобрительную ценность сидератов. Этого можно добиться, если в качестве зеленого удобрения использовать не одну культуру, а смесь экологически и аллелопатически совместимых культур. Наиболее исследованы в этом плане бобово-злаковые смеси. Однако и в этом случае остается слабо изученным аспект подбора компонентов с целью получения наиболее эффективного сидерального удобрения. В полевом опыте было получено, что в условиях северо-запада Центрально-Черноземной зоны в целях сидерации целесообразно использовать в бинарных смесях с кукурузой, пайзой и подсолнечником не горох, а сою. Значительное превосходство бинарных смесей с соей по продуктивности надземной биомассы и накоплению в ней элементов питания растений позволило по сравнению со смесями, содержащими гороховый компонент, оказать после сидерации существенно более позитивное влияние на весь комплекс свойств, определяющих плодородие почвы.

Ключевые слова: агроценоз, смешанные посевы, фактор смешивания (агроценотический эффект), сидерация, бобовый компонент.

DOI: 10.31857/S0002188121070061

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что более высокие продуктивность сидератов и содержание в них элементов питания растений имеют большую ценность в плане увеличения плодородия почв [1, 2]. Воздействие сидеральных удобрений на почву многогранно и влечет за собой улучшение комплекса свойств почв, определяющих их потенциальное плодородие и фитосанитарное состояние [3–5]. Это особенно важно для почв, подверженных деградационным процессам в результате длительного пахотного использования [6, 7]. Значительно повысить удобрительную ценность сидератов возможно при использовании для этой цели не одной какой-либо культуры, а смеси экологически и аллелопатически совместимых культур [8–11]. Под аллелопатическим воздействием подразумевается влияние одних видов растений на другие через выделяемые ими при жизни или образующиеся в процессе метаболизма и сапрофитного разложения физиологически активные вещества [12]. Следует считать растения аллелопатически совместимыми, если взаимовлияние рассматри-

ваемых веществ растений друг на друга в большей мере соответствует стимулированию или отсутствию негативных последствий, но не приводит к угнетению их роста и развития. Под экологической совместимостью понимается взаимодействие между культурами по отношению к экологическим факторам как представляющим ресурсы среды (свет, вода, элементы питания), так и не являющимися ресурсами, но влияющими на конкуренцию между растениями за ресурсы (тепло, реакция почвы, засоленность и пр.). Под конкуренцией понимается взаимодействие между особями одного или разных видов, претендующими на один и тот же ресурс, количество которого ограничено [13]. Конкурентная способность растений генетически детерминирована, а признаки, обеспечивающие большую конкурентоспособность растения, например, за свет, отличаются от признаков, позволяющих ему лучше использовать воду или элементы минерального питания [14]. Однако на практике оказывается очень сложно учесть все аспекты экологической и аллелопатической совместимости растений с целью

получения сидеральных агросообществ с наиболее высокой удобрительной способностью. Это также осложняется тем, что на взаимодействие между растениями значительное влияние могут оказывать природные условия. Например, если при взаимодействии между растениями в условиях одной природной зоны отмечен рост их продуктивности, то это еще не означает, что такой эффект будет проявляться в другой природной зоне [15]. К настоящему времени взаимодействия между растениями с целью составления из них продуктивных агросообществ изучены слабо. Наиболее исследованы в этом плане бобово-злаковые агросообщества, в которых используют способность бобовых культур улучшать азотное и фосфорное питание [16], что обусловлено азотфиксацией и возможностью бобовых растений усваивать труднорастворимые фосфаты, часть которых с корневыми выделениями поступают в почву в формах, доступных для других видов растений [17]. Однако и для бобово-злаковых смесей остается слабо изученным аспект подбора компонентов с целью получения наиболее высокой продуктивности этих агросообществ [18]. Поскольку теоретических основ подбора таких агросообществ еще не разработано, требуется проведение исследований по выбору бобовых компонентов и видов растений других семейств, в том числе злаков, для получения сидеральных агросообществ с наиболее высокой удобрительной способностью в основных земледельческих зонах России.

Цель работы — оценка удобрительной ценности в условиях северо-запада Центрально-Черноземной зоны сидеральных бинарных смесей с кукурузой, пайзой, подсолнечником и бобовым компонентом, в котором были соя и горох.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках настоящей работы рассмотрены результаты раздельного учета продуктивности агросообществ в вариантах полевого опыта с чистыми посевами кукурузы сорта Бемо, сои сорта Октябрьская, подсолнечника сорта Енисей, пайзы сорта Удаля, гороха сорта Уладовский и бинарными смесями бобового компонента (соя и горох) с остальными культурами. В чистых посевах культур количество высеванных семян соответствовало их нормам высева, в смесях — половине нормы высева каждой культуры. Посев проводили сеялкой СЗТ-3.6. Опыты проводили в трехкратной повторности на стационаре Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева (Курская обл.) в период с 2001 по

2006 г. Почвы опытного участка были представлены тяжелосуглинистыми мощными типичными черноземами, пахотный слой которых содержал: гумуса — 6.3%, подвижного P_2O_5 — 189, обменного K_2O — 199 мг/кг, характеризовался высокой емкостью катионного обмена (37.7 мг-экв/г почвы) и нейтральной реакцией (pH_{H_2O} 7.2).

На учетной площади каждой делянки, составлявшей 280 м² (5.6 × 50 м), сплошным методом определяли величину продуктивности сидеральных культур, которые по годам исследований чередовались с посевами зерновых. В зависимости от условий года посев культур в вариантах опыта проводили во 2-й или 3-й декаде мая после посева яровой пшеницы. Учет биомассы растений проводили после прохождения всеми культурами опыта фазы цветения.

Определяли компонентный состав сидератов. С этой целью скашивали все растения на площадках 1 м² (по 3 площадки на каждой делянке опыта), укосы разделяли по выращиваемым культурам, однодольным и двудольным сорнякам, затем устанавливали массовые доли этих компонентов в каждом агроценозе. Для определения величины урожая культур и сорных растений полученные доли умножали на величину биологического урожая со всей учетной площади соответствующих делянок.

Биомассу в вариантах с чистыми и смешанными посевами использовали как сидераты (измельчали КИР-1.5 Б и запахивали под зябь в почву).

В отобранных растительных образцах методом рентгено-флюоресцентного анализа определяли валовые количества макро- (P, K, Ca, Mg, S) и микроэлементов (Zn, Mn, Rb, Sr, Cu). Полученные для каждого варианта величины умножали на продуктивность соответствующей культуры и находили общее количество элементов питания, которое бы оказалось внесенным в почву при запашке сидератов.

Для оценки влияния фактора смешивания посевов на изменение исследованных показателей (агроценотического эффекта) был разработан метод построения вариантов сравнения [19]. Суть этого метода состояла в расчетном построении для каждого смешанного агросообщества варианта сравнения из соответствующих чистых посевов таким образом, чтобы единственным различием между смешанным агросообществом и вариантом сравнения было наличие фактора смешивания в первом случае и отсутствие — во втором. Для исследованных показателей вариант сравнения рассчитывали по следующей формуле:

$V_{si} = P_i \times W_i \text{Sum}(W_i)$, где V_{si} – вариант сравнения для i -й культуры, P_i – величина исследованного показателя в чистых посевах i -й культуры, W_i – доля i -й культуры в смешанном посеве, определенная как количество семян этой культуры Q_i , отнесенных к норме высева, соответствующей нормальным по плотности посевам N_i ($W_i = Q_i/N_i$), Sum – указатель суммы.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований были получены средние в 3-х повторностях величины продуктивности надземной фитомассы в чистых посевах сидератов и их бинарных смесях (табл. 1). Показано, что соя в чистых посевах по продуктивности надземной массы значительно уступала гороху в чистых посевах. Однако бинарные смеси сои по сравнению со смешанными посевами гороха с теми же самыми культурами были более продуктивными. Например, увеличение продуктивности таких смесей с соей по сравнению со смешанными посевами гороха составило 1.2–45.9%. Меньше увеличилась продуктивность посева подсолнечник + соя, больше – посева кукуруза + соя по сравнению со смешанными посевами этих культур с горохом. Смешанные посевы соя + подсолнечник и горох + подсолнечник характеризовались практически одинаковой продуктивностью. Смесь сои + пайза на 30.8% была более продуктивной по сравнению с посевом горох + пайза.

По данным табл. 1 определили абсолютную и относительную величины влияния агроценотического эффекта на поступление сидеральной надземной фитомассы в почву. Первая была равна разности между количеством фитомассы, поступившей в почву при ее сидерации смешанными посевами, и продуктивностью чистых посевов культур (вариантов сравнения) в соответствии с вышеприведенной формулой; вторая представляла собой отношение этой разности к надземной фитомассе агроценозов и являлась долей вклада агроценотического эффекта в изменение по-

Таблица 1. Поступление в почву сидеральной надземной фитомассы в вариантах опыта (средние за период исследования), г сухого вещества/м²

Агроценоз	Повторность			Средние
	1	2	3	
Кукуруза	680	620	630	643 ± 19
Соя	430	410	380	407 ± 15
Горох	480	540	520	513 ± 18
Подсолнечник	720	730	710	720 ± 6
Пайза	500	450	480	477 ± 15
Кукуруза + соя	940	860	880	893 ± 24
Кукуруза + горох	610	660	570	613 ± 26
Соя + пайза	700	690	660	683 ± 12
Горох + пайза	510	570	470	517 ± 29
Соя + подсолнечник	840	930	800	857 ± 38
Горох + подсолнечник	902	837	805	848 ± 29

Таблица 2. Абсолютная и относительная величина агроценотического эффекта

Вариант	Величина агроценотического эффекта	
	абсолютная, г сухого вещества/м ²	относительная, %
7. Кукуруза + соя*	380 ± 32	43 ± 4
7. Кукуруза + горох	–11 ± 19	–2 ± 3
9. Соя + пайза*	230 ± 15	33 ± 2
9. Горох + пайза	43 ± 18	8 ± 3
10. Соя + подсолнечник*	310 ± 19	36 ± 2
10. Горох + подсолнечник*	240 ± 16	29 ± 2

*Сидеральные смешанные посевы, агроценотический эффект которых оказал значимое влияние на увеличение количества фитомассы, поступившей в почву.

ступления количества надземной фитомассы в почву (табл. 2).

Абсолютная величина агроценотического эффекта при смешивании кукурузы, пайзы и подсолнечника с соей во всех случаях была больше по сравнению со смешиванием соответствующей культуры с горохом. Эта величина в смесях указанных культур с соей составляла 230–380 г сухого вещества/м², тогда как в агроценозах кукуруза + горох это величина была отрицательной (–11 г/м²), незначительно возрастала в агроценозах горох + пайза (43 г/м²) и существенно увеличивалась в агроценозах горох + подсолнечник (240 г/м²). Доля вклада агроценотического эффекта в увеличение продуктивности смесей сои с

Таблица 3. Накопление макроэлементов надземной массой культур в исследованных смешанных посевах, кг/га

Вариант	P	K	Ca	Mg	S	Итого
Кукуруза + соя*	23.9	218	116	26.3	16.3	401
	12.9	60.3	92.8	11.7	13.9	192
Кукуруза + горох	13.2	109	96.8	14.3	14.9	248
	14.2	67.1	101	13.5	15.2	211
Соя + пайза*	19.8	215	120	23.4	14.0	392
	14.4	83.8	92.2	13.6	14.9	219
Горох + пайза	16.7	90.4	98.7	16.4	13.0	235
	15.9	93.2	100	15.7	16.3	241
Соя + подсолнечник*	23.9	166	304	40.1	21.5	555
	14.6	90.7	122	22.9	14.7	265
Горох + подсолнечник	17.4	111	181	32.1	15.1	356
	16.1	101	133	26.4	16.1	292

Примечание. Над чертой — накопление макроэлементов надземной массой смешанных посевов, под чертой — в чистых посевах культур. То же в табл. 4.

*Сидеральные смешанные посевы, агроценоотический эффект в которых оказал значимое влияние на увеличение количества макроэлементов в надземной массе сидератов.

перечисленными культурами была весьма существенной и составила 33–43%. Вклад агроценоотического эффекта в аналогичных смесях с горохом не всегда приводил к увеличению продуктивности посева, а в случаях возрастания количества биомассы доля вклада этого эффекта была значительно меньше по сравнению с соответствующими смесями культур с соей. Во всех смешанных посевах с соей агроценоотический эффект приводил к значимому увеличению продуктивности агрообществ, тогда как для смесей с горохом это наблюдали только в посеве горох + подсолнечник.

Накопление макроэлементов надземной массой растений в исследованных агрофитоценозах представлено в табл. 3. Показано, что накопление макроэлементов надземной массой смешанных посевов с участием сои было более значительным по сравнению с вариантами чистых посевов. По отношению к соответствующему варианту чистого посева суммарное накопление макроэлементов надземной массой смеси кукуруза + соя было больше в 2.09, смеси соя + пайза — в 1.79, смеси соя + подсолнечник — в 2.10 раза. Содержание отдельных элементов в агрообществах с участием сои по отношению к вариантам сравнения изменялось от 0.94 (содержание серы в посеве пайза + соя) до 3.63 раза (содержание калия в посеве кукуруза + соя).

Надземная масса смешанных посевов с горохом по отношению к соответствующим вариантам сравнения накапливала макроэлементов значительно

меньше. Например, в посевах кукуруза + горох и подсолнечник + горох накопление макроэлементов надземной массой всего лишь в 1.18 и 1.22 раза превышало аналогичную величину в соответствующих вариантах сравнения, а посев горох + пайза накапливал макроэлементов в 1.03 раза меньше, чем в варианте сравнения. Содержание отдельных элементов в смешанных посевах с участием гороха по отношению к вариантам сравнения изменялось от 0.80 (содержание серы в посеве пайза + горох) до 1.63 раза (содержание калия в посеве кукуруза + горох).

Надземная масса посева кукуруза + соя накапливала макроэлементов в 1.62 раза больше по сравнению с надземной массой посева кукуруза + горох. Надземная масса агроценоза пайза + соя по количеству макроэлементов превосходила биомассу посева пайза + горох в 1.67 раза. Количество макроэлементов в биомассе смеси подсолнечник + соя превышала их содержание в биомассе посева подсолнечник + горох в 1.56 раза.

Накопление микроэлементов надземной массой посевов представлено в табл. 4. Показано, что накопление микроэлементов, так же как и макроэлементов, надземной массой смешанных посевов с участием сои было более значительным по сравнению к вариантами чистыми посевами культур. По отношению к соответствующему варианту сравнения суммарное накопление микроэлементов надземной массой посева кукуруза + соя было больше в 2.29, смеси соя + пайза — в 1.77, смеси соя + подсолнечник — в 1.46 раза. Содержание отдельных элементов в биомассе смешанных посевов с участием сои по отношению к вариантам сравнения изменялось от 0.89 (содержание рубидия в посеве соя + подсолнечник) до 2.68 раза (содержание марганца в посеве кукуруза + соя).

В надземной массе смешанных посевов, в состав которых входил горох, по отношению к вариантам сравнения накапливалось микроэлементов значительно меньше, чем в смесях с соей. Только в надземной массе агроценоза горох + подсолнечник количество микроэлементов было больше в 1.28 раза, чем в соответствующем варианте сравнения. В остальных случаях отмечена обратная закономерность: надземная масса посевов кукуруза + горох и пайза + горох содержала меньше микроэлементов по отношению к вариантам сравнения соответственно в 1.03 и 1.06 раза. Содержание отдельных элементов в посевах с участием гороха по отношению к вариантам сравнения изменялось от 0.77 (содержание стронция в посеве кукуруза + горох) до 1.44 раза (содержание цинка в посеве подсолнечник + горох).

Таблица 4. Накопление микроэлементов надземной массой растений в исследованных смешанных посевах, кг/га

Вариант	Zn	Mn	Rb	Sr	Cu	Итого
Соя + кукуруза*	0.27	1.66	0.28	0.24	0.05	2.50
	0.25	0.62	0.03	0.15	0.04	1.09
Горох + кукуруза	0.25	0.70	0.04	0.13	0.04	1.16
	0.28	0.67	0.03	0.17	0.04	1.19
Соя + пайза*	0.24	1.25	0.15	0.22	0.05	1.91
	0.24	0.60	0.04	0.16	0.04	1.08
Горох + пайза	0.24	0.61	0.04	0.18	0.04	1.11
	0.27	0.65	0.04	0.18	0.04	1.18
Соя* + подсолнечник	0.35	1.13	0.08	0.43	0.07	2.06
	0.22	0.82	0.09	0.23	0.05	1.41
Горох + подсолнечник	0.36	1.16	0.07	0.33	0.05	1.97
	0.25	0.89	0.09	0.26	0.05	1.54

*Агроценоотический эффект посевов, которые оказали значимое влияние на увеличение количества микроэлементов в надземной массе сидератов.

По накоплению микро-, а также макроэлементов, надземная масса смешанных посевов культур с соей значительно превосходила аналогичный показатель посевов с горохом. Например, надземная масса посева кукуруза + соя накапливала микроэлементов в 2.16 раза больше по сравнению с надземной массой посева кукуруза + горох. Надземная масса смеси пайза + соя по количеству микроэлементов превосходила биомассу смеси пайза + горох в 1.72 раза. Количество микроэлементов в биомассе смеси подсолнечник + соя превышало их содержание в надземной массе смеси подсолнечник + горох в 1.05 раза.

Увеличение продуктивности, содержания макро- и микроэлементов в биомассе сидеральных посевов с включением в качестве бобового компонента сои по сравнению с использованием гороха в конечном итоге привело к существенному увеличению содержания гумуса в почве, увеличению количества макро- и микроэлементов питания растений, а также росту урожайности зерновых культур на 0.5–1.5 ц/га.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях северо-запада Центрально-Черноземной зоны в целях сидерации целесообразно использовать бинарные смеси сои с кукурузой, пайзой и подсолнечником. Агроценоотический эффект во всех этих смешанных посевах сидеральных культур приводил к значительному увеличению их продуктивности (на 33–43%), к увеличению накопления макроэлементов

(в 1.79–2.10 раза по сравнению к соответствующими вариантами сравнения – чистыми посевами культур) и микроэлементов (в 1.46–2.29 раза соответственно). Использование гороха в смешанных посевах в качестве бобового компонента было менее эффективным по сравнению с использованием сои. Из всех бинарных смесей гороха агроценоотический эффект был значимым лишь в посеве смеси горох + подсолнечник (на 29% был больше, чем в соответствующем варианте сравнения), тогда как в других смесях агроценоотический эффект приводил к незначительному увеличению и даже уменьшению продуктивности. Количество макро- и микроэлементов в надземной массе бинарных смесей с горохом было как несущественно больше, так и меньше соответствующих вариантов сравнения. Значительных отличий по накоплению макро- и микроэлементов в надземной массе смешанных посевов с участием гороха по отношению к соответствующим вариантам сравнения обнаружено не было.

Значительное превосходство бинарных смесей с соей по продуктивности надземной массы и накоплению в ней элементов питания растений позволяло оказывать после сидерации существенно более позитивное влияние на весь комплекс свойств почв по сравнению со смешанными посевами, содержащими гороховый компонент. В конечном итоге это приводило к возрастанию потенциального и эффективного плодородия черноземов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Гребенников А.М. Обеспеченность культур элементами минерального питания в смешанных посевах // *Агрохимия*. 2004. № 5. С. 26–35.
3. 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.
4. 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.
5. Кузнецова О.Ю., Гребенников А.М. Рекультивация земель и улучшение качества ее проектирования // *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. 2009. № 1. С. 42–45.
6. Лебедева И.И., Королева И.Е., Гребенников А.М. Концепция эволюции черноземов в условиях аг-

- розкосистем // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Вып. 71. М., 2013. С. 16–26.
7. Лебедева И.И., Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Гребенников А.М., Маркина Л.Г. Структурное состояние миграционно-мицелярных (типичных) агрочерноземов Каменной степи в условиях разновозрастной пашни // Почвоведение. 2017. № 2. С. 227–238.
 8. Гребенников А.М. Структура и продуктивность агроценозов при выращивании сельскохозяйственных культур в смешанных посевах // Агрохимия. 2003. № 4. С. 56–68.
 9. Гребенников А.М. Влияние смешивания посевов на вынос элементов минерального питания надземной массой растений в сидеральных сообществах // Агрохимия. 2005. № 6. С. 26–35.
 10. Гребенников А.М. Содержание подвижного фосфора и обменного калия в типичных черноземах ЦЧО под смешанными посевами // Агрохимия. 2009. № 5. С. 13–21.
 11. Гребенников А.М. Методические аспекты оценки агроценозического эффекта в сидеральных агро-сообществах для воспроизводства плодородия типичных черноземов ЦЧЗ // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2010. № 9. С. 79–89.
 12. Саламатова Т.С., Зауралов О.А. Физиология выделения веществ растениями. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991. 152 с.
 13. Куркин К.А. Системный подход к программированию надземной массы луговых фитоценозов // Бюл. МОИП. 1986. Т. 91. Вып. 2. С. 99–112.
 14. Работнов Т.А. Фитоценология. М.: Изд-во МГУ, 1992. 352 с.
 15. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 432 с.
 16. Кауров И.А., Будкевич Т.А., Минько И.Ф. Динамика поглощения и миграция меченого фосфора у ячменя и сераделлы в различных смешанных посевах // Весці АН БССР. Сер. біял. навук. 1975. № 2. С. 24–28.
 17. Тютюнников А.И., Трофимова Т.А. Взаимовлияние растений бобовых и злаковых компонентов в процессе питания труднодоступным фосфатом // Физиолого-биохимические основы взаимного влияния растений в фитоценозе. М.: Наука, 1966. С. 84–87.
 18. Гуляев Е.Н., Ронсаль Г.А. Влияние корневых выделений однолетних бобовых культур на жизнедеятельность кукурузы в смешанных посевах // Там же. С. 50–56.
 19. Гребенников А.М. Оценка взаимовлияния культур в смешанных посевах // Агрохимия. 2003. № 1. С. 68–73.

Fertilizing Value of the Legume Component in Mixed Green Manure Crops

A. M. Grebennikov

*Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute"
Pyzhevsky per. 7, Moscow 109017, Russia
E-mail: gream1956@gmail.com*

An increase in the yield of sideral mass and an increase in the content of plant nutrition elements in it, which determines the fertilizing value of siderates, can be achieved if not one crop is used as a green fertilizer, but a mixture of environmentally and allelopathically compatible crops. The most studied in this regard are legume and cereal agricultural communities. However, in this case remains poorly understood aspect of selection of components with the aim of obtaining the most effective green manure fertilizer. In the field experiment, it was found that in the conditions of the North-West of the Central Chernozem zone, for the purpose of sideration, it is advisable to use soy instead of peas in binary mixtures with corn, payza and sunflower. The significant superiority of binary mixtures with soy in the productivity of the ground mass and the accumulation of plant nutrition elements in it allows, in comparison with agrocenoses containing the pea component, to have a significantly more positive effect on the entire set of properties that determine soil fertility after sideration.

Key words: agrocenosis, mixed crops, mixing factor (agrocenotic effect), sideration, bean component.

УДК 631.811:633.37:631.445.24/25(470.31)

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ И РАЗВИТИЯ КОЗЛЯТНИКА ВОСТОЧНОГО НА ЛЕГКИХ ПОЧВАХ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ

© 2021 г. В. Н. Баринов¹, М. Н. Новиков^{1*}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа –
филиал Верхневолжского ФАНЦ*

601390 д. Вяткино, Владимирская обл., Судогодский р-н, ул. Прянишникова, 2, Россия

**E-mail: novik.mich@yandex.ru*

Поступила в редакцию 23.04.2021 г.

После доработки 13.05.2021 г.

Принята к публикации 12.06.2021 г.

На дерново-подзолистых супесчаных почвах установлена положительная роль люпина узколистного как покровной средоулучшающей культуры для устойчивого развития и формирования урожая козлятника восточного в течение длительного (11 лет) его хозяйственного использования. На фоне покровных посевов в сравнении с беспокровными в среднем за 11 лет урожайность козлятника восточного выросла на 55 ц/га (на 33%), выход кормовых единиц на – 10 ц/га (на 32%), выход сырого протеина – на 2 ц/га (на 28%). Условно чистый доход от козлятника восточного за счет покровной культуры люпина узколистного в среднем за год достиг 8 тыс. руб./га.

Ключевые слова: козлятник восточный, люпин, биологическая подкормка, плодородие почвы, продуктивность посевов, качество урожая, экономическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188121090040

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее экономически выгодным и хозяйственно доступным путем успешного функционирования сельского хозяйства Нечерноземной зоны РФ в настоящее время является биологизация земледелия [1].

Исследования Всероссийского научно-исследовательского института органических удобрений и торфа (ВНИИОУ) и ряда других научных учреждений теоретически позволяют рассматривать биологизацию земледелия как максимально возможное использование биологических ресурсов в сочетании с рациональным применением антропогенных средств, обеспечивающих бездефицитный или положительный баланс энергии, органического вещества и элементов питания в полевых агроценозах, получение в необходимых количествах высококачественной экономически выгодной, малозатратной продукции.

К биологическим ресурсам можно отнести козлятник восточный, как одну из лучших высокопродуктивных кормовых и средоулучшающих бобовых культур [2]. Козлятник восточный способен длительное время произрастать на постоянных участках, сохраняя параметры урожая и

его качество. Будучи южной культурой, в последние десятилетия он находит широкое распространение в Нечерноземной зоне РФ, в основном на более плодородных почвах. На бедных супесчаных и песчаных дерново-подзолистых почвах, которые в осенний и ранневесенний периоды мало обеспечены подвижными формами азота, козлятник восточный в первый год жизни плохо развивается и даже гибнет, что связано с недостатком азотного питания [3]. Агротехникой возделывания многолетних трав предусмотрено проведение весенних подкормок минеральным азотом в дозах N30–45. В современных условиях при высоких ценах на минеральные удобрения этот прием – дорогостоящее мероприятие, притом не всегда удачное: в отдельных случаях минеральный азот попадает на сухую землю и не участвует в питании растений, в других – вымывается осадками. Исследования показали, что это негативное явление в биологизированном земледелии можно исключить путем возделывания козлятника восточного под покровом высокопродуктивных бобовых культур. Цель работы – изучение биологических приемов оптимизации минерального питания и

Таблица 1. Влияние покровных культур на густоту стояния козлятника, шт./м²

Покровная культура	Всходы	Перед уходом в зиму	После перезимовки
Без покрова	168	289	284
Люпин узколистный	171	292	285
<i>НСР₀₅</i>	12	16	18

развития козлятника восточного на легких почвах Нечерноземной зоны.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые опыты проводили на опытном поле ВНИИОУ. Почва под опытом — дерново-подзолистая супесчаная. Пахотный горизонт характеризовался низким содержанием гумуса (1.0–1.3%), реакцией среды близкой к нейтральной (pH_{KCl} 6.0–6.2), H_r — 0.43–0.57, S — 6.4–7.1 мг-экв/100 г почвы, повышенной обеспеченностью подвижным фосфором (128–152 мг/кг почвы) и обменным калием (135–141 мг/г почвы). Рельеф — плакор, с микропонижениями, имеющий небольшой (до 0.5°) уклон на северо-восток. Опытный участок расположен в Мещерской низменности. Климат — умеренно-континентальный, среднегодовое количество осадков — 526–650 мм, сумма активных температур — 2000–2100°С, ГТК — 1.2–1.3.

Первая закладка опыта была проведена в 2009 г., вторая — в 2011 г. В опыте использовали козлятник восточный сорта Вест, который возделывали без покрова и под покровом люпина узколистного сорта Кристалл. Козлятник восточный и люпин узколистный сеяли в 1-й декаде мая перекрестно: сначала люпин, затем козлятник. Покровную культуру возделывали по типу однолетних трав. Площадь опытной делянки — 13.2 м², повторность четырехкратная. Предшественник — горчица белая.

В опыте под зяблевую вспашку фоном внесли фосфоритную муку и хлористый калий из расчета 90 кг д.в./га. Агротехника в опыте — общепринятая для Нечерноземной зоны [4].

В процессе проведения опыта определяли: влияние покровной культуры на густоту стояния растений козлятника восточного [5] в периоды всходов (3-я декада мая), перед уходом в зиму (2-я декада ноября) и после перезимовки (3-я декада апреля), содержание нитратного и аммиачного азота [6] в пахотном слое почвы перед уходом посевов козлятника восточного в зиму и весной при

их отрастании, укосный урожай покровных культур и козлятника восточного в 1-й год жизни и в течение 11-ти лет хозяйственного использования [5], развитие сеgetальных видов растений [7], поражение растений козлятника восточного болезнями [8] и вредителями [9], качество урожая [10], содержание корневой массы в пахотном слое [11], ее удобрительные показатели [12], экономическую эффективность покровных культур при возделывании козлятника восточного [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С корнепожнивными остатками люпина узколистного поступило в почву под посевы козлятника восточного 45 ц сухого вещества/га, а также 140 кг элементов питания/га, из них — 67 кг азота, 25 кг фосфора и 48 кг калия. Люпин узколистный как покровная культура не оказал отрицательного влияния на развитие растений козлятника восточного в период весенних всходов, перед уходом в зиму и после перезимовки (табл. 1).

В полной мере потенциал всхожести семян козлятника восточного 1-го года жизни проявился в процессе вегетации растений. В обоих вариантах в течение 11-ти лет растения козлятника восточного не поражались болезнями и вредителями. Весной в период отрастания козлятника восточного в посевах обоих вариантов массово появлялись одуванчик и отдельные виды других сорняков, которые по мере развития растений козлятника восточного исчезали, и его посевы в основном были чистыми. Исключением были беспокровные посевы, в которых по мере их вырождения с 2018 г. отмечено устойчивое развитие сорняков.

Эффект положительного действия покровной культуры (люпина узколистного) на условия минерального питания козлятника был связан не только с процессами минерализации его корнепожнивных остатков, когда в почве возрастало содержание минеральных элементов питания, подвижных форм азота в критические периоды вегетации, но и по этой причине в значительной мере проходило увеличение корневой системы козлятника восточного, обеспечившей оптимизацию пролонгированного минерального и углеродного питания этой культуры, росту ее продуктивности (табл. 2).

Под влиянием люпина узколистного не происходило снижение урожайности зеленой массы козлятника восточного 1-го года жизни, на 2-й год жизни урожайность покровных посевов козлятника выросла на 27%, эта закономерность со-

Таблица 2. Влияние покровной культуры люпина узколистного на развитие корневой системы козлятника 2-го года жизни и содержание подвижного азота в почве*

Покровная культура	Масса корней, ц/га	Содержание в корнях, кг/га				Содержание в почве N-NO ₃ + N-NH ₄ , мг/кг почвы
		N _{общ}	P ₂ O ₅	K ₂ O	итого	
Без покрова	162	57	24	42	123	12.2
Люпин узколистный	204	75	25	55	155	16.7
HCP ₀₅	35	16	10	11	28	2.2

*Корнепожнивные остатки (корни) и содержание элементов питания в них учитывали в пахотном слое почвы под травами 2-го года жизни, содержание подвижного азота (1-я декада мая) — под травами 3-го года жизни.

хранилась в течение 11-ти лет его возделывания (рис. 1).

В среднем за весь период исследования урожайность беспокровных посевов козлятника восточного составила 168, покровных — 223 ц/га, прирост урожайности был равен 55 ц/га (33%). В засушливые годы она заметно снижалась в благоприятные — возрастала.

Особенно высокий прирост урожайности покровных посевов козлятника отмечали в 2018–2020 гг., когда беспокровные посевы козлятника заметно снизили свою продуктивность, что было связано с ослаблением их симбиотической азотфиксации и как следствие — с ухудшением азотного питания растений. Об этом свидетельствовало наличие клубеньков с азотфиксирующими бактериями на корнях козлятника. В беспокровных посевах на корнях одного растения перед уборкой урожая было 16 слаборазвитых клубень-

ков, покровных посевов — 22 крупных клубенька. И как следствие, в растениях козлятника беспокровных посевов содержание в клубеньках общего азота было равно 1.88% на сухое вещество (на уровне злаковых культур), покровных посевов — 3.53%. По внешнему виду беспокровные посевы имели явные признаки вырождения: изреженный, относительно низкорослый, не выровненный травостой, растянутый цикл цветения, засоренность сеgetальными растениями, вместе с которыми единственный укос составил 106 ц/га. Развитие покровных посевов козлятника было на уровне показателей прошлых лет, в этом случае двухукосный урожай составил 250 ц/га, и негативные факторы беспокровных посевов отсутствовали.

Покровные посевы люпина узколистного, способствуя росту урожайности, увеличили вы-

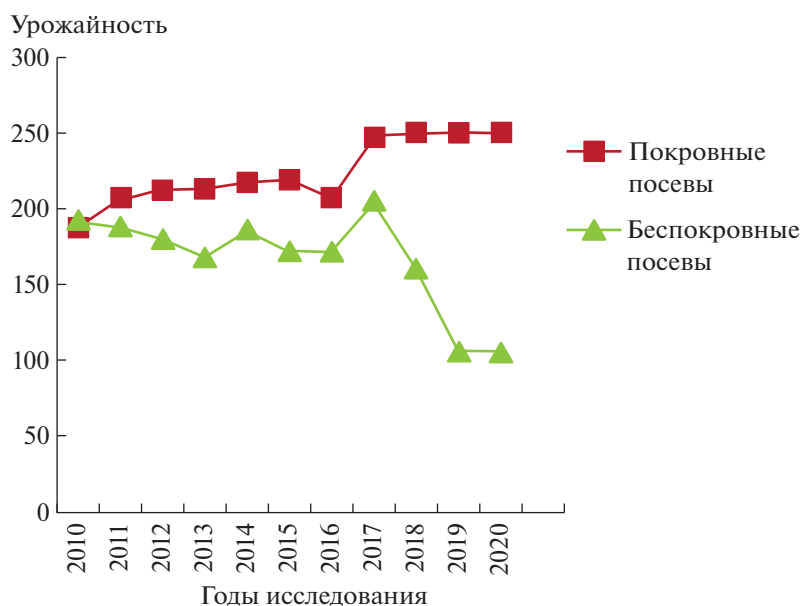

Рис. 1. Влияние вида посева на укосную урожайность козлятника восточного, ц/га.

Таблица 3. Качество урожая козлятника восточного в зависимости от способов его возделывания

Показатель	Годы										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Беспокровные посевы козлятника											
Выход сырого протеина, ц/га	8.0	7.8	7.6	7.6	7.6	7.8	7.4	8.6	6.6	4.6	4.1
Выход кормовых ед., ц/га	36	36	34	32	35	33	33	41	30	20	20
Покровные посевы козлятника											
Выход сырого протеина, ц/га	7.8	9.0	8.8	9.0	9.2	9.2	8.4	9.8	10.0	10.0	10.0
Выход кормовых ед., ц/га	36	39	40	40	41	42	37	47	48	48	48
<i>HCP</i> ₀₅	0.6 1.4	1.0 1.9	0.9 2.6	1.1 4.0	1.2 3.9	0.9 5.9	0.8 2.4	1.0 2.8	2.2 13	3.0 19	4.0 17

Примечание. Над чертой — выход сырого протеина, под чертой — выход кормовых единиц.

ход комовых единиц и сырого протеина козлятника восточного (табл. 3).

В покровных посевах в среднем за 11 лет выход кормовых единиц (**к.е.**) составил 42 ц/га и сырого протеина — 9.2 ц/га, в беспокровных посевах — соответственно 32 и 7.2 ц/га. Прирост этих показателей достиг 10 ц к.е./га (32%) и 2 ц сырого протеина/га (28%).

Суммарная урожайность за 11 лет в покровных посевах козлятника восточного составила 2453 ц/га, в беспокровных — 1848 ц/га. За вычетом внесенных элементов питания (фосфора и калия по 90 кг/га в виде фона перед закладкой опыта) вынос азота, фосфора и калия в покровных посевах составил 908, 278 и 574, в беспокровных — 684, 177 и 408 кг/га соответственно. Судя по этим показателям, удобрительный бюджет пахотного не мог обеспечить такой вынос элементов питания. Следовательно, растения козлятника восточного за счет симбиотической фиксации азот в основном получали из воздуха, а фосфор и калий — из подпахотных горизонтов. Более того, усиливая накопление корневой массы и содержание в ней элементов питания, покровная культура не только способствовала увеличению продуктивности козлятника восточного и выноса элементов питания, но и оказывала положительное влияние на

плодородие пахотного горизонта почвы (табл. 4). Под посевами козлятника отмечена тенденция к увеличению содержания гумуса и снижению кислотности почвы, также на 14% возросло содержание обменного калия. Количество подвижного фосфора уменьшилось на 39%, что, видимо, было связано с интенсивным потреблением подвижных форм фосфора козлятником из пахотного горизонта почвы. Это также свидетельствовало о необходимости контролировать фосфорное питание растений в длительном бессменном посеве козлятника.

В покровных посевах козлятника восточного прирост продукции в кормовых единицах достиг 10 ц/га, в современных ценах это составило ≈8 тыс. руб./га.

ВЫВОДЫ

1. Козлятник восточный (*Galega orientalis* L.) является одной из лучших кормовых и средоулучшающих культур длительного срока жизни, которую можно выращивать без применения удобрений на более плодородных почвах Нечерноземной зоны.

2. На слабоплодородных почвах легкого механического состава козлятник плохо приживается и даже гибнет из-за недостатка азотного питания и отсутствия активной симбиотической азотфиксации у него в первый год жизни. В системе биологизации земледелия этот негатив вместо дорогостоящих удобрений можно устранить за счет биологического азота покровных однолетних бобовых культур.

3. Использование однолетнего люпина в качестве покровной культуры для козлятника и как донора биологического азота и других элементов питания способствовало успешному выживанию козлятника в первый год жизни и, что очень важ-

Таблица 4. Влияние посевов козлятника на агрохимические свойства почвы

Год	рН _{KCl}	<i>H</i> _г	Ca ²⁺ + + Mg ²⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O	Гумус, %
		мг-экв/100 г почвы		мг/кг почвы		
2010	6.3	0.55	6.5	149	142	1.30
2018	6.5	0.51	6.6	93.8	162	1.32

но, развитию более мощной корневой системы, обеспечившей длительное устойчивое приоритетное развитие растений козлятника по сравнению с беспокровными посевами.

4. В среднем за 11 лет исследования урожайность беспокровных посевов козлятника восточного составила 168, покровных – 223 ц/га, прирост урожайности – 55 ц/га (33%), кормовых единиц – 10 ц/га (32%) и сырого протеина – 2 ц/га (28%), общего выноса элементов питания – 54 кг/га (44%).

5. В почве под посевами козлятника отмечена тенденция к увеличению содержания гумуса и снижению кислотности почвы, также на 14% возросло содержание обменного калия.

6. Условно чистый доход при выращивании козлятника восточного за счет покровной культуры люпина в среднем за год достиг ≈8 тыс. руб./га.

3. *Баринов В.Н., Новиков М.Н.* Использование люпина узколистного как покровной культуры многолетних трав в севооборотах Владимирской области // *Владимир. земледелец*. 2017. № 2. С. 25–26.
4. *Балюра В.И., Барашков Н.И., Безуглов В.Г.* Справочник агронома Нечерноземной зоны / Под ред. Гуляева Г.В. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Колос, 1980. 576 с.
5. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта, М.: Колос, 1968. 336 с.
6. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. I (анализ почв). М.: ВИУА, 1975. 164 с.
7. *Шентухов В.Н., Гафуров Р.М., Панаскири Т.В.* Атлас основных видов сорных растений России. М.: РАСХН, 2008. 172 с.
8. *Хохряков М.К.* Определение болезней растений. Л.: Колос, 1966. 532 с.
9. *Брянцев В.А.* Сельскохозяйственная энтомология. Л.: Колос, 1966. 342 с.
10. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
11. *Станков Н.З.* Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 280 с.
12. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. II (анализ растений). М.: ВИУА, 1976. 205 с.
13. Методические указания по определению экономической эффективности удобрений и других средств химизации, применяемых в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1979. 25 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков М.Н.* Система биологизации земледелия в Нечерноземной зоне. М.: Росинформагротех, 2007. 295 с.
2. *Вавилов П.П., Райг Х.А.* Возделывание и использование козлятника восточного. Л.: Колос, ЛО, 1982. 72 с.

Biological Methods of Optimization of Mineral Nutrition and Development of Eastern Goat on Light Soils of the Non-Chernozem Zone

V. N. Barinov^a and M. N. Novikov^{a, #}

^a All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – branch of Verkhnevolzhsky FANTS
ul. Pryanishnikova 2, Vladimir region, Sudogodsky district, d. Vyatkino 601390, Russia

[#]E-mail: novik.mich@yandex.ru

On sod-podzolic sandy loam soils, studies have established the positive role of narrow-leaved lupine as a cover medium-improving crop for the sustainable development and formation of the eastern goat's crop for a long time (11 years) its economic use. According to the background of cover crops in comparison with non-cover crops, on average for 11 years, the yield of eastern goatgrass increased by 55 c/ha (on 33%), the yield of feed units by 10 c/ha (on 32%), the yield of raw protein – 2 c/ha (on 28%). The conditional net income from the eastern goat farm due to the cover culture of narrow-leaved lupine reached 8 thousand rubles/ha on average for the year.

Key words: eastern goat's nest, lupin, biological top dressing, soil fertility, crop productivity, crop quality, economic efficiency.

УДК 631.416:553.43(571.55)

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ НА ТЕРРИТОРИИ УДОКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ

© 2021 г. В. П. Макаров^{1,*}, Н. Ю. Михеева¹, С. В. Борзенко¹¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
672014 Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия

*E-mail: vm2853@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

После доработки 27.04.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

Рассмотрены особенности распределения подвижных форм химических элементов в различных типах почв на территории Удоканского месторождения меди, в Каларском р-не Забайкальского края. Целью работы было выявление особенностей распределения химических элементов в почвах района Удоканского месторождения меди. Исследование почвенного покрова проведено в июне и августе 2011 г. Содержание химических элементов определяли в горно-тундровых и горно-таежных почвах. Было заложено 36 почвенных разрезов, проведено морфологическое описание разрезов. Анализ элементного состава по типам почв проведен на глубине до 50 см. Определили в почве содержание 21 микроэлемента. Среднее содержание подвижных элементов в почвах на территории месторождения меди находилось в следующей последовательности: Fe > Al > Mn > Cu > Zn > Ti > As > V > Ba > Co > Ni > Pb > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be. Исследованные типы почв отличались содержанием химических элементов, обнаружена корреляционная связь содержания элементов с высотой расположения места отбора проб над уровнем моря и между собой. Полученные результаты могут быть использованы для исследования изменения качества среды в районе исследования. В целом концентрация химических элементов в почвах была значительно меньше их среднего содержания в земной коре.

Ключевые слова: химический состав почв, Удоканское медное месторождение, почвы, микроэлементы.

DOI: 10.31857/S0002188121090088

ВВЕДЕНИЕ

Район исследования находится на территории Удоканского медного месторождения, в Каларском р-не Забайкальского края (рис. 1). Руды Удоканского месторождения — комплексные, кроме меди в них присутствуют Mo, Ni, Co, Zn, Pb, Bi, Hg, As, Ag, Au, Pt и Pd. Основная форма элементов в рудах — собственные минералы [1]. Геохимической особенностью месторождения является относительно низкое содержание большинства элементов. Ванадий, серебро, хром отмечены в количествах, близких к кларку. В меньших количествах встречаются марганец, титан, свинец, цинк, кобальт, никель, бериллий. Превышают кларки висмут и золото [2].

Отличительной особенностью территории является также сильно расчлененный высокогорный рельеф и наличие мощной толщи многолетнемерзлых пород. Характер распространения многолетнемерзлых пород существенно сказыва-

ется на химическом составе подземных и поверхностных вод региона. По химическому составу воды чаще гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые и натриевые с минерализацией до 100 мг/л и pH до 6.8 с повышенными содержаниями таких микроэлементов как медь, никель, железо, марганец [3].

В районе исследования различают 2 основных типа почв — горно-тундровые и горно-таежные. Гранулометрический состав почв — пески, супеси и легкие суглинки. Реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) — от сильноокислой (3.95) до нейтральной (6.35). По степени гидролитической кислотности почвы — от нейтральных (1.21 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислых (75.4 ммоль/100 г почвы).

В настоящее время проблема техногенной трансформации окружающей среды приобретает особую актуальность в северных районах России, где при активном промышленном освоении существенно увеличивается геохимическая нагрузка

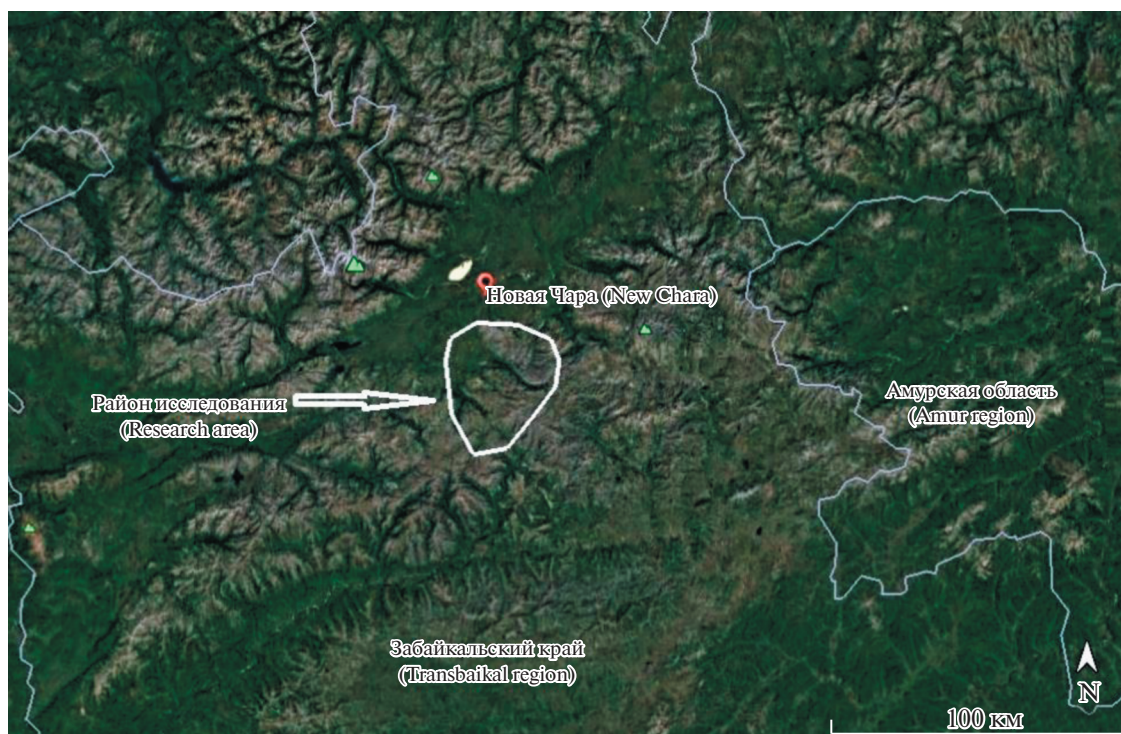


Рис. 1. Расположение района исследования почв на территории Удоканского месторождения меди Забайкальского края.

ка на живую природу, атмосферный воздух и земную поверхность, происходят интенсивные процессы перераспределения и трансформации химических элементов. Об этом свидетельствуют резкие изменения в компонентах экосистем в районах развития ведущих отраслей горнодобывающей промышленности.

Освоение Удоканского месторождения будут вести открытым, карьерным способом. Реализация планов по добыче и переработке медной руды может привести к значительному загрязнению прилегающих территорий вследствие образования карьеров, отвалов, хвостохранилищ с последующим возникновением эрозионных очагов и новых миграционных геохимических потоков, характеризующихся повышенными концентрациями химических элементов.

В районе хребта Удокан произрастает множество растений, которые используют в качестве сырьевых ресурсов. Обширные площади занимают лиственничные леса, кедрово-стланиковые, ерниковые и лишайниковые сообщества. В лесах произрастает ряд ценных пищевых и лекарственных растений. Растительные сообщества, в особенности лишайниковые, используют в качестве оленьих пастбищ. Поэтому проблема мониторинга окружающей среды в этих условиях осо-

бенно актуальна. Знание элементного состава почвы позволяет осуществлять контроль и прогноз изменений в среде обитания организмов. Кроме того, проведенные исследования дополняют информацию о свойствах почв в условиях высокогорья и вечной мерзлоты в одном из мало доступных регионов России.

Цель работы – исследование концентрации и особенностей распределения ряда химических элементов в почве до производственной стадии разработки месторождений полезных ископаемых. Такие исследования в районе ранее не проводили.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование почвенного покрова проведены в июне и августе 2011 г. Содержание химических элементов определяли в горно-тундровых и горно-таежных почвах. Было заложено 36 почвенных разрезов, проведено морфологическое описание разрезов, отобраны почвенные пробы из горизонтов А и В согласно инструкции по почвенным обследованиям [4], ГОСТ Р 58595-2019 и ГОСТ 17.4.4.02-2017. Глубина отбора почвенных образцов зависела от мощности почвы. Глубина слоя А была до 25 см, слоя В – до 50 см. В ряде почвенных разрезов отбор почвы производили из

слоя АВ на глубину до 50 см. Анализ элементного состава типов почв проведен путем объединения слоев АВ.

Для оценки уровня плодородия почв по ГОСТ 17.4.3.02-85 определяли следующие показатели: содержание органического вещества, подвижных фосфора и калия, общего азота, обменных кальция, магния и натрия, величины pH_{KCl} и pH_{H_2O} , сумму поглощенных оснований, гидролитическую кислотность, емкость катионного обмена, основные катионы и анионы (включая CO_3^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , HCO_3^- , в моль/100 г почвы), гранулометрический состав.

Выполнено определение в почвенных образцах подвижных форм микроэлементов: Ti, V, As, Cd, Cu, Pb, Mo, Hg, Ni, Zn, Ba, Cr, Mn, Co, Ag, Sr, Sb, Fe, Al, Se, Be [4]. Определение тяжелых металлов и металлоидов в почве выполнено методом атомно-абсорбционной спектроскопии с атомизацией.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности почвообразования таежных почв Забайкалья впервые рассмотрены в работах Ногиной, исследовавшей левобережную часть Витимского плоскогорья и юг бурятской части Станового нагорья. Наиболее существенным явилось выделение автором типа горно-таежных почв [5].

Позднее эти почвы были описаны Преображенским при физико-географических исследованиях северных районов Читинской обл. [6]. При рекогносцировочном обследовании на основе анализа морфологической структуры почвенных разрезов, руководствуясь в основном схемой Ногиной, им были выделены на территории изученного района следующие группы почв: горно-таежные и горно-тундровые.

В 1978 г. сотрудниками Читинского филиала Института “ВостСибНИИГипрозем” была составлена “Почвенная карта” Читинской обл. (Забайкальского края) масштаба 1:600 000, по результатам которой на территории Каларского р-на были выделены контуры сочетаний горно-таежных торфянисто-мерзлотных, горно-таежных обычных, горно-таежных оподзоленных и горно-тундровых почв.

Почвообразующими породами описываемой территории являются элювиально-делювиальные отложения. По долинам рек и ручьев почвообразование идет на древнеаллювиальных и современных аллювиальных рыхлых наносах. В долинах рек и их притоках, на аллювиальных и делювиальных

отложениях залегают горно-таежные аллювиальные, горно-таежные торфянисто-мерзлотные и торфянисто-мерзлотные почвы. В полосе высот до 1400 м на плоских участках речных незаливаемых террас под лиственничными лесами на элювиально-делювиальных отложениях формируются горно-таежные почвы. На склонах средней крутизны подгольцового пояса на высотах 1600–1700 м основной фон представлен горно-таежными обычными почвами. Большие площади по крутым безлесным склонам и вершинам хребтовых поднятий на высотах 1700–1800 м занимают горно-тундровые почвы.

В результате проведенных исследований на рассматриваемой территории выделены следующие типы почв: 1 – горно-тундровые, 2 – горно-таежные.

1. Горно-тундровые почвы широко распространены в гольцовом поясе, выше 1700–1800 м, где занимают большие площади по крутым безлесным склонам и вершинам хребтовых поднятий. Профиль этих почв очень укорочен. Под тонким лишайниковым покровом залегает горизонт слаборазложившегося мха, с которого начинается сильно хрящеватая супесь темно-коричневых тонов. В профиле очень много щебня, обломков коренных пород.

По данным химических анализов, верхний горизонт горно-тундровой почвы характеризуется содержанием: органического вещества – от низкого (2.68%) до очень высокого (12.7%), общего азота – от очень низкого (0.06%) до высокого (0.62%), подвижного фосфора – очень низкое (1.2–7.8 мг/кг), подвижного калия – от низкого (35.1 мг/кг) до среднего (61.0 мг/кг), обменного кальция (0.75–1.0 ммоль/100 г почвы) и обменного магния (0.05–0.13 ммоль/100 г почвы) – очень низкое, реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) – от сильноокислой (4.16) до среднекислой (4.95 ед.). Сумма поглощенных оснований составляла 0.5–6.4 ммоль/100 г почвы с преобладанием обменного кальция. По степени гидролитической кислотности почвы были от среднекислых (4.71 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислых (13.6 ммоль/100 г почвы). В гранулометрическом составе горно-тундровых почв преобладали фракции легких и средних суглинков.

2. Горно-таежные почвы формируются на склонах средней крутизны под лиственничными лесами с подлеском из березы, стланика с небольшим мохово-лишайниковым покровом на аллювиально-делювиальных отложениях. Мерзлота залегает обычно на глубине 0.5–0.6 м. Для них характерно наличие небольшой торфянистой под-

стилки (2–5 см) из слаборазложившихся мхов. На исследованной территории выделены следующие подтипы горно-таежных почв: горно-таежные аллювиальные, горно-таежные обычные, горно-таежные торфянисто-мерзлотные и торфянисто-мерзлотные почвы.

2а. Горно-таежные обычные почвы формируются на южных склонах различной крутизны, в долинах рек Нирунгнакан, Нижний Ингамакит под листовенничными лесами с подлеском из березы, стланика с небольшим мохово-лишайниковым покровом на аллювиально-делювиальных отложениях. Мерзлота залегает обычно на глубине 0.5–0.6 м. Для почв характерно наличие небольшой торфянистой подстилки (2–5 см) из слаборазложившихся мхов.

По данным физико-химических анализов, верхний горизонт горно-таежной обычной почвы характеризуется содержанием: органического вещества — от очень низкого (1.32%) до очень высокого (10.2%), общего азота — от очень низкого (0.05%) до повышенного (0.35%), подвижного фосфора — от очень низкого (1.24 мг/кг) до очень высокого (202 мг/кг), подвижного калия — от низкого (35.4 мг/кг) до очень высокого (255 мг/кг), обменного кальция — от очень низкого (0.10 ммоль/100 г почвы) до среднего (5.80 ммоль/100 г почвы), обменного магния — от очень низкого (0.05 ммоль/100 г почвы) до низкого (0.91 ммоль/100 г почвы). Реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) — от сильноокислой (4.22) до нейтральной (6.35), сумма поглощенных оснований составляла 0.5–16.8 ммоль/100 г почвы. По степени гидролитической кислотности преобладала реакция среды от близкой к нейтральной (2.57 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислой (11.0 ммоль/100 г почвы). В гранулометрическом составе преобладающими фракциями горно-таежных обычных почв были песок, супесь и легкий суглинок.

2б. Горно-таежные торфянисто-мерзлотные почвы формируются на плоских или полого наклоненных участках, на склонах северной экспозиции, на высотах от 1000 до 1300–1400 м, в надпойменных террасах рек Нирунгнакан, Нижний Ингамакит под разреженными лесами с подлеском из березы, с участием кустарничкового покрова и обилием мхов. Характерным признаком для этой почвы является торфянистый горизонт мощностью от 10–12 до 25 см.

По данным физико-химических анализов, верхний горизонт горно-таежной торфянисто-мерзлотной почвы характеризуется содержанием: органического вещества — от низкого (2.40%) до

очень высокого (12.4%), общего азота — от очень низкого (0.11%) до повышенного (0.41%), подвижного фосфора — очень низким (1.10–2.2 мг/кг), подвижного калия — от низкого (37.2 мг/кг) до повышенного (118.5 мг/кг), обменного кальция — от очень низкого (1.05 ммоль/100 г почвы) до низкого (4.05 ммоль/100 г почвы), обменного магния — от очень низкого (0.02 ммоль/100 г почвы) до среднего (1.26 ммоль/100 г почвы). Реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) — от сильноокислой (4.32) до близкой к нейтральной (5.81). Сумма поглощенных оснований составляет 0.8–21.6 ммоль/100 г почвы. По степени гидролитической кислотности почвы относятся к группам от слабоокислых (4.05 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислых (15.8 ммоль/100 г почвы). В гранулометрическом составе горно-таежных торфянисто-мерзлотных почв преобладают фракции песка, супеси и легкого суглинка.

2в. Торфянисто-мерзлотные почвы ерников формируются на участках с неглубоким залеганием мерзлоты на пролювиальном материале, в долинах рек Нирунгнакан, Нижний Ингамакит с листовенничными ерниками. Характерным признаком этой почвы является торфянистый горизонт (мощностью 10–12 см) с хорошо разложившимся торфом.

По данным физико-химических анализов, верхний горизонт торфянисто-мерзлотной почвы характеризуется содержанием: подвижного фосфора — от очень низкого (0.34 мг/кг) до низкого (34.0 мг/кг), подвижного калия — от среднего (56.0 мг/кг) до очень высокого (396 мг/кг), массовой долей оксида кальция — очень низкой (0.11–0.16%), массовой долей оксида магния — очень низкой (0.10–0.30%). Реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) — от очень кислой (4.01) до среднекислой (4.95), емкость катионного обмена составляет 34.0–76.0 мг-экв/100 г почвы. Почвы по степени гидролитической кислотности — очень сильноокислые (35.1–75.4 ммоль/100 г почвы).

2г. Горно-таежные аллювиальные почвы формируются в поймах р. Чара, Намингнакан, Наминга, Нижний Ингамакит, Сангиях и ручья Эмегачи под листовенничными лесами на аллювиальных и делювиальных отложениях. Для этих почв характерна невыявленность профиля, наличие погребенных аллювием горизонтов.

Верхний горизонт горно-таежной аллювиальной почвы характеризуется содержанием: органического вещества — от очень низкого (0.69%) до очень высокого (24.7%), общего азота — от очень низкого (0.02%) до среднего (0.27%), подвижного фосфора — от низкого (20.4 мг/кг) до

высокого (161 мг/кг), подвижного калия — от среднего (48.9 мг/кг) до очень высокого (283 мг/кг), обменного кальция — от очень низкого (0.70 ммоль/100 г почвы) до повышенного (10.35 ммоль/100 г почвы), обменного магния — от очень низкого (0.05 ммоль/100 г почвы) до среднего (2.24 ммоль/100 г почвы). Реакция почвенного раствора — от очень сильнокислой (3.95) до близкой к нейтральной (5.63). Сумма поглощенных оснований составляет 3.4–38.0 ммоль/100 г почвы) с преобладанием обменного кальция. Почвы по степени гидролитической кислотности входят в группы от нейтральных (1.20 ммоль/100 г почвы) до очень сильнокислых (17.3 ммоль/100 г почвы). Преобладающими фракциями в горно-таежной аллювиальной почве являются песок, супесь и легкий суглинок.

Средние содержания подвижных форм химических элементов в почвах хребта Удокан в порядке убывания располагаются следующим образом: $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ti} > \text{As} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Sr} > \text{Sb} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Se} > \text{Ag} > \text{Be}$.

Железо — один из главных компонентов литосферы и составляет приблизительно 5% ее массы, концентрируясь преимущественно в основных сериях магматических пород. Кларк железа в почвах равен 3.8%. Как правило, окислительные и щелочные условия среды способствуют осаждению железа, а кислые и восстановительные — растворению его соединений. Количество растворимого железа составляет незначительную часть от общего его количества. В почвенных водах при обычных уровнях pH количество его составляет от 30 до 550, а в очень кислых — 2000 мкг/л. Поэтому кислые почвы более обогащены железом, чем нейтральные и щелочные [7].

В районе исследования для железа почв было характерно максимальное содержание. Сравнительно большим содержанием подвижных форм элемента отличалась горно-таежная торфянистая мерзлотная почва (565 ± 150 мг/кг). Наименьшее содержание Fe отмечено в горно-тундровой (200 ± 110 мг/кг) и торфянисто-мерзлотной почвах (85 ± 15 мг/кг). Горно-таежная обычная и горно-таежная аллювиальная почвы содержали относительно среднее количество Fe (299 ± 65 и 296 ± 47 мг/кг соответственно).

Алюминий — один из главных компонентов земной коры, присутствует в породах в количестве 0.45–10.0%. Количество растворимых форм элемента составляет 400–460 мкг/л в нейтральной почве. Растворимость Al в зоне почвообразования низкая. Особенно она низка в слабокислых —

в диапазоне нейтральных условий (pH 5.0–8.0) и снижается при старении осадков. В кислых почвах с pH < 5.5 подвижность Al резко возрастет [8].

В районе исследования содержание в почвах подвижных форм элемента составляло 19–60 мг/кг. В горно-тундровой и торфянистой мерзлотной почвах содержание элемента было достоверно больше (в 3 раза), чем в горно-таежной обычной и горно-таежной аллювиальной почвах (рис. 2а). Это вероятно было связано с более высокой кислотностью таких почв.

Марганец является одним из наиболее распространенных микроэлементов в литосфере. Содержание растворенного Mn в почвенном растворе изменяется от 25 до 2200 мкг/л. Марганец может накапливаться в разных почвенных горизонтах, однако обычно аккумулируется в верхнем слое почв вследствие его фиксации органическим веществом. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Mn в горизонте А составило 50–59 мг/кг, в горизонте С — 16–30 мг/кг [1]. Содержание Mn в горной таежной оподзоленной почве Витимского плоскогорья в слое АВ было равно в среднем 76.2 мг/кг [9].

Содержание элемента в почвах Удокана характеризовались значительным варьированием. Типы почв достоверно не отличались по содержанию Mn, содержание элемента находилось в пределах 36.0–58.0 мг/кг, что не превышало ПДК для подвижных элементов почвы. Только торфянистая мерзлотная почва выделялась низким содержанием элемента (6.0 ± 3.0 мг/кг). Возможно, это связано с тем, что содержание Mn корреляционно было связано с величиной pH почвы, содержанием подвижного P, обменного Ca и Na (табл. 1).

Медь — относительно малоподвижный элемент в почвах, и ее суммарное содержание сравнительно слабо варьирует в почвенных профилях, оно меняется в пределах 6–60 мг/кг, достигая максимума в ферралитовых почвах и минимума — в песчаных и органических. Аккумуляция в верхних горизонтах — обычная черта распределения Cu в почвенном профиле. Хотя медь — один из наименее подвижных тяжелых металлов в почве, ее содержание в почвенных растворах достаточно велико во всех типах почв. Содержание подвижной Cu в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России находится в пределах 1.0–6.0 мг/кг, в горных почвах Забайкальского края — 1.1–3.1 мг/кг [10]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижной Cu в горизонте А составило 3.1–4.0, горизонте С — 2.8–3.7 мг/кг [11]. Содержание подвижной Cu в высокогорной таежной почве

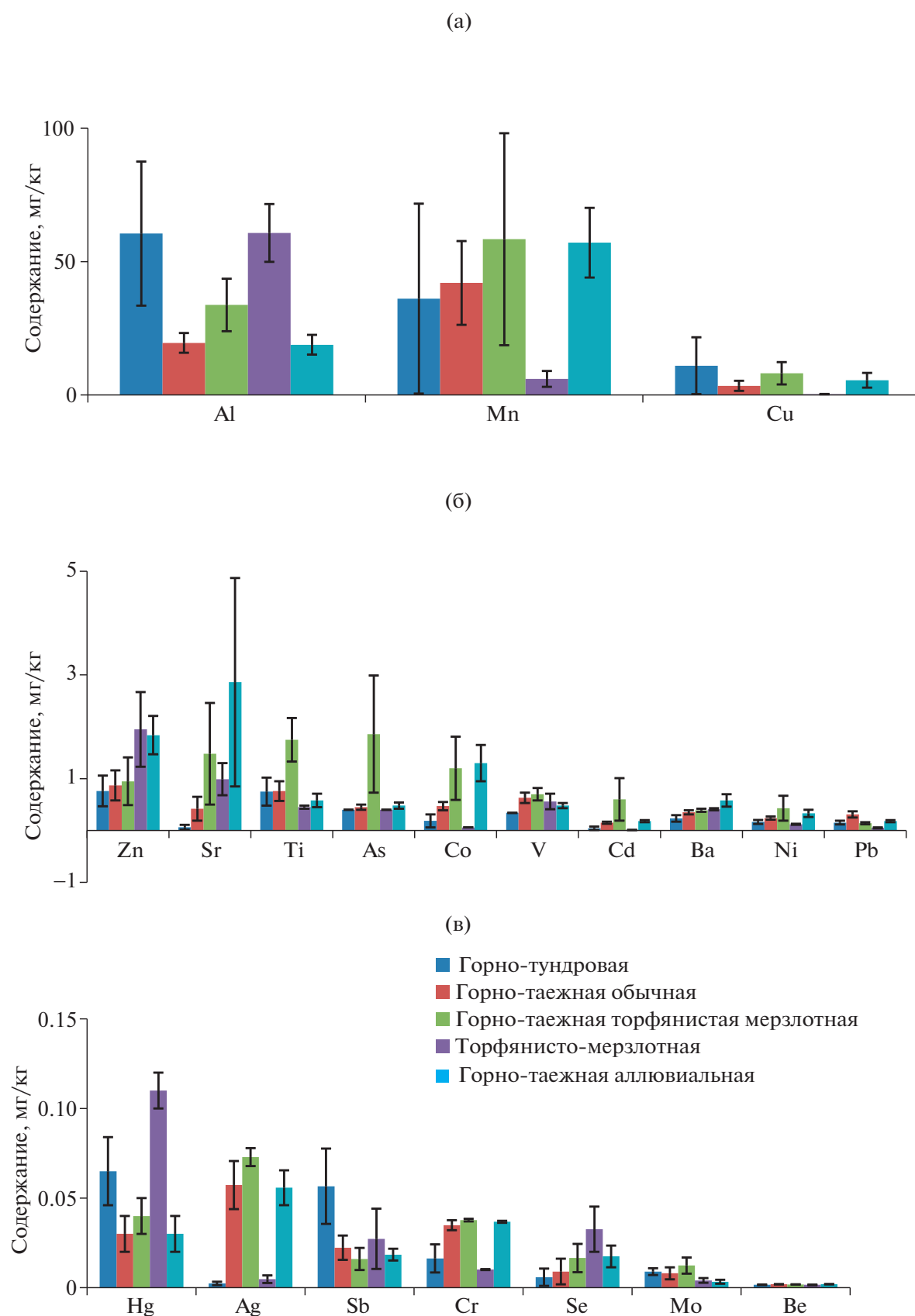


Рис. 2. Содержание химических элементов в почвах на территории Удоканского месторождения меди: (а) – Al, Mn, Cu, (б) – Zn, Sr, Ti, As, Co, V, Cd, Ba, Ni, Pb, (в) – Hg, Ag, Sb, Cr, Se, Mo, Be.

Таблица 1. Корреляция между содержанием химических элементов в почве и ее агрохимическими свойствами (коэффициент Пирсона, t_{05})

	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	Гумус, %	P _{подв}	K _{подв}	N _{общ}	Ca _{обм}	Mg _{обм}	Na _{обм}
Sr							0.57		
Ba							0.58		
Mn	0.57	0.50		0.48			0.47		0.58
Pb	0.47			0.57					
Zn					0.66		0.62	0.49	
Cu			0.49			0.60			
Co	0.52								
As						0.40			0.98
Hg	–0.59					0.62			
Al	–0.50								
V								0.42	
Cr	0.68								
Ag	0.42								
Be	0.45								

Витимского плоскогорья в слое АВ было равно в среднем 4.9 мг/кг [9].

Также как и марганца, содержание Cu статистически по типам почвы не различалось. В почвах района исследования элемент содержался в пределах 5.5–11.0 мг/кг, что превышало ПДК (ГН 2.1.7.2041-06) подвижных элементов в почве в 1.8–3.7 раза. Такой результат, вероятно, связан с тем, что район находится на территории Удоканского месторождения меди. По градации обеспеченности почв России подвижными формами микроэлементов, почвы в таежно-лесной биогеохимической зоне с таким содержанием Cu относятся к очень богатым [12]. Только торфянистая мерзлотная почва выделяется низким ее содержанием (0.30 ± 0.06 мг/кг). Такая почва относится по обеспеченности элементом к очень бедным. Относительно низкое содержание меди в торфянистой мерзлотной почве, вероятно, связано с низким содержанием в почве гумуса и общего азота. Обнаружена корреляция между содержанием в почве меди и содержанием гумуса и общего азота (табл. 1).

Среднее содержание Zn в поверхностных слоях почв различных стран изменяется в пределах 17–125 мг/кг. Концентрация его в почвенных растворах менялась от 4 до 270 мкг/л в зависимости от свойств почвы. Цинк наиболее подвижен и биологически доступен в кислых легких минеральных почвах. Содержание подвижного Zn в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России составляло в среднем 1.09, в горных почвах – 0.62 мг/кг. В Забайкальском крае в черноземных

почвах обнаружено 0.6 мг Zn/кг, в горных почвах – 0.8 мг/кг [10]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Zn в горизонте А составило 0.5–0.6, горизонте С – 0.3–0.6 мг/кг [11].

Содержание Zn в районе исследования было достоверно больше в торфянистой мерзлотной и горно-таежной почвах по отношению к горно-тундровой и горно-таежной обычной почвам и составляло 1.84–1.95 мг/кг, что ниже ПДК подвижных элементов почвы (23.0 мг/кг) и соответствовало средним по обеспеченности элементам почвам (рис. 26). Различия в содержании элемента в почвах, вероятно, были связаны с разной кислотностью почв.

Стронций – распространенный микроэлемент в земной коре, концентрируется преимущественно в магматических породах среднего состава и в карбонатных осадках. Sr легко мобилизуется при выветривании, особенно в кислой окислительной среде. Интервал его содержаний в поверхностных горизонтах составляет 18–3500 мг/кг. В кислых почвах Sr активно вымывается вниз по профилю почвы, в известковых может замещаться различными катионами, в особенности H^+ [13].

Содержание подвижного Sr в почвах района исследования составляло 0.06–2.86 мг/кг. Горно-тундровая почва отличалась от других типов почв значительно более низким содержанием элемента (0.06 ± 0.05 мг/кг). Эта величина в 36 раз меньше содержания элемента в горно-таежной аллювиальной и горно-таежной торфянистой мерзлотной почвах. Различие в содержании элемента в почвах, возможно, было связано с содержанием

Таблица 2. Корреляция между содержанием химических элементов в почве (коэффициент Пирсона, r_{05})

Элемент	Sr	Fe	Mn	Pb	Ni	Cd	Co	Hg	Al	Ti	Cr
Ba	0.51										
Co					0.78						
As			0.54								
Hg				–0.41			–0.42				
Al			–0.42				–0.40	0.48			
Ti		0.66									
V		0.55								0.41	
Mo						0.49					
Cr		0.58	0.44	0.45			0.45	–0.57	–0.66		
Ag							0.43	–0.55	–0.43		0.65
Sb									0.43		
Se								0.53	0.42		
Be			0.41								0.62

в них Ca, с которым Sr активно взаимодействует (табл. 2).

Титан — обычный компонент горных пород, в которых его содержание меняется в пределах 0.03–1.40%. Содержание Ti в поверхностном слое почв в целом составляет 0.1–0.9% [13]. Растворимость Ti считается весьма ограниченной, в почвенных растворах составляет всего 0.03 мг/л, что приводит к возрастанию его абсолютных количеств в верхних горизонтах почв в результате потери части глинистых минералов при выветривании. В районе хребта Удокан содержание подвижных форм элемента составляло 0.58–1.75 мг/кг. Достоверно более высоким содержанием титана отличалась горно-таежная торфянистая мерзлотная почва (1.75 ± 0.42 мг/кг). Это примерно больше в 3 раза, чем в других почвах. Такая разница в содержании элемента, возможно, была связана с более богатыми титаном материнскими породами в местах расположения горно-таежных торфянистых мерзлотных почв. Известно также, что в районе хребта Удокан находится крупнейшее в России Чинейское месторождение титаномагнетитовых руд.

Мышьяк характеризуется довольно однородным распределением в главных типах горных пород. Его содержание, как правило, меняется в пределах 0.5–2.5 мг/кг, и лишь в глинистых отложениях оно относительно велико (13 мг/кг). Наиболее низкое содержание As характерно для песчанистых почв, а максимальное — связано с аллювиальными почвами и почвами, обогащенными органическим веществом [13]. Подвижность As прямо пропорциональна его поступлению и обратно — времени и содержанию железа и алюми-

ния. В экспериментах в водную вытяжку переходит 5–10% содержащегося в почве элемента [14].

В районе исследования содержание подвижных форм As составляло 0.4–1.9 мг/кг. Подобно Ti, содержание As было больше (в 4 раза) в горно-таежной торфянистой мерзлотной почве (1.86 ± 1.13 мг/кг) по отношению к другим типам почв. Возможно, это было связано, относительно других типов почв, с большим содержанием железа в горно-таежной торфянистой мерзлотной почве. Известно, что в почве мышьяк предпочтительнее образует малорастворимые соединения с гидроксидами железа [15].

В земной коре высокие концентрации кобальта характерны для ультраосновных пород (100–220 мг/кг), а его содержание в кислых породах значительно меньше (1–15 мг/кг). Концентрация Co в растворах большинства почв, как правило, достаточно низкая и изменяется от 0.3 до 87 мг/л. Содержание подвижного Co в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России находится в пределах 0.5–3.1 мг/кг. В черноземных почвах Забайкальского края содержится 0.9–2.2 мг Co/кг, в горных почвах — 0.6...–1.8 мг/кг [10]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Co в горизонте A составило 0.8–1.0, горизонте C — 0.5–0.6 мг/кг [11].

В почвах хребта Удокан достоверно большее содержание элемента отмечено в горно-таежной торфянистой мерзлотной и горно-таежной аллювиальной почвах (1.2–1.3 мг/кг). Такое содержание элемента характеризует почву как среднеобеспеченную. Относительно низким содержанием Co отличалась торфянистая мерзлотная почва (0.06 ± 0.00 мг/кг). Содержание элемента в

почвах было значительно меньше ПДК. Для подвижных элементов почвы установлена ПДК, равная 5.0 мг/кг. Относительно низкое содержание Со в торфянистой мерзлотной почве, вероятно, объясняется более низким рН почвы (табл. 1). Содержание элемента в кислых породах значительно меньше [13].

Ванадий концентрируется преимущественно в основных породах и сланцах в пределах 100–250 мг/кг. Известна склонность V ассоциироваться с органическим веществом, поэтому в органических сланцах и биолитах его содержание обычно повышено. В целом распределение этого элемента в почвенном профиле довольно однородно, а существующие вариации обусловлены составом материнских пород. Как правило, самое высокое содержание V (150–460 мг/кг) характерно для почв, развитых на основных породах, а самое низкое (5–22 мг/кг) – для торфянистых почв. Суглинистые и песчаные почвы, как и ферралитные, также содержат повышенное количество V, превосходящее его количество в материнских породах. Среднее мировое валовое содержание V в почвах оценивается в 90 мг/кг [13].

Почвы хребта Удокан не различались достоверно по содержанию подвижных форм элемента (0.34–0.70 мг/кг). Относительно низкое содержание V отмечено в горно-тундровой почве (0.34 ± 0.00 мг/кг).

Распространенность кадмия в магматических и осадочных породах не превышает 0.3 мг/кг. Концентрируется Cd в глинистых осадках и сланцах. Среднее содержание элемента в почвах варьирует от 0.07 до 1.1 мг/кг. Элемент наиболее подвижен в кислых почвах в интервале рН 4.5–5.5, тогда как в щелочных он относительно неподвижен. В почвах, развивающихся в условиях гумидного климата, миграция Cd вниз по профилю более вероятна, чем его накопление в поверхностном горизонте почв.

В районе исследования содержание подвижного Cd находилось в пределах 0.01–0.60 мг/кг. Относительно высоким содержанием элемента отличалась горно-таежная мерзлотная торфянистая почва (0.60 ± 0.41 мг/кг). Возможно, большее содержание элемента в почве связано с тем, что горно-таежные мерзлотные почвы формируются на плоских или полого наклоненных участках, где и происходит накопление элемента.

В земной коре барий концентрируется преимущественно в средних и кислых магматических породах, при этом пределы его содержания составляют, как правило, 400–1200 мг/кг. В почвах Ba легко мобилизуется в различных условиях,

поэтому его количество в почвенных растворах обнаруживает значительные вариации.

В районе хребта Удокан содержание подвижного Ba в почвах находилось в пределах 0.23–0.58 мг/кг. Более высокое содержание элемента характерно для горно-таежной аллювиальной почвы (0.58 ± 0.12 мг/кг) и относительно низкое – для горно-тундровой почвы (0.23 ± 0.06 мг/кг).

Содержание Ni в почвах мира изменяется в широких пределах – от 1 до ≈ 100 мг/кг. Самое высокое содержание Ni отмечено в глинистых и суглинистых почвах, в почвах на основных и вулканических породах и в почвах, богатых органическим веществом. Особенно высокими уровнями содержания отличаются торфянистые серпентинитовые почвы, в которых никель присутствует в виде легкорастворимых органических комплексов [13].

Содержание подвижного элемента в почвах района исследования достоверно не различалось и находилось в пределах 0.17–0.43 мг/кг. Это не превышало ПДК подвижных элементов в почве (4.0 мг/кг). Только торфянистая мерзлотная почва содержала относительно меньшее его количество (0.12 ± 0.01 мг/кг). Вероятно, это было связано с тем, что с увеличением кислотности горных пород содержание Ni уменьшалось. Известно также, что в распределении никеля, кобальта в земной коре отмечено большое сходство [13].

Свинец в земной коре накапливается в кислых сериях магматических пород и в глинистых осадках. Среднее содержание в разных типах почв составляет 10–67 мг/кг. Pb среди тяжелых металлов наименее подвижен. Наибольшее содержание металла обнаруживают в обогащенном органическим веществом верхнем слое необрабатываемых почв. Содержание растворимых форм Pb в водных вытяжках составляет в тундровых оподзоленных почвах в горизонтах А–С от 3 до 17 мг/л. Наибольшая растворимость Pb характерна для кислых дерново-подзолистых почв [14].

В почвах хребта Удокан достоверно большее содержание подвижного Pb обнаружено в горно-таежной обычной почве (0.31 ± 0.06 мг/кг), самое низкое содержание – в торфянистой мерзлотной почве (0.05 ± 0.01 мг/кг). Разница в содержании элемента, возможно, связана с большим накоплением органического вещества в поймах рек и на южных склонах, где преимущественно располагаются горно-таежные обычные почвы. Содержание элемента в почве значительно меньше ПДК подвижных элементов почвы (6.0 мг/кг).

Во всех типах магматических пород содержание Hg очень низкое. Более высокое содержание

этого элемента характерно для осадочных пород, глинистых сланцев и особенно богатых органическим веществом глинистых сланцев. Содержание элемента в верхнем слое почвы в несколько раз больше, чем в подпочвенных горизонтах. Среднее содержание Hg в поверхностном слое почв не превышает 400 мкг/кг. Валовое содержание Hg в почвообразующих породах Забайкалья в основном изменяется от 0.004 до 0.024 мг/кг, наиболее часто встречающееся содержание — 0.004–0.01 мг/кг. Фоновое валовое содержание Hg в почвах Забайкалья составляет 0.018 мг/кг, что больше кларка почв (0.01 мг/кг) [16]. ПДК валового содержания Hg в почве с учетом кларка равно 2.1 мг/кг.

В районе исследования в торфянистой мерзлотной почве обнаружено достоверно большее содержание подвижных форм элемента ($0.11 \pm \pm 0.01$ мг/кг). Это в 2.6 раза больше, чем среднее содержание в других типах почв, равное 0.03–0.07 мг/кг. Содержание Hg в горно-тундровой почве достоверно больше, чем в горно-таежной и горно-таежной аллювиальной почвах (рис. 2в). Такой результат, вероятно, связан с тем, что горно-таежные аллювиальные почвы, расположенные в поймах рек, содержат больше органического вещества, чем горно-тундровые почвы.

Геохимические свойства Ag похожи на свойства Cu, но его содержание в породах примерно в 1000 раз меньше. Обычный уровень содержания серебра в почвах составляет 0.03–0.09 мг/кг.

Содержание подвижных форм серебра в почвах хребта Удокан значительно различалось. Низкое содержание Ag отмечено в горно-тундровой и торфянистой мерзлотной почвах (0.002–0.005 мг/кг). Это в 18 раз меньше среднего содержания элемента в других типах почв (0.56–0.073 мг Ag/кг). Возможно, низкое содержание серебра в почвах было связано с величиной pH и взаимодействием химических элементов. Обнаружена корреляционная связь содержания Ag с pH почвы и содержанием Co, Cr, Hg, Al (табл. 1).

В верхних слоях почв содержание Sb изменяется от 0.05 до 4.0 мг/кг. Кларк почвы равен 1.0 мг Sb/кг. В районе хребта Удокан содержание подвижных форм Sb находится в пределах 0.02–0.06 мг/кг. В горно-тундровой почве было достоверно большее содержание элемента, чем в других типах почв, кроме торфянистой мерзлотной почвы. Известно, что содержание сурьмы в почве может быть связано с месторождениями цветных металлов [13], например, меди, содержание которой в горно-тундровой почве больше, чем в других почвах. В наших исследованиях обнаружена

достоверная положительная корреляция между содержанием в почве сурьмы и меди (табл. 2).

Наиболее значительное содержание Cr характерно для ультраосновных и основных горных пород. Содержание Cr в кислых изверженных и осадочных породах значительно меньше и в общем случае изменяется в пределах 5–120 мг/кг.

В почвах района исследования выявлены значительные различия в содержании элемента. Достоверно относительно низким содержанием Cr характеризовались горно-тундровая и торфянисто-мерзлотная почвы, что могло быть связано с различной кислотностью почвы и взаимодействием элементов (табл. 2). Содержание Cr в других типах почв было близким по величине (0.03–0.04 мг/кг). ПДК подвижного Cr составляет 6.0 мг/кг.

Содержание Se в магматических породах редко превышает 0.05 мг/кг. Наименьшее его содержание отмечено в песчаниках и известняках. Среднее валовое содержание Se в поверхностном слое почв земного шара составляет 0.40 мг/кг. В Китае в эндемических по недостатку селена районах содержание его растворимой формы варьирует от 0.0002 до 0.002 мг/кг [14]. Почвы района исследования достоверно не отличались по содержанию подвижных форм элемента (0.009–0.033 мг Se/кг). Только в торфянистой мерзлотной почве содержание Se было достоверно больше, чем в горно-тундровой почве, что возможно объясняется взаимодействием элементов. Отмечена положительная корреляция содержания в почве Se с содержанием в ней Hg и Al (табл. 2).

Содержание Mo в почвах обычно близко к его количеству в материнских породах, а в почвах мира изменяется в пределах 0.013–17.0 мг/кг. Содержание подвижного Mo в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России составляет в среднем 0.16 мг/кг, в горных почвах — 0.74 мг/кг [9]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Mo в горизонте А составило 0.05–0.08, горизонте С — 0.04–0.06 мг/кг [11].

Содержание подвижных форм элемента в почвах хребта Удокан было близким по величине (0.008–0.012 мг/кг). В то же время относительно низким содержанием Mo отличались торфянистая мерзлотная и горно-таежная аллювиальная почвы (0.003–0.004 мг/кг). Известно, что растворимость и доступность молибдена для растений во многом зависят от pH среды и условий дренирования почв. Содержание молибдена в почвах обычно близко к его количеству в материнских породах [13]. По градации обеспеченности почв

подвижными микроэлементами почвы Удокана относятся к очень бедным [12].

Бериллий обнаруживается повсеместно, присутствует в относительно малых количествах (<10 мг/кг) в главных типах пород. Содержание валового Be в почвах изменяется в пределах 1.2–13.0 мг/кг. Кларк валового содержания Be для почв составляет 1.7 ± 0.5 мг/кг. Концентрация элемента в почвенном растворе составляет 0.4–1.0 мкг/л [8]. Подвижные формы Be в почвах хребта Удокан по типам почв статистически не отличались, что составляло ≈ 0.002 мг Be/кг.

Расположение места отбора почвы над уровнем моря было коррелятивно связано с содержанием в почвах гумуса ($r = 0.42$), обменного Ca ($r = -0.48$), Mg ($r = -0.47$) и таких микроэлементов как Sr ($r = -0.40$), Ba ($r = -0.47$), Co ($r = -0.40$) и Al ($r = 0.44$).

Между агрохимическими показателями почвы также выявлены корреляционные связи. Например, с величиной pH водной и солевой вытяжек было связано содержание в почвах подвижного P и обменного Ca. Статистически достоверные коэффициенты корреляции Пирсона находились в пределах 0.40–0.52. Кроме того, обнаружена зависимость содержания в почве обменного Ca с содержанием подвижных P и K, коэффициент Пирсона соответственно был равен 0.43 и 0.84, а также между обменными Na и Mg ($r = 0.40$).

На содержание химических элементов в почве влияли ее агрохимические свойства. Например, с величиной pH_{H2O} коррелятивно было связано содержание в почве таких микроэлементов как Mn, Pb, Co, Hg, Al, Cr, Ag и Be. Количество обменного кальция коррелировало с содержанием в почве Sr, Ba, Mn и Zn (табл. 1). Также между содержанием химических элементов в почве обнаружены статистически достоверные коррелятивные связи. По количеству таких связей с элементами можно выделить Al, Cr, Co и Hg (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило выявить особенности содержания подвижных форм химических элементов в различных типах почв на территории Удоканского месторождения меди. Содержание ряда химических элементов статистически различалось в зависимости от типа почв.

Горно-тундровая почва характеризовалась относительно высоким содержанием гумуса, общего N, подвижных форм Al, Mn, Cu, Hg, Sb и относительно низким содержанием подвижных форм P, K, Fe, Zn, Sr, As, Co, V, Cd, Ba, Ni, Ag, Cr, об-

менного Ca и Mg. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Al > Mn > Cu > Zn > Ti > As > V > Ba > Co > Ni > Pb > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be.

Горно-таежная обычная почва характеризовалась относительно высоким содержанием подвижного P, обменного Mg, подвижных форм Ag, Cr и относительно низким содержанием гумуса, общего N, обменного Ca, подвижных форм Al, Cu, Zn, Cr, As, Co, Cd, Hg, Sb, Se. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Mn > Al > Cu > Zn > Ti > V > Co > As > Sr > Ba > Pb > Ni > Cd > Ag > Cr > Hg > Sb > Se > Mo > Be.

Горно-таежная торфянисто мерзлотная почва характеризовалась относительно высоким содержанием гумуса, общего N, обменного Ca, Mg, подвижных форм Fe, Mn, Sr, Ti, As, Co, V, Cd, Ni, Ag, Cr, Mo и относительно низким содержанием подвижных форм P, K, Al, Zn, Hg, Sb. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Mn > Al > Cu > As > Ti > Sr > Co > Zn > V > Cd > Ni > Ba > Pb > Ag > Hg > Cr > Se > Sb > Mo > Be.

Торфянисто-мерзлотная почва характеризовалась относительно высоким содержанием подвижных форм K, Al, Zn, V, Ba, Hg, Sb, Se и относительно низким содержанием P, Fe, Mn, Cu, Cr, Ti, As, Co, Cd, Ni, Pb, Ag, Cr, Mo. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Al > Mn > Zn > Sr > V > Ti > Ba > As > Cu > Ni > Hg > Co > Pb > Se > Sb > Cr > Cd > Ag > Mo > Be.

Горно-таежная аллювиальная почва характеризовалась относительно высоким содержанием обменного Ca и Mg, подвижных форм P, Mn, Zn, Sr, Co, V, Ba, Ni, Ag, Cr и относительно низким содержанием подвижных форм Al, Ti, As, Hg, Sb, Mo. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Mn > Al > Cu > Sr > Zn > Co > Ba > Ti > As > V > Ni > Pb > Cd > Ag > Cr > Hg > Sb > Se > Mo > Be.

Обнаружена корреляционная связь содержания Sr, Ba, Co и Al с высотой расположения над уровнем моря места отбора почвенных проб, а также корреляционные связи ряда химических элементов с агрохимическими свойствами почвы и между собой. Содержание химических элементов в почве не превышало ПДК, кроме меди.

Представленное исследование проведено в районе хребта Удокан впервые. Оно позволяет организовать наблюдения за изменением качества окружающей среды, учитывать их при орга-

низации выращивания растений. Работа вносит определенный вклад в изучение природы и экологии севера Забайкальского края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пелымский Г.А., Лантева Н.И. Благородные металлы в рудах Удокана // Жизнь Земли. 2010. Т. 32. С. 88–91.
2. Зиновьев Ю.И. Геохимические особенности Сакуканских отложений и медных руд Удокана // Горный информ.-аналит. бюл. 2009. № 53. С. 63–68.
3. Замана Л.В., Усманов М.Т., Борзенко С.В. Гидрогеохимия рек по трассе проектируемого нефтепровода “Восточная Сибирь–Тихий океан” в междуречье Витим–Олекма // Водн. ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 345–355.
4. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, ГИРЗ, Минсельхоз СССР, 1973. 93 с.
5. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.
6. Природные условия освоения Севера Читинской области. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 127 с.
7. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справ-к. В 6 кн. М.: Экология, 1995. Кн. 4. Главные d-элементы. 416 с.
8. Иванов В.В. Экологическая химия элементов: Справ-к. М.: Недра, 1994. Кн. 3. 304 с.
9. Иванов Г.М. Микроэлементы-биофилы в ландшафтах Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. 239 с.
10. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970. 180 с.
11. Абашеева Н.Е. Агрохимия почв Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1992. 214 с.
12. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия. М.: Колос, 2002. 583 с.
13. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
14. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справ-к. В 6 кн. М.: Недра, 1996. Кн. 3. Редкие р-элементы. 352 с.
15. Солодухина М.А., Юргенсон Г.А. Мышьяк в ландшафтах Шерловогорского рудного района (Восточное Забайкалье). Чита: ЗабГУ, 2018. 176 с.
16. Иванов Г.М., Кашин В.К. Ртуть в гумусовых горизонтах почв Забайкалья // Почвоведение. 2010. № 1. С. 30–36.

Content of Chemical Elements in Soils on the Territory of the Udokan Copper Deposit

V. P. Makarov^{a, #}, N. Yu. Mikheeva^a, and S. V. Borzenko^a

^a Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
ul. Nedorezova 16a, Chita 672014, Russia

[#]E-mail: vm2853@mail.ru

The article deals with the features of the distribution of mobile forms of chemical elements in various types of soil on the territory of the Udokan copper deposit, in the Kalarsky district of the Trans-Baikal Territory. The aim of the work was to identify the features of the distribution of chemical elements in the soils of the Udokan copper deposit area. Soil cover studies were conducted in June and August 2011. The content of chemical elements was determined in mountain-tundra and mountain-taiga soils. 36 soil sections were laid, and a morphological description of the sections was carried out. The analysis of the elemental composition by soil type was carried out at a depth of up to 50 cm. The content of 21 trace elements in the soil was determined. The average content of mobile elements in the soils on the territory of the copper deposit was in the following sequence: Fe > Al > Mn > Cu > Zn > Ti > As > V > Ba > Co > Ni > Pb > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be. The studied soil types differed in the concentration of chemical elements, and a correlation was found between the elements and the height of the sampling site above sea level. The results obtained can be used to study changes in the quality of the environment in the research area. In general, the concentration of chemical elements in the soils was significantly lower than their average content in the earth's crust.

Key words: Udokan copper deposit, soils, chemical elements.

УДК 632.122.1:546.47/48:631.445.24:633.16

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИИ Cd И Zn В СИСТЕМЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ ПОЧВА–ПОЧВЕННЫЙ РАСТВОР–ЯЧМЕНЬ ПРИ СОВМЕСТНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

© 2021 г. Л. Н. Анисимова^{1,*}, В. С. Анисимов¹, П. Ю. Волкова¹, Д. В. Крыленкин¹,
Р. А. Фригидов¹, А. И. Санжаров¹, Д. В. Дикарев¹, А. В. Саруханов¹, Ю. Н. Корнеев¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 109 км, Россия*

*E-mail: lanisimovan@list.ru

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

После доработки 07.05.2021 г.

Принята к публикации 12.06.2021 г.

Изучены закономерности (дозовые и временные зависимости) конкурентного взаимодействия тяжелого металла (ТМ) — ксенобиотика (Cd) и микроэлемента (Zn) в системе почва—почвенный раствор—растение. Исследованы в динамике переход ТМ в почвенный раствор, транслокация в различные органы растения, изменение биомассы растений. Установлены параметры уравнений, аппроксимирующих соответствующие процессы. Для всех вариантов опыта отмечено существенное увеличение содержания Zn и Cd в корнях ячменя (в отличие от надземных органов) с возрастом. Выявлено существенное снижение концентрации кадмия в корнях с увеличением количества (дозы) внесенного цинка при неизменной концентрации Cd в надземных органах. Рассчитаны отношения массовых концентраций [Cd] : [Zn] в надземных органах и корнях ячменя, которые резко снижались при дополнительном внесении в почву Zn. Анализ экспрессии генов в корнях растений ячменя на 19-е сут прорастания указывал на возможное снижение производства H₂S в клетках растений при воздействии ТМ, снижении транспорта Zn и увеличении концентраций стрессового фитогормона АБК, а также показал возможное снижение аккумуляции Zn и Cd в растениях за счет подавления экспрессии гомолога АТФазы — HMA4.

Ключевые слова: кадмий, цинк, миграция, почва, почвенный раствор, ячмень, экспрессия генов.

DOI: 10.31857/S0002188121090039

ВВЕДЕНИЕ

Закономерности миграции в почве и транслокации в различные части растений тяжелых металлов (ТМ) являются теоретическим базисом, на основе которого формируются научно-практические подходы к решению проблемы реабилитации техногенно-загрязненных территорий. Основными аспектами последней являются снижение миграционной способности ТМ в почве и перехода их в природные воды, а также ограничение транслокации в сельскохозяйственные растения. Для системы почвенный раствор—растение изучение закономерностей корневого поглощения ТМ и их транслокации в растения позволяет вскрыть механизмы слежения за этими процессами на разных уровнях организации растительного организма. Интересно изучение закономерностей (дозовых и временных зависимостей) конкурентного взаимодействия ТМ-ксенобиотиков (например, Cd) с микро- и макроэлементами на

этапе поглощения из субстрата корнями и последующей транслокации, а также ответных реакций растений как на физиолого-биохимическом уровне (в виде изменения фитотоксичности ТМ-ксенобиотиков), так и на молекулярно-генетическом уровне (изучение экспрессии ряда генов-кандидатов). Доступность растениям (подвижность) ТМ определяется свойствами почвы, изменяя которые можно существенно влиять на их накопление в растительной продукции. К почвенным факторам относятся: гранулометрический состав, содержание органического вещества, реакция среды, емкость катионного обмена, содержание подвижных соединений железа, марганца, алюминия, фосфора и др. [1, 2]. В работе приведены результаты комплексного вегетационного эксперимента. Исследования проводили с растениями ячменя (*Hordeum vulgare* L.) на фоне загрязнения почвы 2-мя ТМ: биогенного Zn и ксенобиотика Cd. Цинк необходим для жизнеде-

тельности растений, поскольку принимает участие в белковом и углеводном обмене, окислительных процессах, влияет на формирование генеративных органов, проницаемость мембран, стабилизирует клеточные компоненты. Zn участвует также в синтезе РНК и хлорофилла [2]. В малых количествах, являясь жизненно важным элементом, при накоплении в высоких концентрациях Zn может оказывать токсическое действие на организм [3, 4]. Тем не менее, уровень фитотоксичных концентраций его в тканях растений достаточно высок: 100–500 мг/кг [4]. Поглощение Zn корнями растений может быть как активным процессом, так и пассивным, в зависимости от его концентрации в субстрате [3–5]. Механизмы процессов поглощения и транслокации ТМ растениями установлены не полностью, поэтому требуется проведение дальнейших исследований по изучению закономерностей корневого поглощения поллютантов. В системе почва–растение фитотоксичность Zn контролируется не только способностью растений ограничивать поступление ТМ, но и эдафическими свойствами почв.

Загрязнение почвы кадмием является одним из наиболее опасных экологических явлений. Кадмий по химическим свойствам близок к цинку и отличается от него еще большей подвижностью в кислых средах. Концентрация Cd в почвенных растворах находится в интервале 0.2–6 мкг/л [4]. Содержание Cd в растениях зависит от концентрации его подвижных форм в почве. В незагрязненных почвах его содержание в сухой биомассе растений, как правило, не превышает 0.1–0.8 мг/кг [6]. Биологическая роль Cd изучена очень слабо. Известно, что Cd – токсикант, канцероген, тератоген. Он негативно влияет на рост и развитие растений [4, 7]. Считается, что кадмий выступает в роли природного антагониста цинка, препятствуя поступлению последнего в растения [4, 6]. Поступление Cd в надземные части происходит по барьерному типу [8, 9]. Высокая фитотоксичность кадмия объясняется его близостью по химическим свойствам к цинку. Кадмий может выступать в роли цинка во многих биохимических процессах, нарушая работу таких ферментов как карбоангидраза, различные дегидрогеназы, фосфатазы, связанных с дыханием растений и другими физиологическими процессами, а также протеиназ и пептидаз, участвующих в белковом обмене, ферментов обмена нуклеиновых кислот и др. Как химический аналог цинка, кадмий может заменять его в ферментной системе, необходимой для фосфорилирования глюкозы и сопровождающей процесс образования и потребления углеводов [6].

Особенности транспорта, накопления кадмия и цинка, а также морфологического ответа растений на их комплексное действие, по-видимому, связаны с дифференциальной экспрессией генов, вовлеченных в транспорт этих ТМ и в ответ растений на их накопление. Среди потенциальных генов, экспрессия которых в корнях может отражать особенности транспорта и накопления цинка и кадмия при совместном действии, можно выделить гомологи генов *DCD*, *LCD*, *ZIP4*, *HMA4*, *PCR1*. Функции данных генов в основном известны из исследований на модельном растении *Arabidopsis thaliana* L., а информация об экспрессии их гомологов у сельскохозяйственных культур фрагментарна. Ген *DCD* кодирует D-цистеиндесульфгидразу, разлагающую D-цистеин на пироват, сероводород (H_2S) и аммиак (NH_3). Молекулы газа H_2S участвуют в ответе растений на кадмиевый стресс, а производство H_2S при участии D-цистеиндесульфгидразы увеличивает устойчивость к кадмию в модельном растении *A. thaliana*. Мутантная линия, в которой был нокаутирован ген *DCD*, аккумулировала больше кадмия и активных форм кислорода (АФК) и в целом характеризовалась повышенной чувствительностью к кадмию. В то же время трансгенная линия, сверхэкспрессирующая *DCD*, характеризовалась сниженным накоплением кадмия и АФК, а также была более устойчива к кадмию по сравнению с растениями дикого типа. Активация экспрессии гена *DCD* в ответ на воздействие кадмия связана с работой индуцируемого кадмием транскрипционного фактора WRKY13 [10]. Ген *LCD* кодирует L-цистеиндесульфгидразу, разлагающую L-цистеин также на пироват, сероводород и аммиак. Таким образом, белки *DCD* и *LCD* участвуют в производстве H_2S , который связан с устойчивостью растений и других организмов к действию кадмия [11]. По-видимому, H_2S , продуцируемый *DCD* и *LCD*, может снижать накопление кадмия за счет усиления экспрессии генов, кодирующих транспортеры кадмия из клетки в апопласт [10]. *PCR1* кодирует белок plant cadmium resistance 1 (*PCR1*), и растения с повышенной экспрессией этого гена более устойчивы к действию кадмия [12], при этом белок *PCR1* вовлечен в радиальный транспорт кальция Ca^{2+} в корнях и его дальнейшее перемещение в надземную часть растений [13]. Усиление экспрессии этого гена и снижение аккумуляции кадмия также может быть вызвано действием H_2S , синтезирующегося в реакциях с участием цистеиндесульфгидраз [10]. Ген *ZIP4* кодирует предшественник цинкового транспортера 4, который принадлежит к белковому семейству *ZIP*. Транскрипционная активность гена

ZIP4 повышается в ответ на дефицит цинка в корнях и побегах. Использование экзогенной абсцизовой кислоты (АБК) ингибирует экспрессию *ZIP4* в растениях *A. thaliana*, подвергшихся воздействию кадмия [14]. Экспрессия гена *ZIP4* взаимосвязана с локальными концентрациями цинка в корнях и побегах растений [15–17]. *HMA4* кодирует АТФазу 4, ассоциированную с ТМ, которая связана с загрузкой Cd^{2+} в ксилему для транспорта от корней к побегам [10]. Эта АТФаза также участвует в транслокации цинка от корней к побегам, а повышенная экспрессия гена *HMA4* приводит к гипераккумуляции кадмия и цинка в растениях [18]. Экспрессия данного гена регулируется жасмонатным сигнальным путем: добавление в среду экзогенного метилжасмоната приводит к снижению экспрессии *HMA4* и уменьшению накопления кадмия [19].

Цель работы — выявление закономерности распределения и оценка параметров миграции Zn и Cd в системе почва—почвенный раствор—растение в динамике в условиях совместного загрязнения дерново-подзолистой почвы легкого гранулометрического состава этими ТМ, а также анализ экспрессии вышеупомянутых генов, связанных с транспортом и накоплением Zn и Cd в корнях экспериментальных растений и с ответом на ТМ-стресс.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ закономерностей миграции Cd и Zn в системе дерново-подзолистая почва—почвенный раствор—ячмень. Поведение Zn и Cd в системе почва—растение изучали в вегетационных опытах в теплице до достижения растениями возраста 79 сут (температура 25–35°C, относительная влажность воздуха 60–70%, влажность почвы — 55% ПВ), (рис. 1).

Объектом исследования был ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Зазерский 85, выращенный на дерново-подзолистой супесчаной почве, тяжелые металлы Zn и Cd. Физические и химические показатели почвы определяли общепринятыми методами (табл. 1) [20, 21]. Варианты опыта — $\text{Cd}_{10}\text{Zn}_0$, $\text{Cd}_{10}\text{Zn}_0$, $\text{Cd}_{10}\text{Zn}_{50}$, $\text{Cd}_{10}\text{Zn}_{100}$, $\text{Cd}_{10}\text{Zn}_{150}$. Максимальный возраст тест-растений — 79 сут. Повторность вегетационного опыта четырехкратная.

Растения выращивали в пластиковых сосудах, содержащих 5 кг почвы. Были высажены пророщенные 3-суточные семена в количестве 25 шт./сосуд. Не менее чем за 30 сут перед посадкой проростков в почву вносили Zn в виде водного раствора нитрата в количестве 0 (контроль), 50,

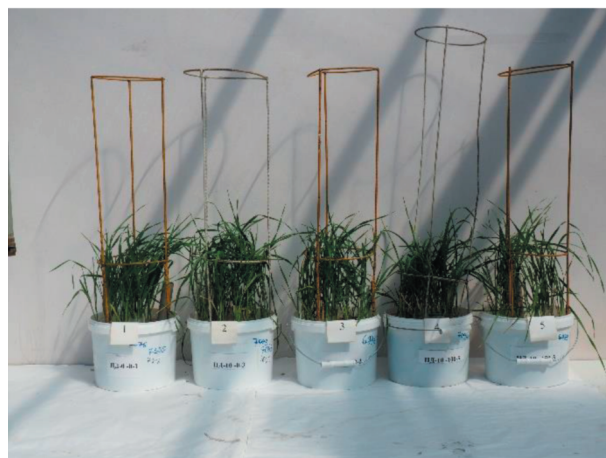


Рис. 1. Вегетационный опыт с совместным внесением Zn и Cd в дерново-подзолистую супесчаную почву (тепличный бокс).

100, 150 мг/кг, вместе с Cd (также в виде водного раствора нитрата) в количестве 10 мг/кг. Дозы ТМ подбирали, исходя из установленных в предыдущих исследованиях [7] субкритических

Таблица 1. Основные характеристики исследованной дерново-подзолистой почвы

Показатель	
pH_{KCl}	5.05 ± 0.01
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	6.04 ± 0.01
Гумус, %	1.0 ± 0.01
H^+ , мг-экв/100 г почвы	1.89 ± 0.02
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	5.3 ± 0.1
Обменный K_2O , мг/кг (по Масловой)	77.7 ± 1.3
Подвижный P_2O_5 , мг/кг (по Кирсанову)	127 ± 1.9
Zn валовый, мг/кг почвы	30.7 ± 2.2
Cd валовый, мг/кг почвы	0.4 ± 0.02

концентраций металлов для дерново-подзолистой почвы. Общая концентрация цинка в почве при этом составляла 30.7, 80.7, 130.7, 180.7 мг/кг, кадмия — 0.4 и 10.4 мг/кг. Затем добавляли питательные элементы в виде водных растворов солей (NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , K_2SO_4) из расчета $\text{N}_{200}\text{P}_{100}\text{K}_{100}$. При этом в каждом варианте, включая контрольный, количество внесенного азота корректировали с помощью азотнокислого аммония до указанной величины содержания его в почве 200 мг/кг.

После внесения растворов солей почву в сосудах инкубировали в течение 30 сут. Контролем служил вариант $\text{NPKZn}_0\text{Cd}_0$. Отдельные показатели регистрировали в динамике. Для этого из части сосудов через 18, 40, 60 и 79 сут после посева снимали урожай надземной биомассы, проводили анализ морфометрических показателей растений, извлекали почвенные растворы и определяли формы нахождения ТМ в почвах. Концентрацию Zn и Cd в корнях и надземных частях ячменя, содержание подвижных форм и валовое количество элементов в почвах определяли в соответствии с методиками [20–22]. Квазиравновесные почвенные растворы были получены центрифугированием в соответствии с методикой [23]. В почвенных растворах определяли pH, содержание Zn, Cd, микро- и макроэлементов. Концентрацию Zn и Cd определяли методом ICP-OES на приборе Liberty II фирмы “Varian”.

Прирост надземной биомассы растений описывали с помощью логистической (S-образной) функции [23–25]:

$$M(t) = \frac{M_{\max}}{1 + \frac{M_{\max}}{M_0} \times \exp(-\mu \times t)}, \quad (1)$$

где $M_{\max}$ — максимальная возможная масса 1-го растения, г, M_0 — начальная масса 1-го растения (расчетная величина), г, μ — удельная скорость прироста биомассы растения, сут^{-1} , t — время, сут.

Содержание Zn и Cd в растениях увеличивается в ходе онтогенеза. При этом зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах растений от времени носит асимптотический характер, приближаясь к максимуму $[\text{Zn}]_{\max, \text{раст}}$, характерному для каждой концентрации Zn в почве и вида растения. Подобная зависимость может быть описана уравнением:

$$[\text{Zn}]_{\text{раст}} = [\text{Zn}]_{\max, \text{раст}} \times [1 - \exp(-\beta t)], \quad (2)$$

где $[\text{Zn}]_{\text{раст}}$ — концентрация Zn в растении, мг/кг, β — константа накопления металла, сут^{-1} , t — время.

Величины параметров уравнений (1), (2) — $M_{\max}$, M_0 , μ , $[\text{Zn}]_{\max, \text{раст}}$ и β подбирали с использо-

ванием модуля “поиск решения” программы Excel с алгоритмом последовательных итераций, с минимизацией ошибки $E = \sum [K_c(\text{расч}) - K_c(\text{измерен})]^2$.

Для характеристики степени криволинейной зависимости использовали корреляционное отношение η , величины ошибки (s_η) и критерия существенности корреляционного отношения (t_η) [26]. Корреляционное отношение рассчитывали по формуле:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2 - \sum (Y - \bar{Y}_x)^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

где $\sum (Y - \bar{Y})^2$ — сумма квадратов отклонения индивидуальных величин Y от общей средней арифметической $\bar{Y}$, $\sum (Y - \bar{Y}_x)^2$ — сумма квадратов отклонений вариант от рассчитанных на основании аппроксимирующего уравнения средних величин зависимой переменной ($\bar{Y}_x$), соответствующих фиксированным величинам аргумента X . Ошибку корреляционного отношения рассчитывали по формуле:

$$s_\eta = \sqrt{\frac{1 - \eta^2}{n - 2}}, \quad (4)$$

где n — объем выборки. Критерий существенности корреляционного отношения рассчитывали по формуле:

$$t_\eta = \frac{\eta}{s_\eta} \quad (5)$$

Анализ экспрессии генов, ассоциированных с транспортом кадмия и цинка и устойчивостью к ним, в корнях растений ячменя. Последовательности гомологов целевых генов в геноме ячменя обыкновенного *Hordeum vulgare* L. были подобраны при помощи инструмента BLAST в базе данных Ensembl Plants, содержащей геном ячменя обыкновенного. В программе Primer BLAST были подобраны праймеры для данных генов с анализом специфичности против базы данных последовательностей ячменя обыкновенного, доступных в NCBI. Последовательности праймеров приведены в табл. 2. Все разработанные праймеры характеризовались хорошей специфичностью (продукты амплификации были проанализированы в 2%-ном агарозном геле).

Корни ячменя, отобранные на 19-е сут прорастания в загрязненной ТМ почве, промыли в дистиллированной воде для удаления почвенных частиц. Затем ткани корней заморозили в жидком

Таблица 2. Последовательности праймеров, использованных в работе

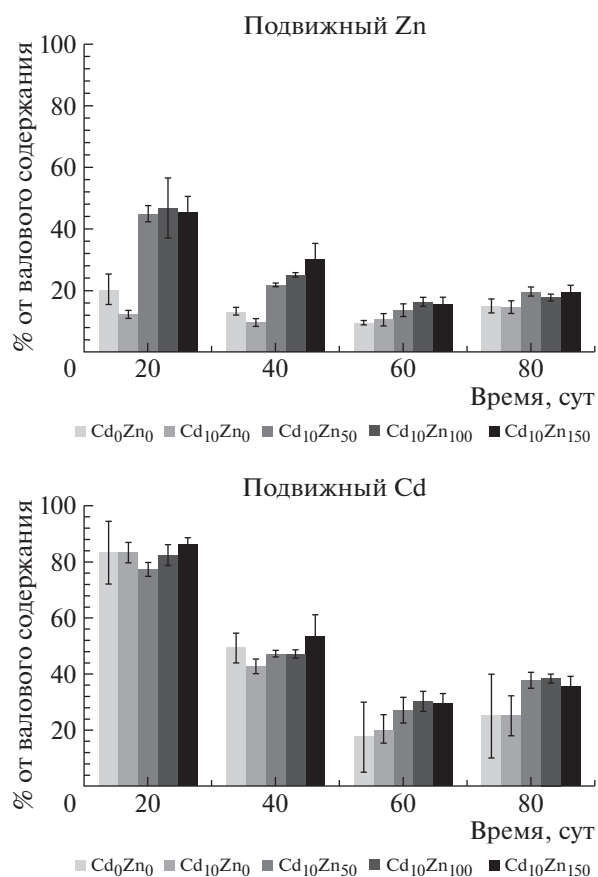
Ген	Прямой/обратный	Последовательность праймера
<i>DCD</i>	Прямой Обратный	CAAGTGGGAATGGGCGGAAAG CCAACGCATAATGGAAGCGG
<i>LCD</i>	Прямой Обратный	TTGTTTCAGGACTCTGCGCTT ATGGAATCCTTTGCCGTCGT
<i>ZIP4</i>	Прямой Обратный	GCTGGGCTGCAGATTCATTT TGCAAGCATGGACAACCTTACTG
<i>HMA4</i>	Прямой Обратный	TGAAGCTGCCTGAGATCGTG CCATCCCCACCGATTTCAT
<i>PCR1</i>	Прямой Обратный	TGCCTTGCTCTACGTGTGAAT CGACATTAACGCACACACGTT

азоте и хранили в нем до анализа. Было отобрано по 4 образца тканей корней в каждом экспериментальном варианте: Cd_0Zn_0 , $Cd_{10}Zn_0$, $Cd_{10}Zn_{50}$, $Cd_{10}Zn_{100}$, $Cd_{10}Zn_{150}$. Выделение тотальной РНК проводили из не более чем 100 мг сырой массы корней, гомогенизируя ткань в жидком азоте с добавлением поливинилпирролидона, а затем используя колонки GeneJET Plant RNA kit (Thermo Fisher Scientific) по протоколу производителя. Качество выделенной РНК проверяли на спектрофотометре NanoDrop-2000. Показатели чистоты образцов варьировали: показатель $A_{260/230}$ составил от 0.30 до 2.26, указывая на загрязнение некоторых образцов фенольными соединениями, а показатель $A_{260/280}$ составил от 1.91 до 2.24, свидетельствуя о низком содержании белков в очищенных образцах РНК. 0.1 мкг выделенной РНК подвергли обработке ДНКазой (DNase I, Thermo Fisher Scientific) и затем без разбавления использовали для синтеза кДНК с набором MMLV RT kit (Евроген) по протоколу производителя. Полученную матрицу использовали для проведения ОТ-ПЦР в реальном времени на приборе ДТ-96 (ДНК–Технология) с применением набора qPCRmix-HS SYBR Green (Евроген) по протоколу производителя. Дифференциальную экспрессию генов оценивали при помощи метода $-\Delta\Delta C_p$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте изучали динамику трансформации подвижных форм Zn и Cd в почве (рис. 2). С увеличением дозы Zn содержание подвижных форм Zn в почве возрастало. Полученная зависимость, усредненная по времени отбора проб, может быть удовлетворительно описана с помощью линейной функции $[Zn]_{\text{подв.}}(\%) = 0.27[Zn]_{\text{вал.}}$, $R^2 = 0.99$.

Содержание подвижных форм Cd в почве также возрастало: сначала с 0.18 ± 0.12 до 4.5 ± 3.0 мг/кг при внесении в почву металла в количестве 10 мг/кг и далее не изменялось, варьируя в диапазоне $(4.9 \pm 2.3) - (5.3 \pm 2.7)$ мг/кг с увеличением количества внесенного в почву Zn (от 50 до 150 мг/кг).

**Рис. 2.** Динамика относительного содержания подвижных соединений Zn и Cd в почве, %.

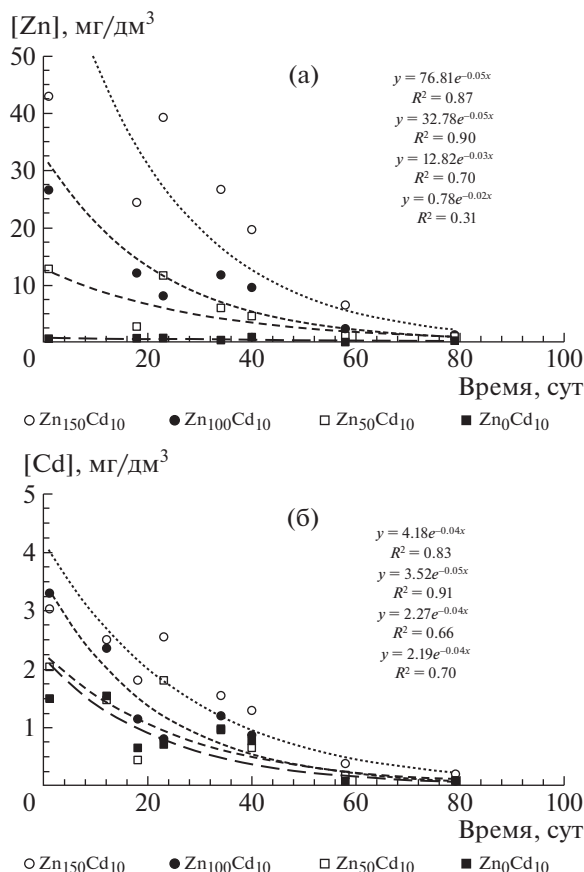


Рис. 3. Динамика изменения концентрации Zn (а) и Cd (б) в почвенных растворах, извлеченных из почвы вариантов Zn_0Cd_0 , Zn_0Cd_{10} , $Zn_{50}Cd_{10}$, $Zn_{100}Cd_{10}$, $Zn_{150}Cd_{10}$, мг/дм³.

Из диаграмм на рис. 2 следует, что несмотря на общепринятое положение о близости химических характеристик исследованных металлов Zn и Cd [4, 6], нельзя не отметить и их довольно существенное различие при взаимодействии с химически неоднородными почвенными компонентами. Например, соотношение относительного содержания кадмия к относительному содержанию цинка в подвижной форме в исследованной к почве составило в среднем 0.45, незначительно отклоняясь от этой величины в разных вариантах опыта.

В течение вегетационного периода из почвенных сосудов сразу после высаживания пророщенных семян ячменя (на 1-е сут после внесения Zn и Cd в почву), а также на 18-е, 23-и, 34-е, 40-е, 58-е и 79-е сут после внесения металлов в почву, извлекали почвенные растворы. Установлено, что уменьшение концентрации Zn в почвенном растворе в зависимости от времени можно удовлетворительно описать экспоненциальными урав-

нениями вида: $[Zn]_{\text{почв. раствор}} = A \exp(-Bt)$, где A и B — параметры, t — время, сут (рис. 3). Величины параметров A и B и величины коэффициентов детерминации (R^2) соответственно для вариантов опыта составили: Zn_0Cd_0 (0.98, 0.02, 0.39), Zn_0Cd_{10} (0.78, 0.02, 0.31), $Zn_{50}Cd_{10}$ (12.82, 0.03, 0.70), $Zn_{100}Cd_{10}$ (32.78, 0.05, 0.90), $Zn_{150}Cd_{10}$ (76.81, 0.05, 0.87).

Во всех вариантах опыта (за исключением варианта Cd_0) установлено, что концентрации Cd в почвенном растворе уменьшались со временем в соответствии с обратной экспоненциальной зависимостью. Динамику концентрации Cd в почвенных растворах, так же как и в случае с Zn, можно удовлетворительно описать экспоненциальными уравнениями вида: $[Cd]_{\text{почв. раствор}} = C \exp(-Dt)$, где C и D — параметры, t — время, сут. Величины параметров C и D и величины коэффициентов детерминации (R^2) соответственно в вариантах опыта составили: Zn_0Cd_0 (корреляция отсутствует), Zn_0Cd_{10} (2.19, 0.04, 0.82), $Zn_{50}Cd_{10}$ (2.27, 0.03, 0.80), $Zn_{100}Cd_{10}$ (3.52, 0.05, 0.90), $Zn_{150}Cd_{10}$ (4.18, 0.04, 0.93).

Снижение концентрации Zn и Cd в почвенных растворах (за исключением вариантов Zn_0 и Cd_0), отобранных из сосудов с вегетирующими растениями, было связано как с истощением запаса водорастворимых форм металлов в почве в результате непрерывного поглощения корнями растений, не компенсируемого десорбцией Zn и Cd из почвенного поглощающего комплекса (ППК) в почвенный раствор, так и с процессами возможной трансформации подвижных (доступных растениям) форм нахождения металла в малоподвижные (“фиксации” Zn и Cd). Для вариантов Zn_0 и Cd_0 вышеуказанный тренд выявить не удалось из-за высокой вариабельности экспериментальных данных.

Экспериментально получены величины сухой биомассы надземных органов и корней ячменя на 1-е, 18-е, 40-е, 60-е и 79-е сут после появления всходов. Приблизительно после 50-х сут вегетации в варианте Zn_0Cd_0 и 75-х сут вегетации в остальных вариантах опыта положительную динамику изменения биомассы не отмечали. На основании этих данных построены логистические кривые, аппроксимирующие динамику сухой биомассы надземных органов растений и полиномы 2-й степени, удовлетворительно аппроксимирующие динамику сухой биомассы корней (рис. 4).

Величины параметров логистических кривых $M_{\max}$ (г) M_0 (г), μ (сут⁻¹) для исследованной почвы

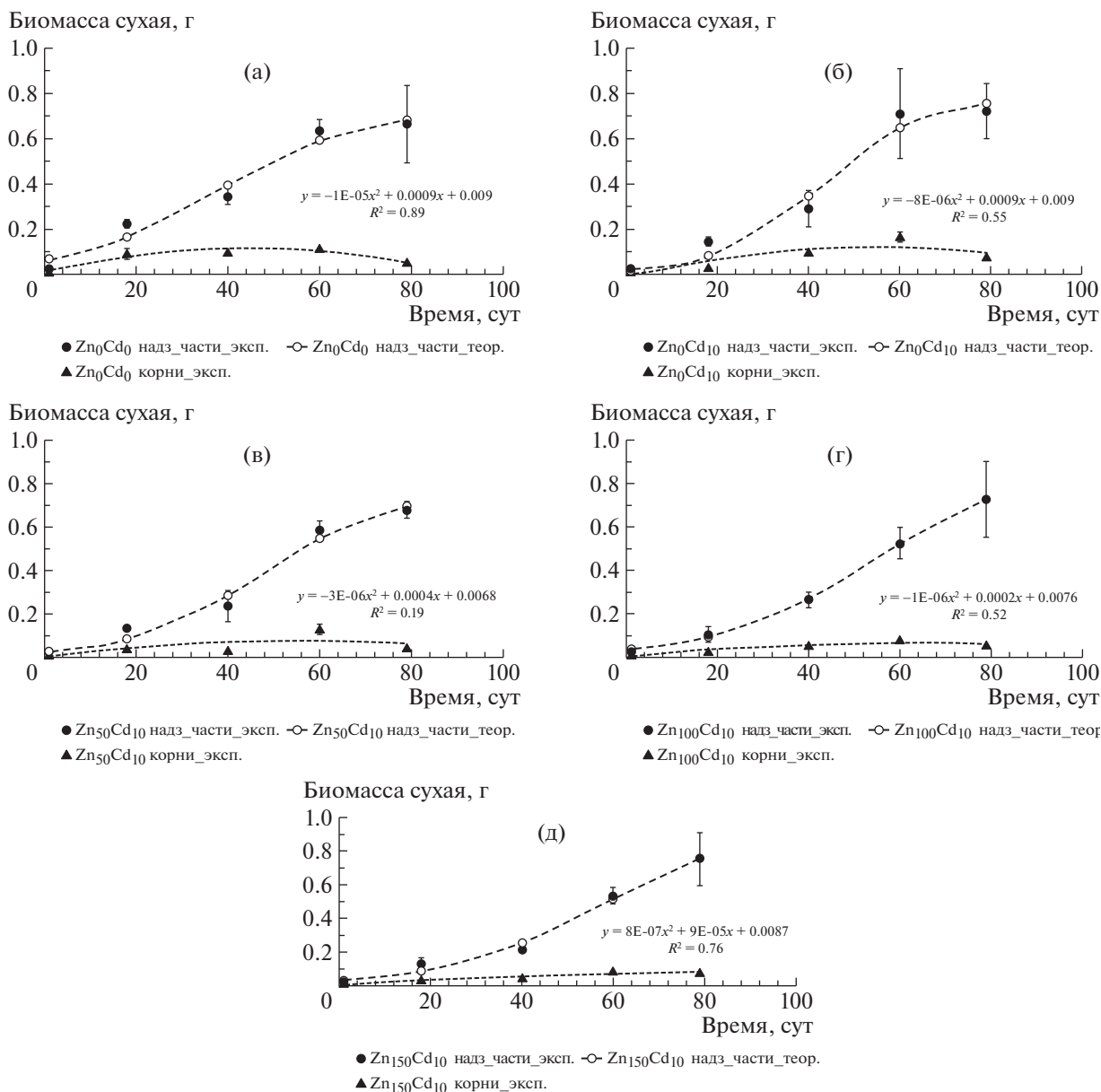


Рис. 4. Динамика изменения сухой биомассы надземных органов и корней ячменя, выращенного на дерново-подзолистой супесчаной почве, г/раст. Варианты: (а) – Zn_0Cd_0 , (б) – Zn_0Cd_{10} , (в) – $Zn_{50}Cd_{10}$, (г) – $Zn_{100}Cd_{10}$, (д) – $Zn_{150}Cd_{10}$.

при различных дозах внесенных Zn и Cd представлены в табл. 3.

Полученные данные по накоплению биомассы растений в условиях вегетационного опыта показали, что внесение в почву ТМ в субкритических концентрациях (кадмия – до 10, цинка – до 150 мг/кг) не приводило к выраженным фитотоксическим эффектам, определяемым на основании морфометрических показателей (уменьшение скорости созревания ячменя, изменения биомассы надземных органов и корней растений).

На рис. 5 представлены данные по изменению содержания Zn и Cd в различных органах тест-растений в зависимости от концентрации металлов в почве, а также от времени, прошедшего с момента начала вегетации, которые показали, что концентрационная зависимость между содержанием Cd в почве и надземных органах ячменя присутствует только в вариантах с внесением металла в почву и без внесения. Внесение возрастающих количеств Zn в остальных вариантах опыта при неизменном количестве (дозе) внесенного

Таблица 3. Количественные параметры логистических кривых изменения сухой надземной биомассы ячменя (в пересчете на одно растение), выращенного до фазы молочной спелости ($n = 5$, $v = 3$)

Вариант	$M_{\max}$ (максимальная возможная масса 1-го растения), г	M_0 (начальная масса 1-го растения, расчетная величина), г	μ (удельная скорость прироста биомассы растения), сут^{-1}	$\eta^2/S_{\eta}/t_{\eta}(\alpha^*)$
Cd_0Zn_0	0.733	0.067	0.063	0.91/0.23/3.89(0/05)
$\text{Cd}_{10}\text{Zn}_0$	0.803	0.018	0.089	0.93/0.22/4.20(0.05)
$\text{Cd}_{10}\text{Zn}_{50}$	0.766	0.026	0.072	0.98/0.11/8.90(0.01)
$\text{Cd}_{10}\text{Zn}_{100}$	0.897	0.036	0.059	0.96/0.17/5.69(0.05)
$\text{Cd}_{10}\text{Zn}_{150}$	1.000	0.035	0.057	0.97/0.15/6.66(0.01)

*Уровень значимости.

Cd не влияло на содержание последнего в надземных органах растений.

В то же время внесение в почву возрастающих количеств Zn при одинаковой дозе внесенного Cd (10 мг/кг) привело к увеличению накопления первого в надземных органах растений в соответствии с линейной зависимостью: $[\text{Zn}]_{\text{раст}} = 4.34[\text{Zn}]_{\text{почв}}$ (рис. 6). Показано, что достоверных различий в накоплении Zn надземными органами растений при дополнительном внесении в почву Cd в варианте $\text{Cd}_{10}\text{Zn}_0$ по сравнению с контрольным вариантом Cd_0Zn_0 не обнаружено.

Экспериментальный материал в графической форме для последующего анализа данных об изменении транслокационного соотношения ($\text{ТО}_{\text{ТМ}}$) = $\text{ТМ}_{\text{надз.органы}} : \text{ТМ}_{\text{корни}}$ в динамике при совместном внесении в дерново-подзолистую супесчаную почву Zn и Cd в разных вариантах опыта представлен на рис. 7а: ТО_{Zn} снижалось по мере развития растений, но достоверно не изменялось по мере повышения дозы Zn, внесенного в почву одновременно с кадмием.

На рис. 7б дано изменение транслокационного отношения $\text{ТО}_{\text{Cd}} = (\text{Cd}_{\text{надз.органы}} : \text{Cd}_{\text{корни}})$ в различных органах растений (надземных и корнях) в динамике при совместном внесении в почву Zn и Cd в разных вариантах опыта. ТО_{Cd} не только снижалось по мере развития растений, но увеличивалось по мере повышения дозы Zn, внесенного в почву одновременно с кадмием. При этом общее содержание кадмия в надземных частях ячменя фактически не изменялось в вариантах опыта с внесением Cd, варьируя в диапазоне 20–45 мг/кг сухой массы. Однако существенно снижалась концентрация кадмия в корнях с увеличением количества (дозы) внесенного цинка. Кроме того, общее содержание Cd в корнях ячменя с возрастом также повышалось (рис. 5в). Это свидетельствовало по меньшей мере о 2-х аспектах пробле-

мы корневого поглощения кадмия: 1 – конкурентного взаимодействия Zn и Cd при поглощении ионов металлов из почвенного раствора корневым поглощающим комплексом (КПК) – чем больше соотношение $[\text{Zn}] : [\text{Cd}]$ в почвенном растворе, тем больше соответствующее соотношение в КПК (при ограниченной емкости последнего); 2 – наличия стабильного и не зависящего от конкурентного взаимодействия с Zn канала поступления кадмия в симпласт растений ячменя.

Согласно некоторым литературным данным [4], важное значение при оценке фитотоксического эффекта от повышенной концентрации кадмия в надземных органах растений играет соотношение массовых концентраций $[\text{Cd}] : [\text{Zn}]$ в корнях: чем оно меньше, тем слабее фитотоксический эффект. Полученные результаты (табл. 4) показали очевидное снижение фитотоксического эффекта Cd при дополнительном внесении в почву Zn. Временная динамика соотношения $[\text{Cd}] : [\text{Zn}]$ в корнях не была выявлена. В то же время, для надземных органов ячменя был отмечен незначительный нисходящий тренд вышеуказанного соотношения.

При оценке в ходе настоящего эксперимента зольности различных частей ячменя в динамике удалось зафиксировать тенденцию к снижению данного показателя, начиная с 18-суточного возраста и вплоть до фазы начала молочной спелости (79 сут), для вегетативной массы растений. Зольность корней, напротив, постепенно возрастала (рис. 8). Причем для последних наблюдали и отклонения от вышеуказанной тенденции. Возможно, это было связано с недоучетом массы корней в последний срок отбора образцов в связи с методическими затруднениями при промывке корней в фазе созревания семян.

Анализ экспрессии генов, связанных с транспортом ТМ и с клеточным ответом на Cd и Zn,

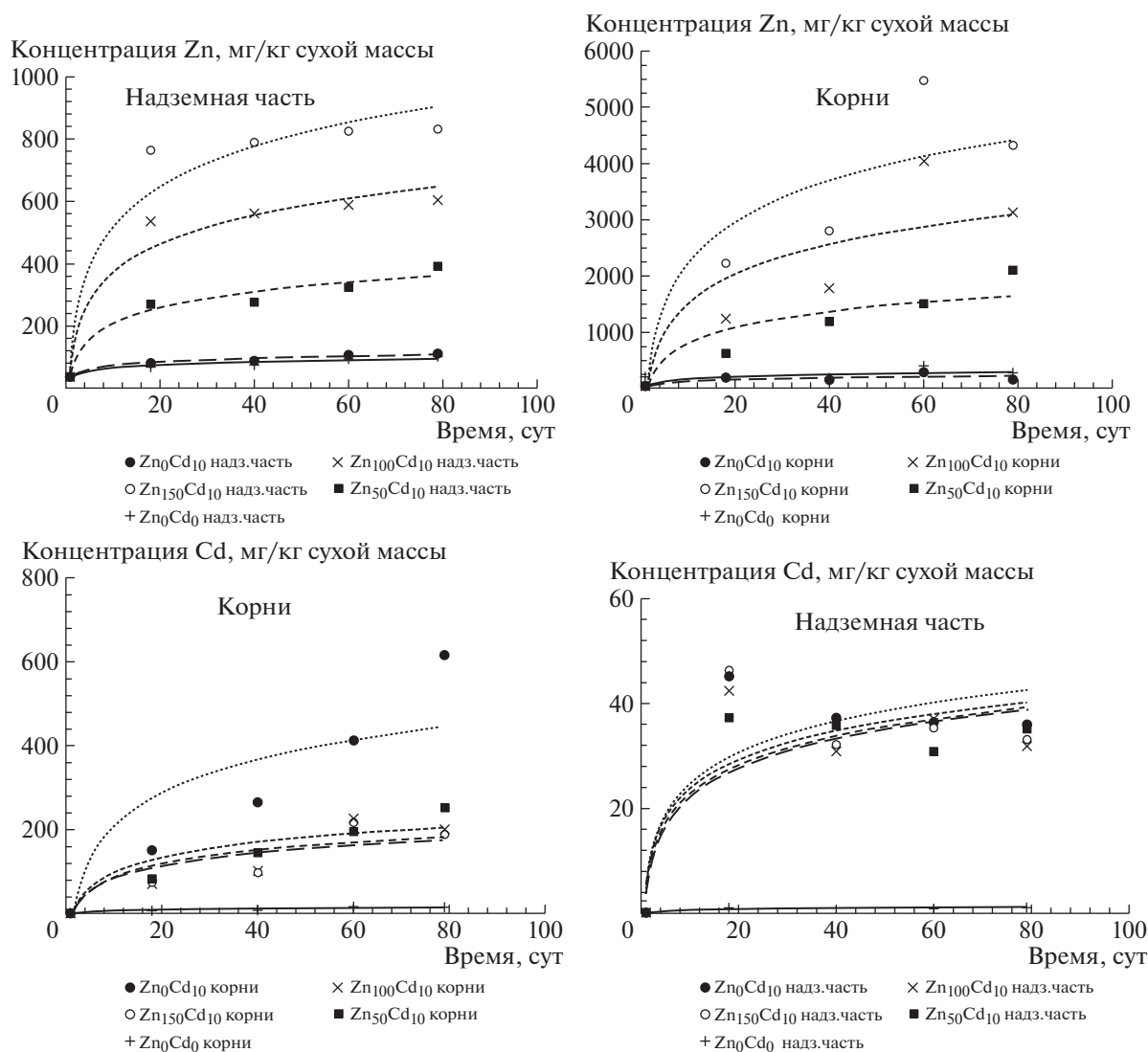


Рис. 5. Динамика содержания Zn и Cd в различных органах ячменя в течение вегетации растений.

может прояснить молекулярные механизмы отмеченных закономерностей переноса и накопления данных ТМ. Кратность изменения экспрессии изученных генов (Fold Change, *FC*) в корнях растений ячменя по сравнению с контрольным вариантом Cd_0Zn_0 для разных концентраций тяжелых металлов в почве приведена в табл. 5.

Выявлено, что воздействие Cd и Zn не оказало значимого эффекта на экспрессию гомолога гена *DCD*. При этом минимальная концентрация Zn 50 мкг/кг приводила к двукратному увеличению транскрипционной активности по сравнению с контролем, а концентрации цинка 100 и 150 мг/кг приводили к подавлению экспрессии гомолога гена *LCD*. В корнях растений, произраставших на почве с содержанием кадмия 10 мг/кг, наблюдали

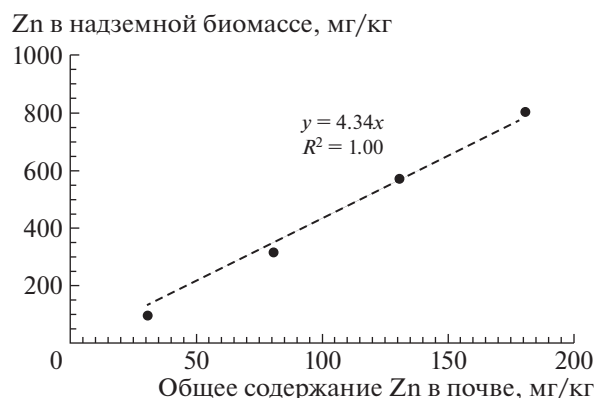


Рис. 6. Зависимость между концентрацией Zn в почве и его содержанием в надземных органах растений (средние сроки учета растений (18, 40, 60, 79 сут).

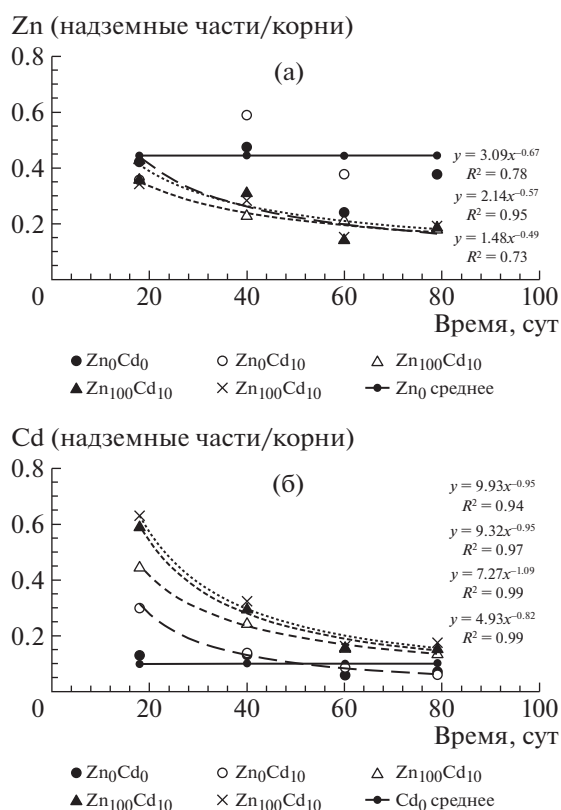


Рис. 7. Изменение транслокационных отношений $Zn_{\text{надз.органы}} : Zn_{\text{корни}}$ (а) и $Cd_{\text{надз.органы}} : Cd_{\text{корни}}$ (б) в динамике при совместном внесении в почву Zn и Cd.

резкое снижение экспрессии гомолога *HMA4*, не зависящее от концентрации Zn. Противоположную ситуацию наблюдали в отношении экспрес-

Таблица 4. Соотношения концентраций Zn и Cd в различных органах ячменя, выращенного на дерново-подзолистой супесчаной почве до фазы молочной спелости

Вариант	[Cd] : [Zn]			
	время отбора проб, сут после всходов			
	18	40	60	79
Cd ₀ Zn ₀	0.02	0.01	0.01	0.01
	0.04	0.05	0.04	0.06
Cd ₁₀ Zn ₀	0.57	0.43	0.33	0.33
	0.80	2.08	1.42	3.99
Cd ₁₀ Zn ₅₀	0.14	0.13	0.10	0.09
	0.13	0.12	0.13	0.12
Cd ₁₀ Zn ₁₀₀	0.08	0.06	0.06	0.05
	0.06	0.06	0.06	0.06
Cd ₁₀ Zn ₁₅₀	0.06	0.04	0.04	0.04
	0.03	0.04	0.04	0.04

Примечание. Над чертой — надземные органы, под чертой — корни.

сии гомолога гена *PCRI*, где 10 мг Cd/кг привели к существенному увеличению транскрипционной активности данного гена. Подавление экспрессии гомологов генов *LCD*, *ZIP4* и *HMA4* могло свидетельствовать о снижении производства H₂S [10] в клетках изученного сорта ячменя при воздействии ТМ, снижении транспорта Zn и увеличении концентраций стрессового фитогормона АБК [14], а также о снижении аккумуляции Zn и Cd в растениях за счет подавления экспрессии гомолога АТФазы *HMA4*. Данный ген является перспективным для исследования снижения накопления Cd в корнях при повышении концентраций Zn. Стрессовый ответ растений на ксенобиотик Cd также мог быть выражен в повышении экспрессии гомолога гена *PCRI*, ассоциированного с увеличением устойчивости к действию Cd и с возможным накоплением кальция в листьях растений. Для выявления молекулярных причин снижения накопления Cd в корнях при повышении концентраций Zn необходимо расширить выборку изучаемых генов-кандидатов, однако предварительные данные свидетельствовали о возможной роли гомолога гена *HMA4* в данном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе вегетационных опытов с ячменем на дерново-подзолистой супесчаной почве, в которую дополнительно вносили Zn в дозах Zn₀, Zn₅₀, Zn₁₀₀, Zn₁₅₀ и Cd в дозе 10 мг/кг, установлено следующее.

Содержание подвижных форм Zn в почве возрастало с увеличением концентрации металла в соответствии с зависимостью, которая может быть описана с помощью линейной функции: $[Zn]_{\text{подв.}}(\%) = 0.27 \times [Zn]_{\text{вал.}}(\text{мг/кг})$, $R^2 = 0.99$. Содержание подвижных форм Cd в почве также возрастало при внесении металла в дозе Cd₁₀ с 0.18 ± 0.12 до 4.5–5.3 мг/кг. Соотношение относительного содержания подвижных форм кадмия и цинка в исследованной почве составило в среднем 0.45.

Во всех вариантах опыта (за исключением вариантов Zn₀ и Cd₀) установлено, что концентрации Zn и Cd в почвенном растворе уменьшались со временем в соответствии с обратной экспоненциальной зависимостью вследствие процесса истощения запаса водорастворимых форм Zn и Cd в почве в результате непрерывного поглощения корнями растений.

Изменение биомассы ячменя в вариантах опыта хорошо аппроксимируется логистически-

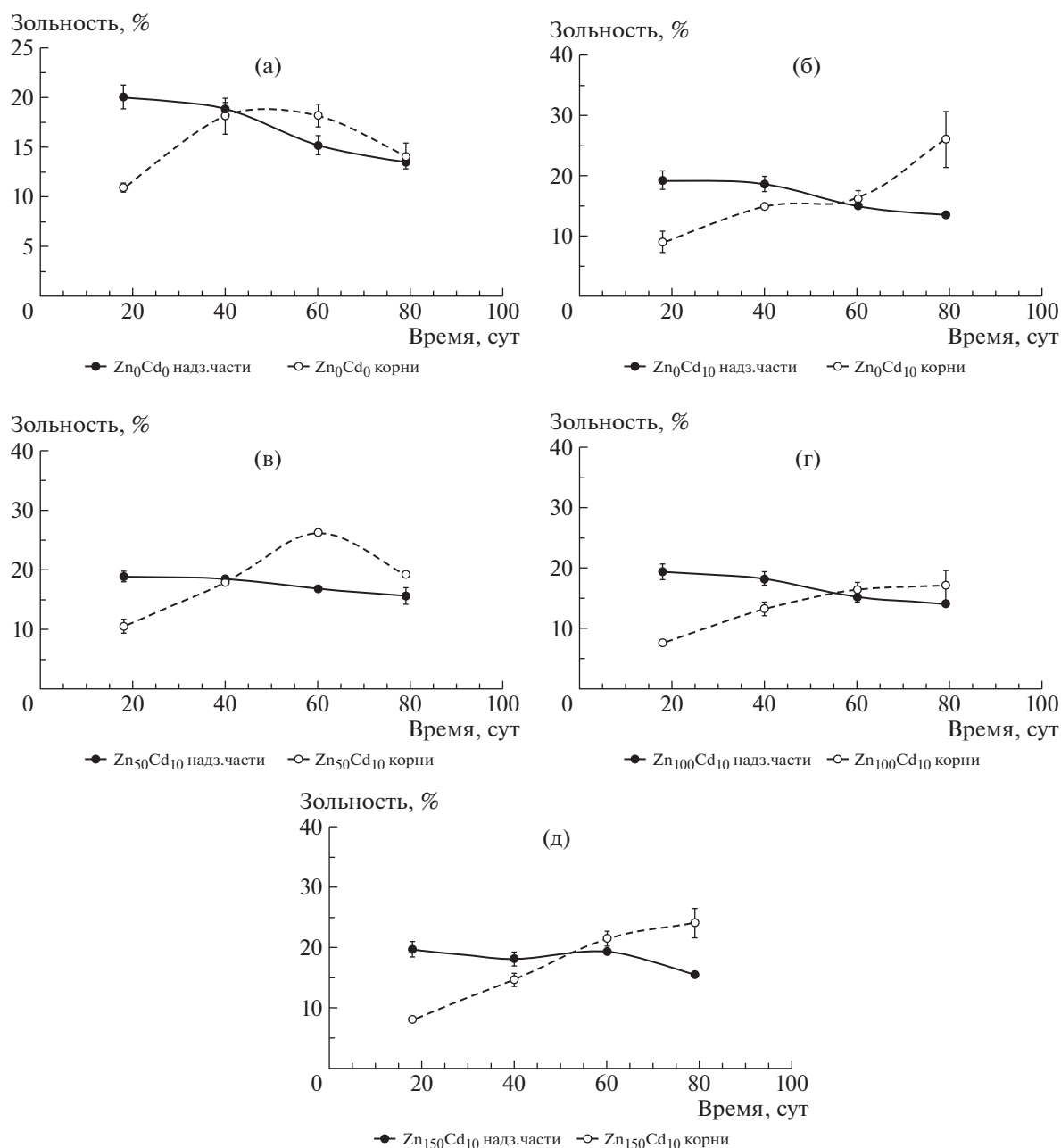


Рис. 8. Динамика изменения зольности надземных органов и корней ячменя, выращенного на дерново-подзолистой супесчаной почве, %. Варианты: (а) – Zn_0Cd_0 , (б) – Zn_0Cd_{10} , (в) – $Zn_{50}Cd_{10}$, (г) – $Zn_{100}Cd_{10}$, (д) – $Zn_{150}Cd_{10}$.

ми кривыми. Установлено, что внесение в почву ТМ в субкритических концентрациях (кадмия – до 10 мг/кг, Zn – до 150 мг/кг) не приводило к выраженным фитотоксическим эффектам.

Внесение возрастающих количеств Zn при одинаковой дозе внесенного Cd (10 мг/кг) привело к увеличению накопления первого в надземных органах растений в соответствии с линейной зависимостью: $[Zn]_{\text{раст}} = 4.34[Zn]_{\text{почв}}$. При дополнительном добавлении в почву Cd в варианте

$Cd_{10}Zn_0$ по сравнению с контрольным вариантом Cd_0Zn_0 достоверные различия в накоплении Zn надземными органами растений отсутствовали.

Транслокационное отношение $TO_{Cd} = (Cd_{\text{надз.органы}} : Cd_{\text{корни}})$ в различных органах растений (надземных и корнях) увеличивалось по мере повышения дозы Zn, внесенного в почву одновременно с кадмием. При этом общее содержание кадмия в надземных органах ячменя фактически не изменялось в вариантах опыта с внесе-

Таблица 5. Нормализованная экспрессия изученных генов (*FC*) в корнях растений ячменя по сравнению с контролем (Cd_0Zn_0) для вариантов разных концентраций тяжелых металлов в почве

Ген	Вариант	<i>FC</i>
<i>DCD</i>	$Cd_{10}Zn_0$	–1.2
	$Cd_{10}Zn_{50}$	1.1
	$Cd_{10}Zn_{100}$	1.4
	$Cd_{10}Zn_{150}$	–1.2
<i>LCD</i>	$Cd_{10}Zn_0$	2.2*
	$Cd_{10}Zn_{50}$	1.2
	$Cd_{10}Zn_{100}$	–3.0*
	$Cd_{10}Zn_{150}$	–1.6
<i>ZIP4</i>	$Cd_{10}Zn_0$	–1.3
	$Cd_{10}Zn_{50}$	–3.9*
	$Cd_{10}Zn_{100}$	–14.4*
	$Cd_{10}Zn_{150}$	–5.6*
<i>HMA4</i>	$Cd_{10}Zn_0$	–4.0*
	$Cd_{10}Zn_{50}$	–6.2*
	$Cd_{10}Zn_{100}$	–24.7*
	$Cd_{10}Zn_{150}$	–3.8*
<i>PCR1</i>	$Cd_{10}Zn_0$	2.0*
	$Cd_{10}Zn_{50}$	2.9*
	$Cd_{10}Zn_{100}$	5.9*
	$Cd_{10}Zn_{150}$	2.7*

*Значимые изменения экспрессии по сравнению с контролем.

нием Cd, варьируя в диапазоне 20–45 мг/кг сухой массы. С увеличением количества внесенного цинка существенно снижалась концентрация кадмия в корнях. Общее содержание Cd в корнях ячменя с возрастом также увеличивалось. Величины TO_{Zn} в различных органах растений (надземных и корнях) уменьшались по мере развития растений, но достоверно не изменялись по мере повышения дозы Zn, внесенного в почву одновременно с кадмием. Подобно Cd, содержание цинка в корнях достоверно увеличивалось до фазы цветения (60 сут), а затем снижалось. Временной динамики соотношения $[Cd] : [Zn]$ в корнях выявить не удалось. В то же время для надземных органов ячменя был отмечен незначительный нисходящий тренд вышеуказанного отношения.

Начиная с 18-суточного возраста и вплоть до фазы начала молочной спелости (79 сут), наблюдали снижение зольности вегетативной массы

растений, в то время как зольность корней, напротив, постепенно возрастала.

Воздействие Cd и Zn не оказало значимого эффекта на экспрессию гомолога гена *DCD*. Все использованные концентрации Zn привели к значимому ингибированию экспрессии гомолога гена *ZIP4*, а также гомологов генов *LCD* и *HMA4*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных Н.А., Ладонин В.Ф. Нормирование загрязнения почв тяжелыми металлами // *Агрохимия*. 1995. № 6. С. 71–80.
2. Соколов О.А., Черников В.А., Лукин С.В. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. 2-е изд., доп. Белгород: КОНСТАНТА, 2008. 188 с.
3. Barber S.A., Chen J.-H. Using a mechanistic model to evaluate the effect of soil pH on phosphorus uptake // *Plant and Soil*. 1990. V. 124. P. 183–186.
4. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. London: CRC Press, 2011. 505 p.
5. Pandey R. Mineral nutrition of plants // *Plant biology and biotechnology*. V. I: Plant diversity, organization, function and improvement / Ed. Bahadur B. India: Springer, 2015. P. 499–538.
6. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
7. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / Под ред. Санжаровой Н.И., Цыгвинцева П.Н. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. 398 с.
8. Baker A.J.M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals // *J. Plant Nutr.* 1981. V. 3. P. 643–654.
9. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений и поиски рудных месторождений: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М.: Изд-во МГУ, 1983. 49 с.
10. Zhang Q., Cai W., Ji T.-T. Ye L., Lu Y.-T., Yuan T.-T. WRKY13 enhances cadmium tolerance by promoting D-CYSTEINE DESULFHYDRASE and hydrogen sulfide production // *Plant Physiol.* 2020. V. 183. Is. 1. P. 345–357.
11. Shen J.J., Qiao Z.J., Xing T.J., Zhang L.P., Liang Y.L., Jin Z.P., Yang G.D., Wang R., Pei Y.X. Cadmium toxicity is alleviated by AtLCD and AtDCD in *Escherichia coli* // *J. Appl. Microbiol.* 2012. V. 113. P. 1130–1138.
12. Song W.-Y., Choi K.S., Kim D.Y., Geisler M., Park J., Vincenzetti V., Schellenberg M., Kim S.H., Lim Y.P., Noh E.W., Lee Y., Martinoia E. *Arabidopsis* PCR2 is a zinc exporter involved in both zinc extrusion and long-distance zinc transport // *Plant Cell*. 2010. V. 22. P. 2237–2252.
13. Zeng L., Zhu T., Gao Y., Wang Y., Ning C., Björn L.O., Chen D., Li S. Effects of Ca addition on the uptake, translocation, and distribution of Cd in *Arabidopsis thaliana* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2017. V. 139. P. 228–237.
14. Pan W., You Y., Shentu J.-L., Weng Y.-N., Wang S.-T., Xu Q.-R., Liu H.-J., Du S.-T. Abscissic acid (ABA)-importing transporter 1 (AIT1) contributes to the inhibi-

- tion of Cd accumulation via exogenous ABA application in *Arabidopsis* // J. Hazard. Mater. 2020. V. 391. Art. 122189.
15. Campos A.C.A.L., Kruijer W., Alexander R., Akkers R.C., Danku J., Salt D.E., Aarts M.G.M. Natural variation in *Arabidopsis thaliana* reveals shoot ionome, biomass, and gene expression changes as biomarkers for zinc deficiency tolerance // J. Exp. Bot. 2017. V. 68. Is. 13. P. 3643–3656.
 16. Sinclair S.A., Senger T., Talke I.N., Cobbett C.S., Haydon M.J., Krämer U. Systemic upregulation of MTP2- and HMA2-mediated Zn partitioning to the shoot supplements local Zn deficiency responses // Plant Cell. 2018. V. 30. P. 2463–2479.
 17. Pita-Barbosa A., Ricachenevsky F.K., Wilson M., Dotorini T., Salt D.E. Transcriptional plasticity buffers genetic variation in zinc homeostasis // Sci. Rep. 2019. V. 9. Art. 19482.
 18. Lekeux G., Crowet J.-M., Nouet C., Joris M., Jadoul A., Bosman B., Carnol M., Motte P., Lins L., Galleni M., Hanikenne M. Homology modeling and *in vivo* functional characterization of the zinc permeation pathway in a heavy metal P-type ATPase // J. Exp. Bot. 2019. V. 70. Is. 1. P. 329–341.
 19. Lei G.J., Sun L., Sun Y., Zhu X.F., Li G.X., Zheng S.J. Jasmonic acid alleviates cadmium toxicity in *Arabidopsis* via suppression of cadmium uptake and translocation // J. Integrat. Plant Biol. 2019. V. 62. Is. 2. P. 218–227.
 20. Минеев В.Г. Избранное. Сб. статей в 2-х ч. Агрохимия и качество пшеницы. Экологические проблемы и функции агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2005. 601 с.
 21. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ЦИ-НАО, 1992. 61 с.
 22. Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Дикарев Д.В. Оценка миграционной способности Zn в системе почва–растение // Почвоведение. 2018. № 4. С. 427–438.
 23. Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Корнеев Ю.Н., Фригидов Р.А., Санжаров А.И., Дикарев Д.В., Кочетков И.В. Исследование миграционной способности Zn в системе дерново-подзолистая почва–кормовые бобы в условиях вегетационного опыта // Агрохимия. 2019. № 3. С. 72–84.
 24. Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В. Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // Докл. РАСХН. 2014. № 1. С. 50–53.
 25. Дричко В.Ф., Изосимова А.А. Влияние возрастающих доз извести на урожай и скорость роста растений рапса и овса // Агрохимия. 2005. № 8. С. 19–23.
 26. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
 27. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Под ред. Зырина Н.Г., Садовниковой Л.К. М.: Изд-во МГУ, 1985. 208 с.

Cd and Zn Vigration Patterns in the System Sod-podzolic Soil–Soil Solution–Barley under Conditions of Combined Contamination

L. N. Anisimova^{a, *}, V. S. Anisimov^a, P. Yu. Volkova^a, D. V. Krylenkin^a, R. A. Frigidov^a, A. I. Sanzharov^a, D. V. Dikarev^a, A.V. Sarukhanov^a, and Y. N. Korneev^a

^a All-Russian Institute of Radiology and Agroecology
Kievskoye sh., 109 km, Kaluga region, Obninsk 249032, Russia

^{*}E-mail: lanisimovan@list.ru

Dose and time dependences of the competitive interaction of heavy metal (xenobiotic Cd and trace element Zn) in the system soil–soil solution–plant were studied. In the growing experiment, the factors were identified that determine the mobility of Zn and Cd in the soil under conditions of combined contamination and the content of the labile forms of heavy metals (HM). The following dynamics were studied: 1 – the transition of HM to the soil solution, 2 – to various parts of plants, 3 – changes in plant biomass. The parameters of the equations approximating the corresponding processes were established. For all scenarios of the experiment, a significant increase in the contents of Zn and Cd in the barley roots (in contrast to the aerial parts of the plants) was observed depending on the age of the plants. At the constant concentration of Cd in the aerial bodys of plant, a significant decrease was found in the concentration of cadmium in the roots depending on the increase in the amount of zinc introduced at soil. The ratio of [Cd] : [Zn] mass concentrations in the barley aerial bodys and roots sharply decreased with additional introduction of Zn into the soil. The temporal dynamics of the [Cd] : [Zn] ratio in the roots was not revealed. At the same time, there is a slight downward trend of the ratio for the vegetative mass. It was found that the barley ash content of vegetative mass was decreasing for aerial parts and increasing for roots depending on age. Analysis of gene expression in the roots of barley plants on the 19th day of germination indicated a possible decrease in the production of H₂S in plant cells under the influence of HM, a decrease in Zn transport and an increase in the concentration of the stress phytohormone ABA, and also demonstrated a possible decrease in the accumulation of Zn and Cd in plants due to the down-regulation of the ATPase homologue *HMA4*.

Key words: cadmium, zinc, migration, soil, soil solution, barley, gene expression.

УДК 631.427

ПОДХОД К ВЫБОРУ МЕТОДОВ ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ¹

© 2021 г. Л. П. Воронина^{1, 2,*}, К. Э. Поногайбо¹

¹ Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью
Федерального медико-биологического агентства России
119121 Москва, ул. Погодинская, 10/1, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

*E-mail: LVoronina@cspmr.ru

Поступила в редакцию 11.05.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

В связи с актуальностью исследований в области загрязнения окружающей среды многие специалисты прибегают к комплексной оценке определения степени токсичности исследуемых объектов. При оценке почв фитотестирование является основополагающим методом. Данный аналитический обзор должен упростить задачу поиска актуальных методов определения токсичности почвы и отдельных веществ для специалистов в области экотоксикологии.

Ключевые слова: экотоксикология, качество почвы, ГОСТ, ISO.

DOI: 10.31857/S000218812109012X

ВВЕДЕНИЕ

Частое обращение к фитотестированию является основанием для постоянной актуализации и систематизации существующих методов оценки различных объектов с помощью высших растений. К данному виду исследования прибегают в настоящее время не только для интегральной оценки токсичности почв и других сред или веществ в лабораторных условиях, но и для определения положительных почвенных функций: стабильности, устойчивости, присутствия питательных элементов и биологически активных веществ, необходимых для роста и развития растений. Пул методов по определению стимулирующего эффекта компонентов почвы лежит скорее не в области экотоксикологии, а в области физиологии растений и является основанием для отдельного серьезного анализа. Настоящий обзор касается анализа методов в области санитарно-гигиенических исследований и, если быть более точными (в соответствии с настоящими подходами), экотоксикологических исследований.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУ «ЦСП» ФМБА России.

ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ КАК ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ КСЕНОБИОТИКОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПОЧВ

Фитотестирование – вид исследования, основанный на определении способности испытуемых веществ оказывать угнетающее действие на растения, приводящее к нарушению физиологических процессов, ухудшению качества растительной продукции. Оно представлено комплексом методов, имеющим в процедуре выполнения свои особенности для различных тест-объектов (почвы, воды, отходов), которые продиктованы большим разнообразием загрязнителей как органических, так и неорганических. Применение фитотестирования позволяет перенести полученные в смоделированном лабораторном эксперименте результаты с простой системы на более сложную в реальных условиях [1–3].

Согласно «ГОСТ 17.4.3.04-85 Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения», для проведения контроля за загрязнением почв следует использовать не только физико-химические методы, но и прибегать к методам по определению фитотоксических свойств почвы [4].

Таблица 1. Российские стандарты оценки фитотоксичности почв и загрязняющих веществ

Номер документа	Название документа
ГОСТ Р ИСО 22030-2009	Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений (Переиздание)
ГОСТ 32627-2014	Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения. Испытание на фитотоксичность
ГОСТ 33061-2014	Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения: тест на всхожесть семян и развитие проростков
ГОСТ 33777-2016	Вещества поверхностно-активные. Метод определения фитотоксичности на семенах высших растений
ГОСТ ИСО 16198-2017	Качество почв. Метод определения биодоступности микроэлементов почвы для растений
ГОСТ Р ИСО 18763-2019	Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений

Фитотестирование является ключевым и обязательным методом для оценки загрязнения почвы так же, как гидробионты — для оценки водных объектов. Принцип метода фитотестирования заключается в определении токсичности исследуемого объекта по реакции растений, которые выступают в качестве тест-культуры.

Использование большого спектра культур влияет на ход анализа и может привести к различным результатам [3]. В связи с большим разнообразием к выбору метода для каждого конкретного исследования, если он не продиктован нормативным документом, надо подходить, ориентируясь на существующий комплекс методов. Для того чтобы получить адекватные результаты, независимо от исполнителей, лаборатории, времени, требуется унификация методов, которая может

быть достигнута лишь четкой системой стандартизации.

Существующее множество методов фитотестирования и отсутствие их базы ограничивает и снижает возможность провести обоснованный выбор метода для исследования.

РАЗНООБРАЗИЕ МЕТОДОВ ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ

Прежде всего, при выборе рабочей методики стоит остановиться на утвержденных в РФ методах. Более востребованными методами являются методы, которые прошли верификацию, валидацию и оформлены как ГОСТы. Некоторые из них прописаны в нормативных документах и имеют свое целевое использование, т.е. предназначены для исследования определенных объектов. Кроме того, международные методы фитотестирования также востребованы в практике экотоксикологических исследований.

Актуальные отечественные и международные стандарты, которые являются приоритетными для использования при планировании экотоксикологических исследований, представлены в табл. 1, 2.

Некоторые отечественные стандарты (например, ГОСТ Р ИСО 18763-2019, ГОСТ ИСО 16198-2017, ГОСТ Р ИСО 22030-2009) идентичны зарубежным методам [5–7].

Международные методы, используемые в рамках стандартов ИСО (ISO — the International Organization for Standardization), также предназначены для характеристики следующих объектов: почвы, отходов и воды. Данные методы с определенной периодичностью (5 лет) проходят процедуры пересмотра для подтверждения протокола выполнения метода и международное межлабораторное сличение результатов [3].

Ряд методов привязан к конкретным нормативно-правовым документам, например, природоохранным нормативным документам федеративным (ПНДФ), методическим указаниям (МУ или МУК), методическим рекомендациям (МР), государственным стандартам (ГОСТ) и др. Часть методов входит в существующий федеральный реестр (ФР) методик Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ. Многие из них расширяют сферу применения фитотестирования и конкретизируют использование данного метода для конкретных поллютантов и объектов. Например, для измерения интегрального уровня загрязнения почвы техногенных районов может

Таблица 2. Международные стандарты оценки фитотоксичности различных объектов

Номер документа	Наименование на русском языке	Наименование на английском языке
ISO 17126:2005	Качество почвы – Определение воздействия загрязнителей на почвенную флору – Скрининговый тест на всхожесть проростков салата (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Screening test for emergence of lettuce seedlings (<i>Lactuca sativa</i> L.)
ISO 22030:2005	Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность высших растений	Soil quality – Biological methods – Chronic toxicity in higher plants
ISO 17402:2008	Качество почвы. Требования и руководство по выбору и применению методов оценки биодоступности загрязняющих веществ в почве и почвенной массе	Soil quality – Requirements and guidance for the selection and application of methods for the assessment of bioavailability of contaminants in soil and soil materials
ISO 11269-1:2012	Качество почвы. Определение воздействия загрязняющих веществ на флору почвы. Ч. 1. Метод измерения замедления роста корней	Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth
ISO 11269-2:2012	Качество почвы. Определение воздействия загрязняющих веществ на флору почвы. Ч. 2. Воздействие контаминированной почвы на прорастание и ранний рост высших растений	Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2: Effects of contaminated soil on the emergence and early growth of higher plants
ISO 29200:2013	Качество почвы. Оценка генотоксичных воздействий на высшие растения. Тест на микронуклеоз <i>Vicia faba</i>	Soil quality – Assessment of genotoxic effects on higher plants – <i>Vicia faba</i> micronucleus test
ISO 16198:2015	Качество почв. Метод определения биодоступности микроэлементов почвы для растений	Soil quality – Plant-based test to assess the environmental bioavailability of trace elements to plants
ISO 18763:2016	Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений	Soil quality – Determination of the toxic effects of pollutants on germination and early growth of higher plants
ISO 19204:2017	Качество почвы. Методика оценки экологического риска локального загрязнения почвы (триадный подход к оценке качества почвы)	Soil quality – Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach)
ISO 17616:2019	Качество почвы. Руководство по выбору и оценке биологических анализов для определения экотоксикологических характеристик почв и почвенных материалов	Soil quality Guidance on the choice and evaluation of bioassays for ecotoxicological characterization of soils and soil materials
ISO 21479:2019	Качество почвы – Определение воздействия загрязняющих веществ на флору почвы – Жирнокислотный состав листьев растений, используемый для оценки качества почвы	Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Leaf fatty acid composition of plants used to assess soil quality
ISO 22190:2020	Качество почвы – Использование экстрактов для оценки биодоступности микроэлементов в почве	Soil quality – Use of extracts for the assessment of bioavailability of trace elements in soils

быть использован РД 52.18.344-93, ФР.1.39.2006.02264 М-П-2006 и др. [8, 9].

Оценку объектов, потенциально воздействующих на почву, также проводят с привлечением методов фитотестирования. Таким образом, согласно СП 2.1.7.1386-03 [10], осуществляется контроль

опасности отходов с использованием комплекса физико-химических и экотоксикологических методов, включающих метод фитотестирования, представленного в МР 2.1.7.2297-07.2.1.7 [11].

Наряду с комплексной оценкой почвы существуют ГОСТ по определению фитотоксических

свойств отдельных веществ-поллютантов, например, поверхностно-активных веществ (ГОСТ 33777-2016) и других веществ (ГОСТ 32627-2014, ГОСТ 33061-2014) [12–14].

В международной системе оценки химических веществ, разработанной ОЭСР (OECD – The Organisation for Economic Co-operation and Development), представлены методы оценки токсичности отдельных химических веществ, общих химикатов, биоцидов и средств защиты растений. В данной системе существуют 2 подхода к определению токсичности таких веществ в связи с их различным поступлением. Например, согласно Test No. 227: Terrestrial Plant, Test: Vegetative Vigour Test, испытуемое вещество распыляют на растение в стадии 2–4-х настоящих листьев [15], в то время как в Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test предусмотрено внесение веществ непосредственно на поверхность почвы или в почву совместно с семенами тест-растений [16]. Результаты данных тестов позволяют получить величину эффективной концентрации (*ECx*) или эффективной нормы внесения (*ERx*) для наиболее чувствительных параметров, рассчитать концентрацию без наблюдаемого эффекта (*NOEC*) и концентрацию испытуемого вещества с наименьшим наблюдаемым эффектом (*LOEC*).

В связи с появлением новых поллютантов (например, наноматериалов, в том числе нанопластика), развивается индивидуальный подход к определению их токсичности и для растений. Например, частицы разного размера нанопластика снизили всхожесть и скорость прорастания семян *Lepidium sativum* L. [17].

Более детальное рассмотрение и использование унифицированных стандартных методов фитотестирования, выполненных в разных лабораториях, позволяет сделать аналитические результаты более сопоставимыми, надежными и точными. Некоторые из существующих методов имеют нечетко прописанный аналитический протокол, который должен быть доработан или прописан исполнителями. Развитие методов заставляет периодически возвращаться к более детальному их обсуждению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, постоянная актуализация и систематизация существующих методов позволяет более профессионально и полно выполнить поставленные задачи по экотоксикологическому контролю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелехова О.П., Егорова Е.И., Евсеева Т.И., Глазер В.М., Гераськин С.А., Доронин Ю.К., Китаева А.А., Киташов А.В., Козлов Ю.П., Кондратьева И.А., Коссова Г.В., Котелевцев С.В., Маторин Д.Н., Остроумов С.А., Погосян С.И., Смуров А.В., Соловых Г.Н., Степанов А.Л., Тушмалова Н.А., Цаценко Л.В. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: уч. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2007. 288 с.
2. Лихачев С.В., Пименова Е.В., Жакова С.Н. Биотестирование в экологическом мониторинге: уч.-метод. пособие. Минсельхоз РФ, Перм. ГАТУ им. акад. Д.Н. Прянишникова. Пермь: ИПЦ “Прокрость”, 2020. 89 с.
3. Römbke J., Martin-Laurent F. Microbial, plant, and invertebrate test methods in regulatory soil ecotoxicology // Bioavailability of organic chemicals in soil and sediment. 2020. P. 369–388.
4. ГОСТ 17.4.3.04-85. Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения.
5. ГОСТ ISO 16198-2017. Качество почв. Метод определения биодоступности микроэлементов почвы для растений.
6. ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений.
7. ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений (переиздание).
8. РД 52.18.344-93. Методика выполнения измерений интегрального уровня загрязнения почвы техногенных районов методом биотестирования. Метод. указ.
9. ФР.1.39.2006.02264 М-П-2006 ФР.1.39.2006.02264 М-П-2006. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений, разработанная учреждением Российской академии наук Санкт-Петербургским НИЦЭБ РАН.
10. СП 2.1.7.1386-03 СП 2.1.7.1386-03. Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления.
11. МР 2.1.7.2297-07. 2.1.7. Почва. Очистка населенных мест. Бытовые и промышленные отходы. Санитарная охрана почвы. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности. Метод. рекоменд. (утв. Роспотребнадзором 10.10.2007).
12. ГОСТ 33777-2016, ГОСТ 33777-2016. Вещества поверхностно-активные. Метод определения фитотоксичности на семенах высших растений.
13. ГОСТ 32627-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения. Испытание на фитотоксичность (переиздание).
14. ГОСТ 33061-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения: тест на всхожесть семян и развитие проростков.

15. Test No. 227: Terrestrial Plant Test: Vegetative Vigour Test https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-227-terrestrial-plant-test-vegetative-vigour-test_9789264067295-en
16. Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-208-terrestrial-plant-test-seedling-emergence-and-seedling-growth-test_9789264070066-en
17. Bosker T., Bouwman L.J., Brun N.R., Behrens P., Vijver M.G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum* // Chemosphere. 2019. T. 226. C. 774–781.

Approach to the Choice of Phytotesting Methods for Soil Research

L. P. Voronina^{a, b, #} and K. E. Ponogaybo^a

^a Center for Strategic Planning and Management of Medical and Biological Health Risks
of the Federal Medical and Biological Agency of Russia
Pogodinskaya ul 10/1, Moscow 119121, Russia

^b Moscow State University named after M.V. Lomonosov
Leninskie gory, 1, p. 12, Moscow 119991, Russia

[#]E-mail: LVoronina@cspmz.ru

Due to the relevance of research in the field of environmental pollution, many specialists resort to a comprehensive assessment of determining the degree of toxicity of the objects under study. When assessing soils, phytotesting is a fundamental method. This analytical review should simplify the task of finding relevant methods for determining the toxicity of soil and individual substances for specialists in the field of ecotoxicology.

Key words: ecotoxicology, soil quality, GOST, ISO.

УДК 631.81:633.812

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ МЕЛИССЫ ЛЕКАРСТВЕННОЙ И СОДЕРЖАНИЕ В НЕЙ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ

© 2021 г. А. В. Ивойлов^{1,*}, И. А. Хапугин²

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
430005 Саранск, ул. Большевикская, 68, Россия

² Региональный центр выявления, поддержки и развития способностей и талантов у детей и молодежи “Мира”,
Центр непрерывного повышения профессионального мастерства педагогических работников “Педагог 13.ру”
430027 Саранск, ул. Транспортная, 19, Россия

*E-mail: ivoilov.av@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2021 г.

После доработки 26.04.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

Приведен обзор литературы о влиянии удобрений на продуктивность мелиссы лекарственной (*Melissa officinalis* L.) и содержание в ней эфирных масел. Показано, что внесение удобрений в дозах, оптимальных для конкретных почвенно-климатических условий, приводило к увеличению урожайности листостебельной массы растений, сбору эфирного масла с единицы площади, росту морфометрических показателей (высоты растений и числа стеблей). Рассмотрен вопрос о компонентном составе эфирного масла мелиссы лекарственной. Выявлено значительное варьирование его качественного состава из-за присущего терпеноидам свойства изомерии и их способности трансформироваться в процессе биохимических реакций из одного соединения в другое.

Ключевые слова: мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.), удобрения, продуктивность, выход эфирного масла, качество эфирного масла.

DOI: 10.31857/S0002188121090064

ВВЕДЕНИЕ

Мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.) – эфиромасличная культура, которую широко используют в медицинской, пищевой, парфюмерно-косметической, ликероводочной и других отраслях производства [1–10]. По экспертным оценкам, потребность в масле мелиссы составляет ≈500 т в год, из них 200 т – непосредственно для медицинских целей. При этом различные отрасли производства обеспечиваются отечественным сырьем незначительно, и большая его часть импортируется из-за рубежа [11–13]. В связи с этим актуально увеличение урожайности листостебельной массы мелиссы лекарственной и производства эфирного масла за счет улучшения агротехники, в том числе посредством эффективного применения удобрений.

Цель данного обзора – обобщение публикаций по влиянию удобрений на урожайность и качество листостебельной массы мелиссы лекарственной, а также на выход и качество ее эфирного масла.

КРАТКАЯ БОТАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НЕКОТОРЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЛИССЫ ЛЕКАРСТВЕННОЙ

Флора Российской Федерации оценивается в 12500 видов высших сосудистых растений [14]. Среди них насчитывается ≈1300 эфиромасличных видов из 77 семейств [4, 15–17]. Всего известно ≈18000 растений умеренного, субтропического и тропического климата, которые синтезируют эфирные масла. Среди них ≈300 видов имеют промышленное значение [18].

Растения, содержащие эфирные масла, широко распространены в растительном мире (общее число значимых эфирномасличных растений мировой флоры оценивается в 2500–3000 видов), но практическое значение в основном имеют растения из 20-ти семейств, главным образом из класса Двудольные (*Magnoliopsida* Brongn.) [4]. Наибольшее число эфирноносных растений приходится на семейство Яснотковые – (*Lamiaceae* Martinov): только в границах бывшего СССР их числится 187 видов [19].

Род Мелисса (*Melissa* Tourn. ex L.) относится к семейству Яснотковые (Lamiaceae Martinov) и включает по разным системам от 2-х до 10-ти видов [20]. Согласно базе данных Index Nominum Generisorum Международной ассоциации по таксономии растений (IAPT), род включает 5 видов: *Melissa axillaris* (Benth.) Bakh. F. — мелисса пазушная, *M. bicornis* Klokov — мелисса двурога, *M. flava* Benth. ex Wall. — мелисса желтая, *M. officinalis* L. — мелисса лекарственная и *M. yunnanensis* C.Y. Wu & Y.C. Huang — мелисса юннаньская [21]. Наиболее ценный из них вид — мелисса лекарственная, растение с лимонным ароматом [22–24].

Родиной мелиссы лекарственной принято считать Ближний Восток и Северную Африку, страны восточной части Средиземноморского побережья, где она встречается в диком виде на полях и в садах, вдоль обочин дорог [25, 26]. В настоящее время она произрастает в странах Европы, Африки, Северной и Южной Америки, в Иране, на Украине, Кавказе и в Средней Азии. Мелиссу культивируют как лекарственное и эфиромасличное растение в Великобритании, Болгарии, Сербии, Литве, Алжире, странах Средиземноморья, на Кавказе, в Краснодарском крае, Самарской обл., в Крыму [9, 22, 24, 27, 28].

Научное название рода произошло от греческого слова μέλισσα (*melissa*) — пчела, видовое — *officinalis* — указывает на лекарственные свойства мелиссы [29–31]. Существует много народных наименований мелиссы — лимонная трава, маточник, медовая трава, медовка, мелисса лимонная, мята лимонная, паточная трава, пчелиная трава, пчельник, роевник, цитрон-мелисса [32]. Эти названия свидетельствуют о ее приятном лимонном запахе, а также о связи растения с пчелами.

Мелисса лекарственная — многолетнее травянистое растение высотой 30–120 см с разветвленным корневищем. Стебли у нее прямостоячие четырехгранные, опушены короткими волосками с примесью железок или почти голые. Листья супротивные, черешковые, яйцевидные до закругленно-ромбических, края листовой пластинки зарубчато-пильчатые, снизу опушенные короткими волосками [33, 34]. Цветки мелкие, белого, желтоватого или розового цвета, расположенные по 3–12 шт. в однобоких ложных мутовках в пазухах верхних листьев. Чашечка с нижними шиловидными зубцами, длинноволосистая и железистая. Плод — продолговато-яйцевидный, каштаново-бурый орешек. Цветет в июне — августе. Плоды созревают в августе — сентябре [33, 35, 36].

Мелисса лекарственная — светолюбивое растение (любит открытые солнечные места), но может расти и в затененных условиях. Ее относят к

растениям длинного дня, цветение которых индуцируется “длинным днем” [37].

Мелисса — растение теплолюбивое. Зимостойкость ее невысокая, в средней полосе в отдельные годы отмечено подмерзание растений [38]. Семена ее прорастают при температуре 1–2°C, но для появления дружных всходов необходима температура 8–10°C. Продолжительность прорастания семян 3–25 сут, иногда требуется и больший срок [39]. Всходы могут выдерживать кратковременные заморозки до –5...–6°C, взрослые растения при заморозках нередко гибнут. У мелиссы 2-го и последующих лет жизни рост побегов весной начинается при температуре 2–6°C. Более интенсивно мелисса вегетирует при температуре воздуха 20–25°C [1, 40].

К почвам мелисса лекарственная неприхотлива, но предпочитает легкие структурные плодородные слабокислые почвы с умеренным увлажнением. На тяжелых глинистых и песчаных почвах культуру размещать не рекомендуется, они для нее малопригодны [38, 41, 42].

Мелисса лекарственная относится к растениям-мезофитам, которые приспособлены к произрастанию на почвах с достаточным, но не избыточным увлажнением. В то же время благодаря мощной корневой системе она может выдерживать засушливые периоды. Однако недостаток влаги во время бутонизации приводит к пожелтению растений и частичной потере листьев. Излишнее увлажнение почвы плохо влияет на развитие растений в начале вегетации и ведет к развитию грибных болезней. Самая большая потребность во влаге у мелиссы лекарственной приходится на период бутонизации—начала цветения [38].

В первый год жизни мелисса растет медленно, образуя лишь мощную розетку листьев, а корневая система, наоборот, развивается усиленно [43].

Мелисса при оптимальных условиях роста долговечна и может расти на одном месте до 20-ти лет. В средней полосе России она редко живет больше 3–5 лет и погибает во время суровой зимы, так как с возрастом морозостойкость растений снижается [44].

НАРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ МЕЛИССЫ ЛЕКАРСТВЕННОЙ

В культуре мелисса лекарственная известна с глубокой древности и упоминается в сочинениях античных авторов Феофраста, Diosкорида, Колумеллы и др. Греки и римляне выращивали это растение как лекарственное [45]. В большом почете мелисса лекарственная была у арабов, они отзывались о настое из свежих ее побегов как о “наполняющем сердце радостью и весельем” [38].

В “Каноне врачебной науки” более 1000 лет назад Авиценна сообщал о лечебных свойствах этого растения, называя мелиссу “усладой для сердца” [46]. Высоко ценил мелиссу и основатель ятрохимии (врачебной химии) Т. Парацельс, который считал данное растение самым “золотым лекарством” из всех имевшихся средств [47, 48].

Мелиссу издавна широко применяют в народной медицине различных стран. Считается, что растение возбуждает аппетит, усиливает деятельность пищеварительных органов, обладает легким слабительным и потогонным действием, прекращает тошноту и рвоту, освобождает желудок и кишечник от газов, прекращает судороги, уменьшает и снимает боли, благоприятно влияет на деятельность сердца, укрепляет и успокаивает нервную систему. Растение также регулирует половую деятельность, успокаивающе действуя при перевозбуждении половой функции [49–51]. В старину в селах Литвы настой травы мелиссы с майораном применяли для улучшения памяти. Верхушки побегов и листья применяли при зубной боли, ушибах, язвах, ревматизме [52].

Культивируют мелиссу лекарственную во многих странах мира, где она включена в реестр фармакопейных растений, в том числе с 1996 г. в Российской Федерации [25, 26, 45, 53–56]. Ее биологическая активность обусловлена наличием в растительном сырье эфирного масла, содержащего в качестве основных компонентов монотерпены – цитраль (генариаль + цитраль) (3,7-диметил-2,6-октадиеналь), гераниол [α -(*транс*-3,7-диметил-2,7-октадиен-1-ол), β -(*транс*-3,7-диметил-2,6-октадиен-1-ол)], нерол [α -(*цис*-3,7-диметил-2,7-октадиен-1-ол) и β -(*цис*-3,7-диметил-2,6-октадиен-1-ол)], цитронеллол (3,7-диметил-6-октен-1-ол, 3,7-диметил-7-октен-1-ол) и цитронеллаль (3,7-диметил-6-октеналь). Кроме того, в его состав входят геранилацетат (ацетат 3,7-диметил-*транс*-2,6-октадиен-1-ола), мирцен [β -изомер (7-метил-3-метил-1,6-октадиен)], β -кариофилленоксид, β -кариофиллен (4,11,11-триметил-8-метил-бицикло[7.2.0]ундец-4-ен) и другие терпеноиды. Активными компонентами, содержащимися в сырье мелиссы, являются также урсоловая, олеоноловая и розмариновая кислоты, фенольные соединения (в том числе производные коричной кислоты), флавоноиды (гликозиды лютеолина и апигенина) и другие соединения [57–59]. Всего идентифицировано и описано более 200 соединений, входящих в состав эфирного масла мелиссы [5, 25, 26, 60–75].

Эфирное масло мелиссы лекарственной обладает антиоксидантными [76–91], антиангиогенными [92], антибактериальными [93–105] и противоопухолевыми свойствами [106–108], его ис-

пользуют при лечении гриппа [109, 110], герпеса [111–114], как седативное и нейропротекторное средство [28, 115–129]. Наиболее активны против ряда патогенных грибов и микобактерий туберкулеза альдегиды (цитраль, цитронелаль), менее активны – спирты (гераниол). Противомикробное действие эфирного масла мелиссы выражено сильнее, чем у эфирных масел других представителей семейства Яснотковые, в том числе лаванды (*Lavandula* L. sp.) и розмарина (*Rosmarinus* L. sp.) [25].

Исследованиями [130] установлена высокая антимикотическая активность эфирных масел мелиссы лекарственной сорта Citromnella, что определяет, по мнению авторов, перспективы дальнейших исследований при разработке косметических и гигиенических средств для профилактики микозов.

Биологически активные вещества мелиссы лекарственной рекомендовано использовать в качестве доминирующих компонентов при создании комбинированных нейротропных препаратов [45, 129, 131] и для изготовления косметических средств [25, 28, 132, 133].

Масло мелиссы лекарственной и препараты на ее основе рекомендуют применять как противорвотное, мочегонное, повышающее аппетит средство, как спазмолитическое средство, регулирующее работу пищеварительного тракта, особенно при метеоризме, как болеутоляющее, при мигрени, бессоннице, деменции, кожных сыпях, диабете 2-го типа [134–140].

Листья мелиссы лимонной имеют мягкий лимонный аромат, который делает растение полезным в качестве ароматизатора в пищевых продуктах, пиве, мороженом и травяных чаях [141–146]. При этом использование мелиссы лекарственной в кулинарии, в пищевой промышленности, в качестве освежающего чая расширяется [6, 65, 147–149].

Молодые побеги и листья мелиссы, срезанные до цветения, используются как пряность с пряным, освежающим лимонным привкусом в европейской и американской кулинарии [150]. По данным [151], листья мелиссы содержат в среднем 254 (200–300) мг% витамина С и 76.4 (48–112) мг% витамина В₁ (тиомина). В свежем или сушеном виде листья мелиссы добавляют как пряную приправу к салатам, тертому сыру, супам, дичи, рыбным блюдам, грибам, а также для отдушки чая, уксуса, ликеров и напитков (ароматизация вин и ликеров – Шартрез, Бенедиктин, русской настойки Ерофеич), при засолке огурцов и помидоров [33, 152]. В Дании эту культуру применяют для консервирования мяса. Для сохранения аромата не рекомендуется ее кипятить [153]. Эфир-

ное масло также очень популярно в ароматерапии [6, 154–156].

Мелисса — ценный медонос, во время цветения дает много нектара. Мед имеет приятный аромат и вкус, относится к лучшим сортам [157]. Один цветок мелиссы за сутки выделяет от 0.145 до 0.278 мг сахара в нектаре. Нектаропродуктивность 1 га посева меняется от 133 до 200 кг [29, 158]. Все растение издает стойкий лимонный запах, который привлекает пчелиных маток и успокаивающе действует на пчел. Свежесорванным растением натирают руки перед осмотром пчел, роевней и новых ульев [29–31].

Следует добавить, что в настоящее время отечественная пищевая, фармацевтическая, парфюмерно-косметическая и другие отрасли промышленности проявляют интерес к пряно-ароматическим растениям [159, 160]. До распада СССР производством только лекарственно-ароматических растений занимались 33 совхоза АПК “Союзлекарспром”, располагавшиеся на Украине, в Белоруссии, на Северном Кавказе, в Грузии, Центральных областях, Поволжье, Западной Сибири, Казахстане, Киргизии, Крыму и на Дальнем Востоке [13, 161].

В настоящее время различные отрасли хозяйства России обеспечиваются отечественным сырьем незначительно, большую часть эфирного масла импортируют из-за рубежа, затрачивая на это десятки миллионов долларов [11–13]. По расчетам [12], потребности предприятий России в лекарственном и эфиромасличном сырье на сегодняшний момент составляют: эфирных масел — ~2500–3500 т, лекарственных трав — >100 тыс. т. В связи с этим весьма актуально увеличение урожайности этой ценной культуры за счет улучшения приемов агротехники и расширения посевных площадей, в том числе посредством интродукции в новые районы, пригодные для ее возделывания [12]. Этот вопрос стал более злободневен после введения против России европейскими странами и США экономических санкций, которые коснулись и эфиромасличного и лекарственного сырья [13].

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ МЕЛИССЫ ЛЕКАРСТВЕННОЙ

Для подавляющего большинства сельскохозяйственных культур вопрос о влиянии удобрений на величину и качество урожая не является новым. Его неоднократно освещали и продолжают освещать в отечественной и зарубежной научной литературе. Что касается эфиромасличных культур, и, в частности, мелиссы лекарственной, то публикаций по влиянию удобрений на урожай-

ность ее листостебельной массы, сбор семян и выход эфирного масла не только в отечественной, но и иностранной литературе крайне мало. Например, в материалах Международной научно-практической конференции “Научный и инновационный потенциал развития производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений”, состоявшейся в 2019 г. [162], из 58 сообщений лишь в 2-х приведены результаты исследований влияния удобрений на продуктивность лекарственных растений *Alchemilla vulgaris* L., *Arnica foliosa* Nutt. и одного эфиромасличного растения *Coriandrum sativum* L. Всего одна статья в этом сборнике посвящена мелиссе лекарственной [163], и в ней изложены материалы, связанные с онтогенезом, фенологией, морфометрическими показателями растений, содержанием эфирного масла в сыром сырье.

В Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU насчитывается >3000 публикаций о мелиссе лекарственной. В основном они посвящены использованию растительного сырья мелиссы в фитотерапии и фармакогнозии, парфюмерной и пищевой промышленности. Лишь незначительная часть работ посвящена вопросам агротехники мелиссы и ее интродукции, всего несколько работ — применению удобрений.

В иностранной литературе также указано, что использование мелиссы лекарственной в народной и официальной медицине с ее многочисленными преимуществами для здоровья людей привели к буму исследований в основном в области фитотерапии и фармакогнозии [164]. В то же время публикаций по вопросам агротехники мелиссы лекарственной крайне мало. Имеются, например, сообщения о сроках сбора урожая листостебельной массы [165–167], водном режиме культуры [168], применении известковых материалов под нее [169]. Встречаются работы, в которых исследовали влияние азотных удобрений на продуктивность различных видов растений, принадлежащих к семейству Lamiaceae [170–175].

Минеральное питание играет ключевую роль в росте и развитии всех сельскохозяйственных растений. Известно, что азот является одним из важнейших элементов минерального питания, необходимых для растений, а также составной частью всех белков и не может быть заменен никаким другим элементом [176–180]. Более того, он существует в структуре молекулы хлорофилла [181–184]. Поэтому неслучайно, что при возделывании сельскохозяйственных растений он чаще всего находится в первом минимуме [185–187]. Общеизвестно, что внесение азота в оптимальных дозах в составе удобрений увеличивает продуктивность растений. Отмеченная закономерность

прослежена и при использовании азотного удобрения при возделывании Melissa лекарственной. Например, в исследованиях, выполненных в условиях Ирана, азотное удобрение оказало существенное влияние на биологический урожай, высоту растения и количество побегов, содержание эфирного масла в растениях и выход эфирного масла с единицы площади. При этом умеренный уровень азота (90 кг д.в./га) обеспечивал более высокую урожайность листостебельной массы Melissa (6790 кг/га), а более низкая его доза (60 кг д.в./га) была оптимальной для содержания эфирного масла (0.258%). Напротив, доза N180 в качестве самой высокой обеспечивала лучшие урожаи для повторных укосов Melissa в Бразилии [167].

В опыте в условиях Ирана было изучено действие возрастающих доз азотных удобрений (0, 60, 90, 120, 150 и 180 кг д.в. азота/га в форме мочевины) на количественные и качественные показатели Melissa лекарственной [189]. Установлено, что N-удобрение оказало достоверное влияние на биологический урожай, содержание и выход эфирного масла, высоту растений и количество побегов. Наивысший урожай листостебельной массы (6790 кг/га) и высота растения (61.6 см) отмечены при внесении N90, а наибольшее количество побегов (32.6 шт./растение), содержание (0.258%) и сбор эфирного масла (16.0 кг/га) — при использовании N60.

В опыте в условиях Турции было изучено влияние возрастающих доз азота (0, 40, 80, 120 кг N/га) на урожайность и показатели качества Melissa лекарственной при разных схемах размещения растений (40 × 30, 40 × 40, 50 × 30 и 50 × 40 см). Установлено, что наибольшая урожайность листостебельной массы (2050 кг/га), доля листьев в урожае (73%) и сбор эфирного масла (1.84 л/га) были получены при внесении N120 и размещении растений по схеме 40 × 30 см [190].

В исследовании, выполненном в Польше, внесение N90—120P13—18K66—83 обеспечивало самые высокие урожаи Melissa лекарственной. При этом не было отмечено никакого влияния применения удобрений на содержание эфирного масла в листьях [191]. В полевом опыте в условиях Венгрии внесение N150P22Mg36 увеличивало на 25—27% сбор листостебельной массы Melissa по сравнению с неудобренным вариантом [192].

В мелкоделяночном полевом опыте в условиях средиземноморского побережья Турции было изучено действие 5-ти доз азота (N0, N50, N100, N150, N200) на фоне внесения P60 и K40 [193]. Установлены по годам исследования существенные различия в высоте растений, количестве сформированных ветвей, урожайности листосте-

бельной массы и листьев, кроме соотношения лист : стебель. Выявлено, что более высокие дозы азота увеличивали высоту растения, количество ветвей, урожайность листостебельной массы и листьев по сравнению с контрольным вариантом без азота. Доза N150 оказалась лучшей среди испытываемых. На выход эфирного масла отрицательно влияли дозы азота: самое высокое содержание эфирного масла в листостебельной массе (0.13%) было зафиксировано без внесения азотного удобрения, а наиболее низкое (0.06%, меньше в 2 раза) — при самой высокой дозе азота N200.

Исследования в условиях Бразилии свидетельствовали о высокой отзывчивости растений Melissa лекарственной на внесение навоза KPC и биоудобрения Vitassolo® [194]. Аналогичные результаты в той же Бразилии были получены ранее [195].

В опытах, проведенных в Бразилии, по изучению влияния навоза (0, 1, 2, 4, 8 кг/м²) и минерального удобрения (30 г NPK/м², марка 4 : 14 : 8) на продуктивность листостебельной массы и выход эфирного масла Melissa лекарственной выявлено, что навоз крупного рогатого скота влиял на высоту растений, на общий выход свежей и сухой массы листьев. Обе формы удобрения были лучше, чем неудобренный контроль, для всех показателей величины и качества урожая, за исключением длины и ширины листа и содержания масла в свежей и сухой биомассе растений [196, 197].

В полевом и вегетационном опытах, выполненных в Португалии с различными дозами и сочетаниями азотных, фосфорных, калийных и борных удобрений, было установлено, что Melissa лекарственная хорошо отзывается на внесение азотного удобрения. Например, урожайность листьев в полевом опыте увеличилась с 9.0 г (неудобренный контроль) до 15.3 г сухого вещества/растение (вариант с наибольшей дозой азота), а всей листостебельной массы — с 35.8 до 55.2 г сухого вещества/растение соответственно. При этом Melissa не реагировала на внесение фосфорного и калийного удобрений. Растения Melissa также не реагировали на применение бора. В ходе эксперимента были установлены размеры выноса урожаем N, P, K, Ca и Mg (27.7, 2.2, 16.9, 9.2 и 4.7 кг/т сухого вещества соответственно) [198]. В исследовании [199] также не отмечено увеличения выхода сухого вещества Melissa лекарственной с единицы площади в ответ на применение P-удобрения. Тем не менее, авторы сообщили об увеличении выхода сухого вещества при совместном применении азота и фосфора. В опыте [192] положительное влияние на выход сухого вещества Melissa лекарственной при применении P и K отмечали также лишь при вне-

сении их с другими питательными веществами, например, в сочетаниях NPMg и NPKMg.

В опыте в условиях Египта установлено, что внесение калийного удобрения в условиях водного стресса оказывало положительное влияние на рост и развитие растений мелиссы: К-удобрение значительно увеличило все параметры роста по сравнению с неудобренным вариантом [200]. Это свидетельствовало, что растения, страдающие от нехватки воды, имеют большую внутреннюю потребность в калии, что было установлено ранее другими исследователями [201, 202].

На русском языке доступных работ по удобрению мелиссы лекарственной — единицы. Подавляющее большинство исследований выполнены в условиях Республики Беларусь. В этих исследованиях показано, что внесение удобрений улучшало рост и развитие растений, способствовало увеличению их продуктивности. При этом внесение полного минерального удобрения приводило к обогащению надземных органов растений азотом и калием на фоне синергетического характера их взаимодействия.

Малое количество публикаций имеется и по влиянию удобрений на количественный и качественный состав эфирных масел в растениях мелиссы лекарственной. Чаще всего встречается информация о значительных различиях в составных частях эфирного масла мелиссы лекарственной, выращиваемой в разных регионах [10, 208–210].

Краткая подборка содержания основных компонентов эфирного масла в растениях *Melissa officinalis* различного происхождения составлена нами и приведена в табл. 1. Например, в масле из Италии отсутствуют нераль и гераниаль, в масле из Турции — кариофиллен и кариофиллен оксид, в масле из Таджикистана — линалоол и цитронеллол, в масле из Украины — линалоол, цитронеллол и гераниол. В эфирном масле растений, выращенных в окрестностях Красноярска (Россия), представлены все компоненты. По последним данным, это связано не только с условиями возделывания мелиссы лекарственной, но и обусловлено генотипом растений [211]. Такое значительное варьирование качественного состава эфирного масла мелиссы лекарственной отмечено во многих других исследованиях. Это связано, скорее всего, с присущим терпеноидам свойством изомерии и их способностью модифицироваться в процессе биохимических реакций из одного соединения в другое [212, 213].

Существенные различия касаются и количественного содержания эфирного масла в растениях, выращенных при разной агротехнике, в частности при внесении удобрений [214]. Например,

применение мочевины с пролонгированным действием не только увеличивало сбор листостебельной массы мелиссы лекарственной, но и содержание эфирного масла в растениях по сравнению с неудобренным контролем. Кроме того, возросла доля цитронеллала (с 18.98 до 29.81–34.21%) и нералья (с 13.23 до 24.58–31.78%) в эфирном масле. Имеются сведения, что содержание эфирного масла в растениях мелиссы лекарственной зависит от высоты среза растений и их составных частей (листьев, стеблей), возраста травостоя, климатических условий [215].

В исследовании, выполненном в условиях Словакии, содержание эфирного масла было самым высоким в верхней трети растений (0.13%), а самым низким (0.06%) — во всем растении; в средней части растений концентрация составляла 0.08% [229]. Аналогичная закономерность была отмечена ранее в условиях Испании [230].

Азот, один из важнейших элементов минерального питания, используется растениями для создания многих органических соединений: аминокислот, белков, ферментов и нуклеиновых кислот. Аминокислоты и ферменты в свою очередь играют ключевую роль в биосинтезе многих соединений, которые являются компонентами эфирных масел [6]. Другими важными элементами для растений, без которых нарушается их метаболизм, являются калий, фосфор, кальций, магний, сера, а также микроэлементы [18].

Есть сообщения, что азотные удобрения отрицательно влияют на содержание эфирного масла в растениях мелиссы. Например в исследовании, выполненном в Турции, самая высокая концентрация эфирного масла в растениях *Melissa officinalis* L. subsp. *altissima* (0.13%) отмечена в варианте без применения удобрений, а самая низкая (0.06%) — при внесении высокой дозы азота (200 кг д.в./га) [193]. Фактически, содержание эфирного масла в этом опыте постепенно снижалось при увеличении доз азота. В то же время в исследовании концентрация эфирного масла в растениях *M. officinalis* subsp. *officinalis* практически не зависела от дозы азотного удобрения и варьировала от 0.27 до 0.30%. В опыте в условиях Ирана содержание эфирного масла в листостебельной массе мелиссы лекарственной без применения удобрений составило 0.1053%, при внесении N60 — 0.258, N90 — 0.139, N120 — 0.108, N150 — 0.098 и N180 — 0.091%, т.е. внесение азота в умеренных дозах увеличивало концентрацию эфирного масла в растениях, а в высоких дозах — приводило к ее снижению [188].

В исследовании в условиях Египта внесение медленнодействующей мочевины в дозе 360 кг N/га увеличивало содержание эфирного масла в

Таблица 1. Содержание основных компонентов эфирного масла мелиссы лекарственной различного происхождения

Компонент (химическая формула)	% от цельного эфирного масла										
	Египет, 1995 г. [170]	Словакия, 1997 г. [217]	Франция, 1998 г. [218]	Куба, 1999 г. [219]	Иран, 2003 г. [123]	Сербия, 2004 г. [220]	Турция, 2004 г. [111]	Бразилия, 2005 г. [66]	Греция, 2005 г. [221]	Турция, 2008 г. [68]	Иран, 2009 г. [222]
Линалоол (C ₁₀ H ₁₈ O)	0.2	0.08	0.6	0.6	0.9	0.5	1.3	0.8	0.0	2.74	—
Цитронеллаль (C ₁₀ H ₁₈ O)	13.3	11.3	39.5	0.2	12.9	13.7	2.9	—	—	5.86	4.74
Цитронеллол (C ₁₀ H ₂₀ O)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25.2	23.3
Нерол (C ₁₀ H ₁₈ O)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нераль (C ₁₀ H ₁₆ O)	19.7	22.2	20.4	29.9	24.5	16.4	5.8	39.3	—	12.2	—
Гераниол (C ₁₀ H ₁₈ O)	4.2	—	0.2	—	0.7	3.4	0.4	—	—	4.95	44.2
Гераниаль (C ₁₀ H ₁₆ O)	26.8	33.6	27.8	41.0	35.5	23.4	6.6	47.3	—	38.1	—
Геранилацетат (C ₁₂ H ₂₀ O ₂)	1.8	5.9	0.6	4.4	7.1	0.8	—	1.5	—	—	—
Кариофиллен (C ₁₅ H ₂₄)	4.9	4.2	2.4	—	4.9	4.6	14.2	0.9	15.3	—	5.66
Кариофиллен оксид (C ₁₅ H ₂₄ O)	10.0	8.3	—	5.3	2.7	1.7	—	1.2	12.6	—	—
Лимонен (C ₁₀ H ₁₆)	0.7	0.1	—	—	—	2.2	—	—	0.0	—	—
α-Пинен (C ₁₀ H ₁₆)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
β-Пинен (C ₁₀ H ₁₆)	—	—	—	—	—	—	—	—	18.2	—	—

Таблица 1. Продолжение

Компонент (химическая формула)	Содержание, % от цельного эфирного масла										
	Турция, 2002 г. [223]		Италия, 2010 г. [224]	Египет, 2009 г. [216]		Украина, 2013 г. [72]	Таджикистан, 2013 г. [225]	Алжир, 2014 г. [226]	Польша, 2015 г. [227]	Россия, 2015 г. [68]	Россия, 2020 г. [228]
	Популяция из провинции			без удоб- рений	при- мене- ние моче- вины						
	Мене- мен	Bozdağ									
Линалоол (C ₁₀ H ₁₈ O)	2.74	1.28	0.70	8.08	3.22	—	—	0.3	—	1.78	8—19
Цитронеллаль (C ₁₀ H ₁₈ O)	5.86	12.91	39.6	19.0	29.8	4.03	2.80	6.3	13.4	1.48	10—16
Цитронеллол (C ₁₀ H ₂₀ O)	—	—	6.20	1.16	0.07	—	—	—	—	36.7	3—11
Нерол (C ₁₀ H ₁₈ O)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1—4
Нераль (C ₁₀ H ₁₆ O)	12.2	11.48	—	13.2	31.8	6.00	31.5	30.2	18.6	3.28	8—17
Гераниол (C ₁₀ H ₁₈ O)	4.95	8.69	5.70	2.29	0.56	—	0.20	0.6	—	27.2	11—19
Гераниаль (C ₁₀ H ₁₆ O)	38.1	53.68	—	—	—	8.21	43.2	44.2	25.0	4.39	10—18
Геранилацетат (C ₁₂ H ₂₀ O ₂)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Кариофиллен (C ₁₅ H ₂₄)	—	—	0.60	—	—	2.49	4.00	1.3	7.3	3.73	7—13
Кариофиллен оксид (C ₁₅ H ₂₄ O)	—	—	0.20	1.48	0.56	10.3	0.40	1.3	—	1.40	—
Лимонен (C ₁₀ H ₁₆)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
α-Пинен (C ₁₀ H ₁₆)	2.86	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
β-Пинен (C ₁₀ H ₁₆)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

растениях Melissa лекарственной с 0.03–0.06% до 0.11–0.13% [218].

В вегетационном опыте по изучению возрастающих доз калийного удобрения и разных уровней увлажнения почвы (80, 60 и 40% ППВ) в условиях Египта установлено, что калийные удобрения увеличивали урожайность листостебельной массы Melissa лекарственной и выход эфирных масел в условиях нехватки воды. Повышение уровня орошения увеличивало продуктивность Melissa лекарственной, а оптимальный уровень увлажнения почвы для формирования наивысшей урожайности и выхода эфирного масла составил 80% ППВ. Самая высокая продуктивность Melissa лекарственной была зарегистрирована при сочетании увлажнения почвы 80% ППВ и удобрении 0.8 г К/сосуд, в то время как самый высокий выход эфирных масел — при комбинации орошения 80% ППВ с удобрением 0.6 г К/сосуд [200].

Имеются также публикации, свидетельствующие о положительном действии микроудобрений на продуктивность растений Melissa лекарственной и выход эфирного масла [231–233].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обзор источников литературы свидетельствуют о том, что *Melissa officinalis* L. возделывают во многих странах мира и широко используют в медицинской, пищевой, парфюмерно-косметической, ликероводочной и других отраслях хозяйства.

Внесение удобрений в дозах, оптимальных для конкретных почвенно-климатических условий, приводит к увеличению урожайности листостебельной массы растений, сбору эфирного масла с единицы площади, росту морфометрических показателей (высоты растений и числа стеблей).

Рассмотрен вопрос о компонентном составе эфирного масла Melissa лекарственной. Выявлено значительное варьирование его качественного состава из-за присущего терпеноидам свойства изомерии и их способности трансформироваться в процессе биохимических реакций из одного соединения в другое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котуков Г.Н. Лекарственные и эфиромасличные культуры. Киев: Наукова думка, 1984. 200 с.
2. Анищенко И.Е. Пряно-ароматические и лекарственные растения семейства *Lamiaceae* в природе и культуре // Генетические ресурсы лекарственных и ароматических растений: сб. науч. тр. Международ. конф., посвящ. 50-летию Ботан. сада ВИЛАР. М., 2001. С. 120–126.

3. Ломакина Л.Г. Лаванда, мята, Melissa и другие целебные растения. Ростов н/Д.: Феникс, 2002. 156 с.
4. Ткаченко К.Г. Эфиромасличные растения и эфирные масла: достижения и перспективы, современные тенденции изучения и применения // Вестн. Удмурт. ун-та. Биология: науки о земле. 2011. Вып. 1. С. 88–100.
5. Паштейский В.С., Невкрытая Н.В. Использование эфирных масел в медицине, ароматерапии, ветеринарии и растениеводстве (обзор) // Таврич. вестн. аграр. науки. 2018. № 1 (13). С. 16–38.
6. Пучкова Т.В., Гуринович Л.К., Тарасов В.Е. Эфирные масла: химия, технология, анализ, применение. М.: ООО “Шк. космет. химиков”, 2020. 264 с.
7. Машанов В.И., Андреева Н.Ф., Машанова Н.С., Логвиненко И.Е. Новые эфирно-масличные культуры. Симферополь: Таврия, 1988. 160 с.
8. Назаренко Л.Г. Эфиромасличные, пряно-ароматические и лекарственные растения. Симферополь: Таврия, 2003. 202 с.
9. Назаренко Л.Г., Афонин А.В. Эфирносы юга Украины. Симферополь: Таврия, 2008. 144 с.
10. Efremov A.A., Zykoval I.D., Gorbachev A.E. Composition of the essential oil from the lemon balm growing in the neighborhood of Krasnoyarsk as indicated by gas chromatographymass spectrometry data // Rus. J. of Bioorg. Chem. 2016. V. 42. № 7. P. 726–729.
11. Черкашина Е.В. Развитие эфиромасличной и лекарственной отрасли в России: проблемы и пути решения // Агропрод. полит. России. 2014. № 2. С. 21–24.
12. Черкашина Е.В. Экономика и организация рационального использования и охраны земель эфиромасличной и лекарственной отрасли в Российской Федерации: Автореф. дис. ... д-ра экон. наук. М., 2014. 40 с.
13. Шпичка А.И., Семенова Е.Ф. Маркетинговый анализ разработки биотехнологии эрмотециевого масла как инновационной технологии современного эфиромасличного производства // Научн. обзор. Биол. науки. 2016. № 5. С. 28–49.
14. Камелин Р.В., Павлов В.Н. Растительный мир. Россия. БРЭ / Под ред. Осипова Ю.С. М., 2004. С. 84–94.
15. Дикорастущие полезные растения России / Под ред. Буданцева А.Л., Лесиовской Е.Е. СПб.: Изд-во СХПФА, 2001. 663 с.
16. Демьянова Е.И. Ботаническое ресурсосведение: уч. пособ. по спецкурсу. Пермь, 2007. 172 с.
17. Ткаченко К.Г. Флора России — потенциальный источник перспективных эфиромасличных растений // Научный и производственный потенциал развития производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений: Мат-лы Международ. науч.-практ. конф. (13–14 июня 2019 г., Симферополь). Симферополь: ИТ “АРИАЛ”, 2019. С. 7–14.
18. Nurzyńska-Wierdak R. Does mineral fertilization modify essential oil content and chemical composition in medicinal plants? // Acta Sci. Polonorum, Hortorum Cultus. 2013. Iss. 12. № 5. P. 3–16.

19. Горяев М.И. Эфирные масла флоры СССР. Алма-Ата: Изд-во АН КазахССР, 1952. 380 с.
20. Попова Н.В., Литвиненко В.И. Вопросы стандартизации растительного сырья — мелиссы листьев // Фармаком. 2009. № 2. С. 45–50.
21. Index Nominum Genericorum [Электр. ресурс]. Режим доступа: <https://naturalhistory2.si.edu/botany/ing/> (Дата обращения 15.03.2021).
22. Moradkhani H., Sargsyan E., Bibak H., Naseri B., Sadat-Hosseini M., Fayazi-Barjin A., Meftahizade H. *Melissa officinalis* L., a valuable medicine plant: A review // J. Medic. Plants Res. 2010. V. 4. № 25. P. 2753–2759.
23. Macura R., Michalczyk M., Banaś J. Effect of essential oils of coriander (*Coriandrum sativum* L.) and lemon balm (*Melissa officinalis* L.) on quality of stored ground veal // Zywnosc Nauka Technol. Jakosc. 2011. V. 18. № 4. P. 127–137.
24. Gurčik L., Dúbravská R., Miklovičová J. Economics of the cultivation of *Salvia officinalis* and *Melissa officinalis* // Agr. Econ. (Zemědělská Ekonomika). 2012. V. 51. № 8. P. 348–356.
25. Зузук Б.М., Куцик Р.В. Мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.) // Провизор. 2002. № 1. С. 36–39. URL: <http://provisor.com.ua/archive.php>
26. Зузук Б.М., Куцик Р.В. Мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.): Аналит. обзор // Провизор. 2002. № 2. С. 21–25. URL: <http://provisor.com.ua/archive.php>
27. Растительные ресурсы СССР. Цветковые растения, их химический состав, использование. Т. 6. Семейства Hippuridaceae — Lobelaceae. СПб.: Наука, СПб. отд-ние, 1991. 197 с.
28. Shakeri A., Sahebkar A., Javadi B. *Melissa officinalis* L. A review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology // J. Ethnopharmacol. 2016. V. 188. P. 204–228.
29. Глухов М.М. Важнейшие медоносные растения и способы их разведения. М.: Колос, 1980. 623 с.
30. Блинова К.Ф., Борисова Н.А., Гортинский Г.Б., Грушвицкий И.В., Забинкова Н.Н., Комарова М.Н., Мусаева Л.Д., Николаева Л.А., Регир В.Г., Селенина Л.В., Сыровежко Н.В., Теслов Л.С., Харитонов Н.П., Шатохина Р.К., Яковлев Г.П. Ботанико-фармакогностический словарь: справ. пособ. / Под ред. Блиновой К.Ф., Яковлева Г.П. М.: Высш. шк., 1990. 272 с.
31. Lust J. The most complete catalog of the herbs ever published. The herb book. N.Y.: Dover Publication, Mineola, 2014. 640 p.
32. Ботанический словарь / сост. Анненков И.Н. СПб.: Изд-во Имп. Академии наук, 1878. 668 с.
33. Полуденный Л.В., Сотник В.Ф., Хлапцев Е.Е. Эфиромасличные и лекарственные растения. М.: Колос, 1979. 286 с.
34. Дудченко Л.Г., Козьяков А.С., Кривенко В.В. Пряно-ароматические и пряно-вкусовые растения. Киев: Наукова думка, 1989. 304 с.
35. Сенов П.Л. Мелисса — *Melissa officinalis* L. // Эфирно-масличные растения, их культура и эфирные масла / Под ред. Вульфа Е.В., Нилова В.И. Т. III. Спец. часть. Л.: Изд-во ВАСХНИЛ, Ленинград. филиал, 1937. С. 216–219.
36. Задорожный А.М., Кошкин А.Г., Соколов С.Я., Шреттер А.И. Справочник по лекарственным растениям. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 415 с.
37. Гринкевич Н.И., Баландина И.А., Ермакова В.А., Зорин Е.Б., Ладыгина Е.Я., Самылина И.А., Сокольский И.Н. Лекарственные растения. Справ. пособ. М.: Высш. шк., 1991. 397 с.
38. Воронина Е.П., Горбунов Ю.Н., Горбунова Е.О. Новые ароматические растения для Нечерноземья. М.: Наука, 2001. 173 с.
39. Николаева М.Г., Разумовская М.В., Гладкова В.Н. Справочник по проращиванию покоящихся семян / Отв. ред. Данилова М.Ф. Л.: Наука, Ленинград. отд-ние, 1985. 348 с.
40. Горовая Т.К., Скляревский М.А. Новые сорта малораспространенных овощных культур (базилик, мелисса, змееголовник) // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования: Мат-лы V Междунаро. симп. (9–14 июня 2003 г., Пушкино). М.: Изд-во РУДН, 2003. Т. 2. С. 37–39.
41. Гусев С.П. Агротехнические указания по возделыванию лекарственных растений. М.: Медгиз, 1981. 290 с.
42. Martins E.R., Castro D.M., Castellani D.C., Dias J.E. Plantas medicinais. Viçosa: Editora UFV, 1998. P. 1–220.
43. Гусев Н.Ф., Петрова Г.В., Немерешина О.Н. Лекарственные растения Оренбуржья (ресурсы, выращивание и использование). Оренбург: Изд. центр ОГАУ, 2007. 332 с.
44. Гиренко М.М., Зверева О.А. Пряно-вкусовые овощи: Пособ. для садоводов-любителей. М.: Ниола-Пресс, 2007. 256 с.
45. Алексеева А.В. Трава мелиссы лекарственной — перспективный источник импортзамещающих нейротропных препаратов // Мед. альманах. 2011. № 1 (14). С. 233–237.
46. Авиценна (Ибн Сина). Канон врачебной науки. Минск: Попурри, 2000. 448 с.
47. Гаммерман А.Ф., Кадаев К.Н., Яценко-Хмелевский А.А. Лекарственные растения (Растения-целители): Справ. пособ. 4-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 1990. 544 с.
48. Куркин В.А. Основы фитотерапии: уч. пособие. Самара: ООО “Офорт”, ГОУ ВПО “СамГМУ”, 2009. 963 с.
49. Махлаюк В.П. Лекарственные растения в народной медицине. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1993. 544 с.
50. Акопов И.Э. Важнейшие отечественные лекарственные растения и их применение. Ташкент: Медицина, 1990. 444 с.
51. Ломакина Л.Г. Лаванда, мята, мелисса и другие целебные растения. Ростов н/Д.: Феникс, 2002. 156 с.
52. Кудинов М.А. Пряноароматические растения. Минск: Ураджай, 1986. 213 с.
53. Лекарственные растения государственной фармакопии: (Фармакогнозия): Уч. Пособ. для студентов фармацевт. ин-тов и фармацевт. фак-тов мед. вузов / Под ред. Самылиной И.А., Северцева В.А. М.: АНМИ, 2001. 488 с.
54. Brendler T., Kligler B., Keifer D., Abrams T.R., Woods J., Boon H., DeFranco Kirkwood C., Basch E., Lafferty H.J.,

- Ulbricht C., Hackman D.A. Lemon balm (*Melissa officinalis* L.): An Evidence-based systematic review by the natural standard research collaboration // J. Herb. Pharmacotherapy. 2005. V. 5. № 4. P. 71–114. https://doi.org/10.1300/J157v05n04_08
55. Воскобойникова И.В., Колхир В.К., Минеева М.Ф., Стрелкова Л.Б. Фито Ново-Сед – новое лекарственное средство растительного происхождения с анксиолитическими и седативными свойствами // Вопр. биол., мед. и фармац. химии. 2008. № 1. С. 38–45.
 56. Европейская фармакопея 8.0 / Официальный перевод Европейской Фармакопеи 8.0 на русский язык. 8-е изд. Т. 1. Сер. 50 (Сер. Европ. договоров). М.: Группа Ремедиум, 2015. 2036 с.
 57. Carnat A.P., Carnat A., Fraisse D., Lamaison J.L. The aromatic and polyphenolic composition of lemon balm (*Melissa officinalis* L. subsp. *officinalis*) tea // Pharm. Acta Helvet. 1998. V. 72. P. 301–305.
 58. Herodez S.S., Hadolin M., Skerget M., Knez Z. Solvent extraction study of antioxidants from Balm (*Melissa officinalis* L.) leaves // Food Chem. 2003. V. 80. P. 275–282.
 59. Рябинина Е.И., Зотова Е.Е., Пономарева Н.И., Рябинин С.В. Сравнительное исследование мелиссы лекарственной и шалфея лекарственного на содержание полифенолов // Вестн. ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2009. № 2. С. 49–53.
 60. Куркин В.А., Запесочная Г.Г., Авдеева Е.В., Болтабекова З.В. Качественный и количественный анализ сырья и настойки мелиссы // Раст. ресурсы. 1999. Т. 35. № 3. С. 116–120.
 61. Heitz A., Carnat A., Fraisse D., Carnat A.P., Lamaison J.L. Luteolin 3'-glucuronide, the major flavonoid from *Melissa officinalis* subsp. *officinalis* // Fitoterapia. 2000. V. 71. № 2. P. 201–202. [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(99\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(99)00118-5)
 62. Болтабекова З.В. Фармакогностическое исследование по стандартизации новых лекарственных средств на основе травы мелиссы лекарственной (*Melissa officinalis* L.): Автореф. дис. ... канд. фарм. наук. М., 2003. 25 с.
 63. Болтабекова З.В. Химический состав травы мелиссы лекарственной, культивируемый в Самарской области // Аспирант. чтения 2001: Сб. тез. докл. конф. молод. исслед-лей. Самара: СамарГМУ, 2001. С. 35–36.
 64. Toth I., Mrlanova J., Tekelova D., Koreňová M. Rosmarinic acid – an important phenolic active composition of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) // Acta Facult. Pharm. Univers. Comenianae. 2003. V. 50. P. 139–146.
 65. Гуринович Л.К., Пучкова Т.В. Эфирные масла: Химия, технология, анализ и применение. М.: Шк. Космет. Химиков, 2005. 192 с.
 66. Da Silva S.S., Salgueiro Lage A.C.L., Gil R.A. Da Silva San, Azevedo D. de A., Esquibel M.A. Essential oil composition of *Melissa officinalis* L. *in vitro* produced under the influence of growth regulators // J. Brazil. Chem. Soc. 2005. V. 16. P. 1387–1390.
 67. Mencherini T., Picerno P., Scesa C., Aquino R. Triterpene, antioxidant and antimicrobial compounds from *Melissa officinalis* // J. Natur. Prod. 2007. V. 70. № 12. P. 1889–1894. <https://doi.org/10.1021/np070351s>
 68. Adinec J., Piri K., Karami O. Essential oil component in flower of lemon balm (*Melissa officinalis*) // Amer. J. Biochem. Biotechnol. 2008. V. 4. № 3. P. 277–278.
 69. Алексеева А.В., Мазур Л.И., Куркин В.А. Мелисса лекарственная: перспективы использования в педиатрической практике // Мед. альм. 2009. Т. 9. № 4. С. 177–181.
 70. Попова Н.В., Литвиненко В.И. Анализ эфирного масла мелиссы лекарственной // Фармаком. 2009. № 1. С. 37–40.
 71. Попова Н.В., Литвиненко В.И. Вопросы стандартизации травы мелиссы // Фармаком. 2009. № 4. С. 20–24.
 72. Гребенникова О.А., Палий А.Е., Логвиненко Л.А. Биологически активные вещества мелиссы лекарственной // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер. Биология, химия. 2013. Т. 26 (65). № 1. С. 43–50.
 73. Масленников П.В., Чупахина Г.Н., Скрыпник Л.Н. Содержание фенольных соединений в лекарственных растениях ботанического сада // Изв. РАН. Сер. Биол. 2013. № 5. С. 551–557.
 74. Abdellatif F., Boudjella H., Zitouni A., Hassani A. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil from leaves of Algerian *Melissa officinalis* L. // EXCLI J. 2014. № 13. P. 772–781.
 75. Иванова Е.О., Изюмкина М.И., Колобаева А.А., Котик О.А. Анализ содержания эфирного масла и его качества в мелиссе лекарственной // Международ. научн. студ. вестн. Мат-лы конф. 2015. № 4. С. 353.
 76. Triantaphyllou K., Blekas G., Boskou D. Antioxidative properties of water extracts obtained from herbs of the species Lamiaceae // Inter. J. Food Sci. Nutr. 2001. V. 52. № 4. P. 313–317.
 77. Dragland S., Senoo H., Wake K., Holte K., Blomhoff R. Several culinary and medicinal herbs are important sources of dietary antioxidants // J. Nutr. 2003. V. 133. № 5. P. 1286–1290.
 78. Mimica-Dukic N., Bozin B., Sokovic M., Simin N. Antimicrobial and antioxidant activities of *Melissa officinalis* L. (*Lamiaceae*) essential oil // Acta Polon. Pharm. 2003. V. 60. P. 467–470.
 79. Mimica-Dukic N., Bozin B., Sokovic M., Simin N. Antimicrobial and antioxidant activities of *Melissa officinalis* L. (*Lamiaceae*) essential oil // J. Agr. Food Chem. 2004. V. 52. P. 2485–2489.
 80. Marongiu B., Porcedda S., Piras A., Rosa A., Deiana M. Antioxidant activity of supercritical extract of *Melissa officinalis* subsp. *officinalis* and *Melissa officinalis* subsp. *inodora* // Phytotherapy Res. 2004. V. 18. P. 789–792.
 81. Helmy S. Antioxidative properties and antimicrobial activity of different aromatic extracts of *Melissa officinalis* L. // Arab. Univ. J. Agr. Sci. 2006. V. 14. № 1. P. 299–316.
 82. Canadanović-Brunet J., Četković G., Dilas S., Tumbas V., Bogdanović V., Mandić A., Markov S., Cvetković D., Canadanović V. Radical scavenging, antibacterial and antiproliferative activities of *Melissa officinalis* L. extracts // J. Med. Food. 2008. V. 11. P. 133–143.
 83. Dastmalchi K., Dorman H.J.D., Oinonen P.P., Darwis Y., Laakso I., Hiltunen R. Chemical composition and *in vitro* antioxidative activity of a lemon balm (*Melissa offi-*

- cinalis* L.) extract // Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie. 2008. Band 41. S. 391–400.
84. Pereira R.P., Fachinetto R., Souza Prestes A. de, Puntel R.L., Santos da Silva G.N., Heinzmann B.M., Boschetti T.K., Athayde M.L., Bürger M.E., Morel A.F., Morsch V.M., Rocha J.B. Antioxidant effects of different extracts from *Melissa officinalis*, *Matricaria recutita* and *Cymbopogon citratus* // Neurochem. Res. 2009. V. 34. P. 973–983.
 85. Meftahizade H., Sargsyan E., Moradkhani H. Investigation of antioxidant capacity of *Melissa officinalis* L. essential oils // J. Med. Plants Res. 2010. V. 4. P. 1391–1395.
 86. Koksai E., Bursal E., Dikici E., Tozoglu F., Gulcin I. Antioxidant activity of *Melissa officinalis* leaves // J. Med. Plants Res. 2011. V. 5 (2). P. 217–222.
 87. Spiridon L., Colceru S., Anghel N., Teaca C.A., Bodirlau R., Armatu A. Antioxidant capacity and total phenolic contents of oregano (*Origanum vulgare*), lavender (*Lavandula angustifolia*) and lemon balm (*Melissa officinalis*) from Romania // Natur. Prod. Res. 2011. V. 25. P. 1657–1661.
 88. Ondrejovič M., Kraic F., Benkovičová H., Šilhár S. Optimisation of antioxidant extraction from lemon balm (*Melissa officinalis*) // Czech J. Food Sci. 2012. V. 30. № 4. P. 385–393.
 89. Jeung I.C., Jee D., Rho Chang-Rae, Kang S. *Melissa officinalis* L. extracts protect human retinal pigment epithelial cells against oxidative stress-induced apoptosis // Inter. J. Med. Sci. 2016. V. 13. № 2. P. 139–146.
<https://doi.org/10.7150/ijms.13861>
 90. Safaeian L., Sajjadi S., Javanmard S., Montazeri H., Samani F. Protective effect of *Melissa officinalis* extract against H₂O₂-induced oxidative stress in human vascular endothelial cells // Res. Pharm. Sci. 2016. V. 11. № 5. P. 383.
 91. Couladis M., Koutsaviti A. Chemical composition of the essential oils of *Salvia officinalis*, *S. fruticosa*, *Melissa officinalis*, and their infusions // Ratarstvo i Povrtarstvo. J. Field Veget. Crops Res. 2017. V. 54. № 1. P. 36–41.
<https://doi.org/10.5937/ratpov54-12365>
 92. Lee E.K., Kim Y.J., Kim J.Y., Song H.B., Yu H.G. *Melissa officinalis* extract inhibits laser-induced choroidal neovascularization in a rat model // PLoS One. 2014. V. 9. № 10. e110109.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110109>
 93. Iauk L., Bue A. M., Milazzo I., Rapisarda A., Blandino G. Antibacterial activity of medicinal plant extracts against periodontopathic bacteria // Phytotherapy Res. 2003. V. 17. P. 599–604.
 94. Mimica-Dukic N., Bozin B., Sokovic M., Simin N. Antimicrobial and antioxidant activities of *Melissa officinalis* L. (Lamiaceae) essential oil // Acta Polon. Pharm. 2003. V. 60. P. 467–470.
 95. Mimica-Dukic N., Bozin B., Sokovic M., Simin N. Antimicrobial and antioxidant activities of *Melissa officinalis* L. (Lamiaceae) essential oil // J. Agr. Food Chem. 2004. V. 52. P. 2485–2489.
 96. Bagdat R.B., Cosge B. The essential oil of Lemon balm (*Melissa officinalis* L.), its components and using fields // J. Faculty Agr. OMU. 2006. V. 21. № 1. P. 116–121.
 97. Ertürk O. Antibacterial and antifungal activity of ethanolic extracts from eleven spice plants // Biologia. 2006. V. 61. P. 275–278.
 98. Birdane Y.O., Büyükkokuroglu M.E., Birdane F.M., Cemek M., Yavuz H. Anti-inflammatory and antinociceptive effects of *Melissa officinalis* L. in rodents // Rev. Méd. Vétérinaire. 2007. V. 158. P. 75–81.
 99. Sarac N., Ugur A. Antimicrobial activities and usage in folkloric medicine of some Lamiaceae species growing in Mugla, Turkey // EurAsian J. Bio. Sci. 2007. № 4. P. 28–37.
 100. Rostami H., Kazemi M., Shafiei S. Antibacterial activity of *Lavandula officinalis* and *Melissa officinalis* against some human pathogenic bacteria // Asian J. Biochem. 2012. V. 7. № 3. P. 133–142.
 101. Stefanović O., Comić L. Synergistic antibacterial interaction between *Melissa officinalis* extracts and antibiotics // J. Appl. Pharm. Sci. 2012. V. 2 (1). P. 1–5.
 102. Ehsani A., Alizadeh O., Hashemi M., Afshari A., Aminzare M. Phytochemical, antioxidant and antibacterial properties of *Melissa officinalis* and *Dracocephalum moldavica* essential oils // Veterin. Res. Forum. 2017. V. 8. № 3. P. 223–229.
 103. Okmen A.S. Antibacterial activities of *Melissa officinalis* L. extracts against various *Micrococcus* species isolated from football player's shoes and its antioxidant activities // Pharmacophore. 2017. V. 8. № 4. P. 8–14.
 104. Korcan S.E., Aksoy B., Erdoğan S.F., Çigerci I.H. Investigation of antimicrobial activity and DNA protective capacity of *Melissa officinalis* extracts // Afyon Kocatepe Univ. J. Sci. Engin. 2018. V. 18. № 3. P. 757–762.
<https://doi.org/10.5578/fmbd.67554>
 105. Zazharskyi V.V., Davydenko P.O., Kulishenko O.M., Borovik I.V., Brygadyrenko V.V. Antimicrobial activity of 50 plant extracts // Biosyst. Divers. 2019. V. 27. № 2. P. 163–169.
<https://doi.org/10.15421/011922>
 106. De Sousa A.C., Gattass C.R., D.S. Alviano, Alviano C.S., Blank A.F., Alves P.B. *Melissa officinalis* L. essential oil: Antitumoral and antioxidant activities // J. Pharm. Pharmacol. 2004. V. 56. № 5. P. 677–681.
 107. Adjorjan B., Buchbauer G. Biological properties of essential oils: an updated review // Flav. Fragr. J. 2010. V. 25. P. 407–426.
 108. Orhan İ.E., Özçelik B., Kartal M., Kan Y. Antimicrobial and antiviral effects of essential oils from selected Umbelliferae and Labiatae plants and individual essential oil components // Turk. J. Biol. 2012. V. 36. P. 239–246.
 109. Pourghanbari G., Nili H., Moattari A., Mohammadi A., Iraj A. Antiviral activity of the oseltamivir and *Melissa officinalis* L. essential oil against avian influenza A virus (H₃N₂) // Virus Disease. 2016. V. 27. P. 170–178.
 110. Setzer W.N. Essential oils as complementary and alternative medicines for the treatment of influenza // Amer. J. Essent. Oils Nat. Prod. 2016. V. 4. № 4. P. 16–22.
 111. Allahverdiyev A., Duran N., Ozguven M., Koltas S. Antiviral activity of the Vatile oils of *Melissa officinalis* L. against *Herpes simplex* virus type-2 // Phytomedicine. 2004. V. 11. № 7–8. P. 657–661.

112. Nolkemper S., Reichling J., Stintzing F.C., Carle R., Schnitzler P. Antiviral effect of aqueous extracts from species of the Lamiaceae family against *Herpes simplex* virus type 1 and type 2 *in vitro* // *Planta Medica*. 2006. V. 72. P. 1378–1382.
113. Mazzanti G., Battinelli L., Pompeo C., Serrilli A.M., Rossi R., Sauzullo I., Mengoni F., Vullo V. Inhibitory activity of *Melissa officinalis* L. extracts on *Herpes simplex* virus type 2 replication // *Nat. Prod. Res.* 2008. V. 22. № 16. P. 1433–1440.
114. Schnitzler P., Schuhmacher A., Astania A., Reichling J. *Melissa officinalis* oil affects infectivity of enveloped herpesviruses // *Phytomedicine*. 2008. V. 15. P. 734–740.
115. Soulimani R., Fleurentin J., Mortier F., Misslin R., Derrieu G., Pelt J.M. Neurotropic action of the hydroalcoholic extract of *Melissa officinalis* in the mouse // *Planta Medica*. 1991. V. 57. P. 105–109.
116. Perry E.K., Pickering A.T., Wang W.W., Houghton P.J., Perry N.S. Medicinal plants and Alzheimer's disease: From ethnobotany to phytotherapy // *J. Pharm. Pharmacol.* 1999. V. 51. № 5. P. 527–534.
117. Coleta M., Campos M.G., Cotrim M.D., Cunha P. da Comparative evaluation of *Melissa officinalis* L., *Tilia europaea* L., *Passiflora edulis* Sims. and *Hypericum perforatum* L. in the elevated plus maze anxiety test // *Pharmacopsychiatry*. 2001. V. 34. Suppl. 1. S. 20–21.
118. Kennedy D.O., Little W., Haskell C.F., Scholey A.B. Anxiolytic effects of a combination of *Melissa officinalis* and *Valeriana officinalis* during laboratory induced stress // *Phytotherapy Res.* 2006. V. 20. P. 96–102.
119. Kennedy D.O., Little W., Scholey A.B. Attenuation of laboratory-induced stress in humans after acute administration of *Melissa officinalis* (Lemon balm) // *Psychosomat. Med.* 2004. V. 66. № 4. P. 607–613.
120. Kennedy D.O., Scholey A.B., Tildesley N.T., Perry E.K., Wesnes K.A. Modulation of mood and cognitive performance following acute administration of *Melissa officinalis* (Lemon balm) // *Pharm. Biochem. Behav.* 2002. V. 72. № 4. P. 953–964.
121. Kennedy D.O., Wake G., Savelev S., Tildesley N.T., Perry E.K., Wesnes K.A., Scholey A.B. Modulation of mood and cognitive performance following acute administration of single doses of *Melissa officinalis* (Lemon balm) with human CNS nicotinic and muscarinic receptor-binding properties // *Neuropsychopharmacology*. 2003. V. 28. № 10. P. 1871–1881.
122. Akhondzadeh S., Noroozian M., Mohammadi M., Ohadinia S., Jamshidi A.H., Khani M. *Melissa officinalis* extract in the treatment of patients with mild to moderate Alzheimer's disease: A double blind, randomised, placebo controlled trial // *J. Neurology. Neurosurg. Psychiatry*. 2003. V. 74. № 7. P. 863–866.
123. Sadraei H., Ghannadi A., Malekshahi K. Relaxant effect of essential oil of *Melissa officinalis* and citral on rat ileum contractions // *Fitoterapia*. 2003. V. 74. № 5. P. 445–452.
124. Куркин В.А., Дубищев А.В., Ежков В.Н., Тимова И.Н. Антидепрессантная активность некоторых фитопрепаратов и фенилпропаноидов // *Хим.-фарм. журн.* 2006. № 3. С. 33–38.
125. Куркин В.А., Дубищев А.В., Ежков В.Н., Тимова И.Н. Анксиолитическая активность некоторых фитопрепаратов и фенилпропаноидов // *Раст. ресурсы*. 2007. Т. 43. № 3. С. 131–139.
126. López V., Martín S., Gómez-Serranillos M.P., Carretero M.E., Jäger A.K., Calvo M.I. Neuroprotective and neurological properties of *Melissa officinalis* // *Neurochem. Res.* 2009. V. 34. P. 1955–1961.
127. Cases J., Ibarra A., Feuille're N., Roller M., Sukkar S.G. Pilot trial of *Melissa officinalis* L. leaf extract in the treatment of Vunteers suffering from mild-to-moderate anxiety disorders and sleep disturbances // *Med. J. Nutr. Metabolism*. 2011. V. 4. № 3. P. 211–218.
128. Lin S.H., Chou M.L., Chen W.C., Lai Y.S., Lu K.H., Hao C.W., Sheen L.Y. A medicinal herb, *Melissa officinalis* L. ameliorates depressivelike behavior of rats in the forced swimming test via regulating the serotonergic neurotransmitter // *J. Ethnopharmacol.* 2015. V. 175. P. 266–272.
129. Беккер Р.А., Быков Ю.В. Пряные и ароматические растения в психиатрии и неврологии: научн. обзор. Ч. II // В мире научных открытий (Siber. J. Life Sci. Agricult.). 2018. Т. 10. № 2. С. 40–73. <https://doi.org/10.12731/wsd-2018-2-40-73>
130. Salamon I., Kryvtsova M.V., Trush K.I., Fandalyuk A.I., Spivak M.J. Agro-ecological cultivation, secondary metabolite characteristics and microbiological tests of lemon balm (*Melissa officinalis*) – the variety Citronella // *Regulat. Mechanism. Biosyst.* 2019. V. 10. № 2. P. 264–268. <https://doi.org/10.15421/021940>
131. Лосева А.В. Антимикробная активность эфирных масел // Биотехнология. Взгляд в будущее: Мат-лы III Междунаро-д. научн. интернет-конф. (Казань, 24–25 марта 2014 г.). В 2 т. / Сервис виртуальных конф. Рак Grid; сост. Д.Н. Синяев. Казань: ИП Синяев Д.Н., 2014. Т. 1. С. 145–148.
132. Кулагин О.Л., Куркин В.А., Додонов Н.С., Царева А.А., Авдеева Е.В., Куркина А.В., Дремова Е.А., Самдарова Ф.Ш. Антиоксидантная активность некоторых фитопрепаратов, содержащих флавоноиды и фенилпропаноиды // *Фармация*. 2007. № 2. С. 30–32.
133. Шаталова Т.А., Вдовенко-Мартынова Н.Н., Айрапетова А.Ю., Темирбулатова А.М. Разработка технологии и анализа косметического крема на основе травы мелиссы лекарственной // *Совр. пробл. науки и образ-ния*. 2015. № 4. С. 563.
134. Masakova N.S., Tseevatuy B.S., Trofimenko S.L., Remmer G.S. The chemical composition of Vatile oil in lemon balm as an indicator of therapeutic use // *Planta Medica*. 1979. V. 36. P. 274.
135. Schultze W., Zaglein A., Hose S., Kubeczka K.H., Czygan F.C. Vatiles in flowers of balm (*Melissa officinalis* L.) // *Advances in labiate science* / Eds. R.M. Harley, T. Reynolds. UK: The Royal Botanic Gardens, 1992. P. 357–366.
136. Ballard C.G., O'Brien J.T., Reichelt K., Perry E.K. Aromatherapy as a safe and effective treatment for the management of agitation in severe dementia: The results of a double-blind, placebocontrolled trial with *Melissa* // *J. Clin. Psych.* 2002. V. 63. № 7. P. 553–558.

137. Neda M.D., Biljana B., Marina S., Natasa S. Antimicrobial and antioxidant activities of *Melissa officinalis* L. (Lamiaceae) essential oil // J. Agr. Food Chem. 2004. V. 52. P. 2485–2489.
138. Saglam C., Atakisi I., Turhan H., Kaba S., Arslanoglu F., Onemli F. Effect of propagation method, plant density, and age on lemon balm (*Melissa officinalis*) herb and oil yield // New Zealand J. Crop Hortic. Sci. 2004. V. 32. P. 419–423.
139. Ayanoglu F., Arslan M., Hatay A. Effects of harvesting stages, harvesting hours and drying methods on essential oil content of Lemon balm grown in Eastern Mediterranean // Inter. J. Bot. Stud. 2005. № 1. P. 138–142.
140. Chung M.J., Cho S.Y., Bhuiyan M.J.H., Kim K.H., Lee S.J. Anti-diabetic effects of lemon balm (*Melissa officinalis*) essential oil on glucose and lipid regulating enzymes in type-2 diabetic mice // Brit. J. Nutr. 2010. V. 104. P. 180–188.
141. Павлов Л.В., Штырно А.П. Требование к качеству мелиссы лимонной // Интродукция нетрадиционных и редких сельскохозяйственных растений: Мат-лы III Международ. научн.-практ. конф. (14–19 июня 2000 г., Пенза). В 3 т. Пенза, 2000. Т. 2. С. 101–103.
142. Лупинская С.М. Исследование органолептических и реологических свойств кефирного напитка с сыровороточным сиропом мелиссы лекарственной // Техн. и технол. пищ. производств. 2010. № 3 (18). С. 17–21.
143. Когай О.Ю., Мезенова О.Я. Повышение пищевой ценности пива при использовании мелиссы лекарственной (*Melissa officinalis*) // Вестн. молод. науки. 2017. № 3 (10). С. 14.
144. Сысоев В.Н., Волкова А.В. Применение мелиссы лекарственной при производстве реструктурированных мязови: сб. мат-лов III межвуз. научн.-практ. конф. с международ. участием, посвящ. 100-летию Самарского гос. мед. ун-та, Самара, 27 октября 2018 г. Самара: Самарский ГМУ, 2018. С. 206–210.
145. Наймушина Л.В., Ондар Д.К., Зыкова И.Д. Творожный продукт с добавками мелиссы лекарственной // Инновационные технологии в пищевой промышленности и общественном питании: мат-лы VI Международ. научн.-практ. конф., Екатеринбург, 16 апреля 2019 г. Екатеринбург, 2019. С. 105–109.
146. Наймушина Л.В., Зыкова И.Д., Ефремов А.А., Ондар Д.К. Обоснование применения мелиссы лекарственной в качестве ингредиента творожной пасты из курунги // Вестн. КрасГАУ. 2019. № 8 (149). С. 136–146.
147. Mihajlov L., Ilieva V., Markova N., Zlatkovski V. Organic cultivation of lemon balm (*Melissa officinalis*) in Macedonia // J. Agr. Sci. Technol. 2013. V. 3. № 11. P. 769–775.
148. Тохтарь В.К., Мартынова Н.А., Тохтарь Л.А., Левина И.Н. Правила сбора, сушки, хранения лекарственных растений и составление рецептуры травяных чаев. Белгород: ИД “Белгород”, НИУ “БелГУ”, 2017. 68 с.
149. Мартынова Н.А. Ароматические и эфиромасличные растения в коллекции ботанического сада и их применение для ароматических напитков // Ботанические сады в XXI веке: сохранение биоразнообразия, стратегия развития и инновационные решения: сб. научн. мат-лов II Всерос. научн.-практ. конф. с международ. участием, посвящ. 20-летию образования Бот. сада НИУ “БелГУ” / отв. ред. В. К. Тохтарь, Е. Н. Дунаева. Белгород: ИД “Белгород”, НИУ “БелГУ”, 2019. С. 27–29.
150. Беспалько Л.В., Пинчук Е.В., Ушакова И.Т. Мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.) — ценная пряно-ароматическая культура // Овощи России. 2019. № 3. С. 57–61.
151. Franke W. On the contents of vitamin C and thiamine during the vegetation period in leaves of three spice plants (*Allium schoenoprasum* L., *Melissa officinalis* L. and *Petroselinum crispum* (Mill.) Nym. ssp. *crispum*) // Acta Horticulturae. 1978. V. 73. P. 205–212. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1978.73.25>
152. Капелев И.Г. Пряноароматические растения. Симферополь: Таврия, 1973. 95 с.
153. Анищенко И.Е. Пряно-ароматические и лекарственные растения семейства Lamiaceae в природе и культуре // Генетические ресурсы лекарственных и ароматических растений: сб. научн. тр. Международ. конф., посвящ. 50-летию Бот. сада ВИЛАР. М., 2001. С. 120–126.
154. Валджи Х. Ароматерапия. Ростов/на Д.: Феникс, 1997. 320 с.
155. Babulka P. La melisse (*Melissa officinalis* L.) // Phytotherapie. 2005. № 3. P. 114–17. <https://doi.org/10.1007/s10298-005-0084-z>
156. Sodre A.C.B., Luz J.M.Q., Haber L.L., Marques M.O.M., Rodrigues C.R., Blank A.F. Organic and mineral fertilization and chemical composition of lemon balm (*Melissa officinalis*) essential oil // Rev. Brasileira Farmacognos. 2012. V. 22. P. 40–44. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000186>
157. Бурмистров А.Н. Медоносные растения и их пыльца. М.: Росагропромиздат, 1990. 191 с.
158. Пельменев В.К. Медоносные растения. М.: Россельхозиздат, 1985. 144 с.
159. Ткаченко К.Г. Эфирномасличные растения семейств Apiaceae, Asteraceae и Lamiaceae на Северо-Западе России (биологические особенности, состав и перспективы использования эфирных масел): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2013. 40 с.
160. Маланкина Е.Л., Ткачева Е.Н., Козловская Л.Н. Лекарственные растения семейства Яснотковые — Lamiaceae как источники флавоноидов // Вопр. биол., мед. и фарм. химии. 2018. Т. 20. № 8. С. 42–47.
161. Муравьева Д.А., Самылина И.А., Яковлев Г.П. Фармакогнозия. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Медицина, 2008. 656 с.
162. Научный и инновационный потенциал развития производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., Симферополь, 13–14 июня 2019 г. / Науч. ред. В.С. Паштетский, отв. ред. Л.А. Радченко, Н.В. Невкрытая. Симферополь: ИТ “АРИАЛ”, 2019. 360 с.

163. Найдя Н.М. Хозяйственно-ценные свойства мелиссы лекарственной в Ленинградской области // Научный и инновационный потенциал развития производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений: мат-лы Междунар. научн.-практ. конф. Симферополь: ИТ "АРИАЛ", 2019. С. 247–251.
164. Rodrigues M.Â., Ferreira I.Q., Afonso S., Arrobas M. Sufficiency ranges for lemon balm and nutrient removals in aboveground phytomass // J. Plant Nutr. 2018. V. 41. № 8. P. 996–1008. doi: . 2018.1431671 <https://doi.org/10.1080/01904167>
165. Blank A.F., Fontes S.M., Oliveira A.S., Mendonca M.C., Silva-Mann R., Arrigoni-Blank M.F. Produção de mudas, altura e intervalo de corte em *Melissa* // Horticultura Brasileira. 2005. V. 23. P. 780–784. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362005000300018>
166. Leon-Fernandez M., Sanchez-Govin E., Quijano-Celis C.E., Pino J.A. Effect of planting practice and harvest time in oil content and its composition in *Melissa officinalis* L. cultivated in Cuba // J. Essent. Oil Bearing Plants. 2008. V. 11. P. 62–68. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2008.10643599>
167. May A., Bovi A.O., Sacconi L.V., Samra A.G., Pinheiro M.Q. Produtividade da biomassa de melissa em função de intervalo de cortes e doses de nitrogenio // Horticultura Brasileira. 2008. V. 26. P. 312–315. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362008000300004>
168. Ghamarnia H., Mousabeygi F., Arji I. Lemon balm (*Melissa officinalis* L.) water requirement, crop coefficients determination and SIMDualKc model implementing // Europ. J. Med. Plants. 2015. V. 5. P. 281–296. <https://doi.org/10.9734/EJMP/2015/14138>
169. Blank A.F., Oliveira A.S., Arrigoni-Blank M.F., Faquin V. Efeitos da adubação química e da calagem na nutrição de melissa e hortelã-pimenta // Horticultura Brasileira. 2006. V. 24. P. 195–198. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362006000200014>
170. Kothari S.K., Singh U.B. The effect of row spacing and nitrogen fertilization on Scotch spearmint (*Mentha gracillis* Sole) // J. Essent. Oil Res. 1995. V. 7. № 3. P. 287–297.
171. Mitchell A.R., Farris N.A. Peppermint response to nitrogen fertilizer in an arid climate // J. Plant Nutr. Soil Sci. 1996. V. 19. № 6. P. 955–967.
172. Barauskien R., Venskutonis P.R., Viskelis P., Dambrauskien E. Influence of nitrogen fertilizers on the yield and composition of Thyme (*Thymus vulgaris*) // J. Agr. Food Chem. 2003. V. 51. № 26. P. 7751–7758.
173. Karioti A., Skaltsa H., Demetzos C., Perdetzoglou D., Economakis C.D., Salem A.B. Effect of nitrogen concentration of the nutrient solution on the volatile constituents of leaves of *Salvia fruticosa* Mill. in solution culture // J. Agr. Food Chem. 2003. V. 51. № 22. P. 6505–6508.
174. Özgüven M., Ayanoğlu F., Özel A. Effects of nitrogen rates and cutting times on the essential oil yield and components of *Origanum syriacum* L. var. *bevanii* // J. Agr. Crop Sci. 2006. V. 5. № 1. P. 101–105.
175. Sotiropoulou D.E., Karamanos A.J. Field studies of nitrogen application on growth and yield of Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum* (Link) Ietswaart) // Industr. Crops Prod. 2010. V. 32. № 3. P. 450–457.
176. Прянишников Д.Н. Азот в жизни растений и в земледелии СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 197 с.
177. Кретович В.Л., Каган З.С. Усвоение и превращение азота у растений // Физиология сельскохозяйственных растений. В 12 т. Т. 2. Минеральное питание. Рост и развитие. Эмбриогенез и органогенез / отв. ред. тома П.А. Генкель. М.: Изд-во МГУ, 1967. С. 217–288.
178. Измайлов С.Ф. Азотный обмен в растениях. М.: Наука, 1986. 320 с.
179. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: РАСХН, СО; Новосибирск. ГАУ, 2013. 790 с.
180. Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.
181. Fleming I. Absolute configuration and the structure of chlorophyll. // Nature. 1967. V. 216. P. 151–152. <https://doi.org/10.1038/216151a0>
182. Овчинников Ю.А. Биоорганическая химия. М.: Просвещение, 1987. 815 с.
183. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов: в 2-х томах; пер. с англ. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2008. Т. 1. 607 с.
184. Бертини И., Грей Г., Стифель Э., Валентине Дж. Биологическая неорганическая химия: структура и реакционная способность: в 2 т.; пер. с англ. 4-е изд., электр. М.: Лаборатория знаний, 2021. Т. 1. 506 с.
185. Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 296 с.
186. Завалин А.А., Пасынков А.В. Азотное питание и прогноз качества зерновых культур. М.: ВНИИА, 2007. 208 с.
187. Ивойлов А.В. Эффективность удобрения и известкования выщелоченных черноземов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 264 с.
188. Abbaszadeh B., Farahani H.A., Valadabadi S.A., Darvishi H.H. Nitrogenous fertilizer influence on quantity and quality values of balm (*Melissa officinalis* L.) // J. Agr. Exten. Develop. 2009. № 1. P. 31–33.
189. Rez E., Babak P., Nejaddehghan M. Nitrogenous fertilizer effects on quantity and quality standards of balm (*Melissa officinalis* L.) // Inter. J. Manure. Fertiliz. 2012. V. 1. № 1. P. 6–7.
190. Katar D., Gürbüz B. The effect of different plant densities and nitrogen doses on drug leaf yield and some features of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) // J. Agr. Sci. 2008. V. 14. № 1. P. 78–81.
191. Kordana S., Mordalski R., Zalecki R. Effect of amount of sown seeds, time of herb harvesting and fertilization on herb crop and quality of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) // Herba Polonica. 1997. V. 43. P. 135–144.
192. Nemeth-Zamborine E., Szabo K., Rajhart P., Lelik L., Bernath J., Popp T. Effect of nutrients on drug production and essential oil content of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) // J. Essent. Oil Bear. Plants. 2015. V. 18. P. 1508–1515. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.935040>
193. Özyiğit Y., Uçar E., Tütüncü B., İndibi İ., Turgut K. The Effect of components different nitrogen doses on yield and some yield of *Melissa officinalis* L. subsp. *altissima*

- (Sibth. et Smith) arcang // Turk. J. Agr. Res. 2016. V. 3. № 2. P. 139–144.
194. Santos M., Mendonça M., Carvalho Filho J., Dantas I., Silva-Mann R., Blank A. Cattle manure and biofertilizer on the cultivation of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) // Revista Brasileira de Plantas Medicinas. 2009. V. 11. № 4. P. 355–359. <https://doi.org/10.1590/S1516-05722009000400001>
195. Sousa A., Maracajá P., Junior J., Vasconcelos W., Maia C. Produção de biomassa na parte aérea da erva cidreira (*Melissa* ssp.) em função de doses de esterco bovino, húmus de minhoca, composto orgânico e NPK em casa de vegetação // Revista de Biologia e Ciências da Terra. 2003. V. 3. № 2. P. 233–236.
196. Sodré A., Haber L., Luz J., Marques M., Rodrigues C. Organic and mineral fertilization in lemon balm // Horticult. Brasil. 2013. V. 31. № 1. P. 147–152.
197. Sodré A., Luz J., Haber L., Marques M., Rodrigues C., Blank A. Organic and mineral fertilization and chemical composition of lemon balm (*Melissa officinalis*) essential oil // Revista Brasil. Farmacognos. 2012. № 22. P. 40–44. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000186>
198. Rodrigues M.Â., Ferreira I.Q., Afonso S., Arrobas M. Sufficiency ranges for lemon balm and nutrient removals in aboveground phytomass // J. Plant Nutr. 2018. V. 41. № 8. P. 996–1008. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431671>
199. Sharafzadeh S., Khosh-Khui M., Javidnia K. Effects of nutrients on growth and active substances of lemon balm (*Melissa officinalis*) // Acta Horticult. 2011. V. 925. P. 229–322. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.925.33>
200. Said-Al Ahl H.A.H., Abdou M., Omer E. Effect of potassium fertilizer on lemon balm (*Melissa officinalis* L.) grown under water stress conditions // J. Med. Food Plants. 2009. V. 1. № 2. P. 16–29.
201. Cakmak I., Engels C. Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation // Mineral nutrition of crops: Mechanisms and implications / Ed. Z. Rengel. N.Y.: The Haworth Press, 1999. P. 141–168.
202. Cakmak I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2005. V. 168. P. 521–530.
203. Аутко А.А. Биологические особенности роста и развития мелиссы лимонной и шалфея лекарственного на фоне различных доз удобрений // Овощеводство на рубеже третьего тысячелетия: мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Минск, 2000. С. 116–118.
204. Аутко А.А., Рупасова Ж.А., Аутко А.А. Влияние минерального питания и погодных условий на элементный состав надземной фитомассы пряно-ароматических лекарственных растений сем. Яснотковых в Беларуси // Изв. Акад. Аграр. наук Беларуси. 2002. № 2. С. 55–58.
205. Аутко А.А., Позняк О.В., Аутко А.А. Эффективность применения минеральных и органических удобрений при возделывании пряно-ароматических и лекарственных растений // Почвовед. и агрохим. 2005. № 1 (34). С. 157–160.
206. Позняк О.В., Аутко А.А. Эффективность применения минеральных и органических удобрений при возделывании пряно-ароматических и лекарственных растений // Эффективное овощеводство в современных условиях: мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Минск, 2005. С. 267–271.
207. Кузовкова А.А., Чижик О.В., Азизбеян С.Г. Влияние микроудобрения нового поколения “Нано-плант – Co, Mn, Cu, Fe” на рост и развитие мелиссы лекарственной (*Melissa officinalis* L.) // Биологические особенности лекарственных и ароматических растений и их роль в медицине: сб. научн. тр. Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 85-летию ВИЛАР. М.: Щербинская типография, 2016. С. 96–98.
208. Patora J., Majda T., Gora J., Klimek B. Variability in the content and composition of essential oil from lemon balm (*Melissa officinalis* L.) cultivated in Poland // J. Endocrinolog. Investigat. 2003. V. 26. № 10. P. 950–955.
209. Ефремов А.А., Зыкова И.Д., Горбачев А.Е. Компонентный состав эфирного масла мелиссы лекарственной окрестностей Красноярск по данным хромато-масс-спектрометрии // Химия раст. сырья. 2015. № 1. С. 77–81.
210. Seidler-Łożykowska K., Zawirska-Wojtasiak R., Wojtowicz E., Bocianowski J. Essential oil content and its composition in herb of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) breeding strains // J. Essent. Oil Res. 2017. V. 29. № 4. P. 1–6. <https://doi.org/10.1080/10412905.2016.1278407>
211. Kittler J., Krüger H., Ulrich D., Zeiger B., Schütze W., Böttcher Ch., Krämer A., Gudi G., Kästner U., Heuberger H., Marthe F. Content and composition of essential oil and content of rosmarinic acid in lemon balm genotypes (*Melissa officinalis*) // Genet. Res. Crop Evut. Publish. online: 07 April 2017. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0635-4>
212. Овчинников Ю.А. Биоорганическая химия. М.: Просвещение, 1987. 815 с.
213. Ткачев А.В. Исследование летучих веществ растений. Новосибирск: ИПП “Офсет”, 2008. 969 с.
214. Aziz E.E., El-Ashry S.M. Efficiency of slow release urea fertilizer on herb yield and essential oil production of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) plant // Amer.-Euras. J. Agr. Environ. Sci. 2009. V. 5. № 2. P. 141–147.
215. Невкрытая Н.В., Паиштецкий В.С., Новиков И.А., Коротких И.Н., Тхаганов Р.Р. Изменчивость компонентного состава эфирного масла *Melissa officinalis* L. в зависимости от особенностей климатических условий района возделывания // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 257–263. <https://doi.org/10.14258/jprm.2020016397>
216. Shalaby A.S., Khattab M.D., El-Gamassy A., El-Gamassy K. Cultivation of *Melissa officinalis* in Egypt. 1. Effects of fertilization, spacing and planting season // Acta Horticult. 1993. V. 331. P. 115–120.
217. Holla M., Svajdlénka E., Tekel J., Vavrkova S., Havranek E. Composition of the essential oil from *Melissa officinalis* L. cultured in Slovak Republic // J. Essent. Oil Res. 1997. V. 9. P. 481–484.
218. Carnat A.P., Carnat A., Fraisse D., Lamaison J.L. The aromatic and polyphenolic composition of lemon balm

- (*Melissa officinalis* L. subsp. *officinalis*) tea // Pharm. Acta Helvet. 1998. V. 72. P. 301–305.
219. Pino J.A., Rosado A., Fuentes V. Composition of the essential oil of *Melissa officinalis* L. from Cuba // J. Essenti. Oil Res. 1999. V. 11. P. 363–364.
220. Dukic N.M., Bozin B., Sokovic M., Simin N. Antimicrobial and antioxidant activities of (Lamiaceae) essential oil // J. Agr. Food Chem. 2004. V. 52. P. 2485–2489.
221. Basta A., Tzakou O., Couladi M. Composition of the leaves essential oil of *Melissa officinalis* from Greece // Flav. Fragr. J. 2005. V. 20. P. 642–644.
222. Adinee J., Piri K., Karami O. Essential oil component of lemon balm (*Melissa officinalis*) // Med. Aromat. Plant Sci. Biotechnol. 2009. V. 3. Special Iss. 1. P. 58–60.
223. Sari A.O., Ceylan A. Yield characteristics and essential oil composition of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) grown in the Aegean region of Turkey // Turk. J. Agr. Forest. 2002. V. 26. № 4. P. 217–224.
224. Almeida F., Frei F., Mancini E., Martino L., Feo V. Phytotoxic activities of mediterranean essential oils // Molecules. 2010. V. 15. P. 4309–4323.
225. Sharopov F.S., Wink M., Khalifaev D.R., Zhang H., Dosoky N.S., Setzer W.N. Composition and bioactivity of the essential oil of *Melissa officinalis* L. growing wild in Tajikistan // Inter. J. Tradition. Nat. Med. 2013. V. 2. P. 86–96.
226. Pereira R.P., Boligon A.A., Appel A.S., Fachineto R., Ceron C.S., Tanus-Santos J.E., Athayde M.L., J. Rocha B.T. Chemical composition, antioxidant and anticholinesterase activity of *Melissa officinalis* // Industr. Crop Prod. 2014. V. 53. P. 34–45.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.007>
227. Dzida K., Zawiślak G., Karczmarz K. Yields and quality of three herbal species from lamiaceae family // J. Elementol. 2015. V. 20. № 2. P. 273–283.
<https://doi.org/10.5601/jelem.2014.19.4.616>
228. Хапугин И.А., Ивойлов А.В. Влияние минеральных удобрений и погодных условий на продуктивность мелиссы лекарственной в условиях Республики Мордовия // Агрохимия. 2020. № 2. С. 37–42.
<https://doi.org/10.31857/S0002188120020076>
229. Mrlianova M., Tekel'ova D., Felklova M., Renöhl V., Tóth J. The influence of the harvest cut height on the quality of the herbal drugs *Melissa folium* and *Melissa herba* // Planta Med. 2002. V. 68. № 2. P. 178–180.
230. Adzet T., Ponz R., Wolf E., Schulte E. Content and composition of *Melissa officinalis* in relation to leaf position and harvest time // Planta Med. 1992. V. 58. P. 562–564.
231. Yadegari M., Shakerian A. Effects of micronutrients foliar application on essential oils of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) // Adv. Environ. Biol. 2014. V. 8. № 4. P. 1063–1068.
232. Yadegari M. Effect of micronutrients foliar application and biofertilizers on essential oils of lemon balm // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2016. V. 16. № 3. P. 702–715.
233. Kiani M. H., Mokhtari A., Zeinali H., Abbasnejad A., Afghani Khoraskani L. Rosmarinic acid and anthocyanin content improvement by foliar application of Fe and Zn fertilizer in Lemon balm (*Melissa officinalis* L.) // Inter. J. Adv. Biol. Biomed. Res. 2014. V. 2. Iss. 5. P. 1525–1530.

Effect of Fertilizers on the Productivity of Lemon Balm and the Content of Essential Oils in It

A. V. Ivoilov^{a, #}, and I. A. Khapugin^b

^a Ogarev Mordovia State University
Bolshevistskaya ul. 68, Saransk 430005, Russia

^b Center for Continuous Professional Development of teaching staff – “Pedagog 13.ru”
Transportnaya ul., 19, Saransk 430027, Russia

[#]E-mail: ivoilov.av@mail.ru

A review of the literature on the effect of fertilizers on the productivity of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) and the content of essential oils in it is presented. It is shown that the application of fertilizers in doses optimal for specific soil and climatic conditions leads to an increase in the yield of the leafy mass of plants, the collection of essential oil from a unit area, and an increase in morphometric parameters (plant height and number of stems). The issue of the component composition of lemon balm essential oil is considered. A significant variation of its qualitative composition was revealed due to the inherent property of isomerism in terpenoids and their ability to transform in the process of biochemical reactions from one compound to another.

Key words: lemon balm (*Melissa officinalis* L.), fertilizers, productivity, essential oil yield, quality of essential oil.