

Номер 11

ISSN 0002-1881

Ноябрь 2023



АГРОХИМИЯ

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 11, 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Калийное состояние почвы и продуктивность культур при внесении минеральных удобрений и растительных остатков

В. М. Назарюк, Ф. Р. Калимуллина 3

Физико-химические характеристики органо-глинистых комплексов агрочерноземов разной локализации на склоне

Е. В. Цомаева, З. С. Артемьева, Е. С. Засухина 11

Удобрения

Окупаемость фосфорных удобрений с учетом их длительного последствия

О. В. Волюнкина 23

Влияние бактериальных удобрений на микробиологическую активность чернозема сегрегационного в посевах ярового ячменя

А. Ю. Чевердин, Ю. И. Чевердин, М. Ю. Сауткина 29

Регуляторы роста растений

Чемерица Лобеля — перспективный биопродукцент биологически активных веществ для разработки биоцидного препарата в защите растений от вредных членистоногих

Т. А. Рябчинская, Л. Л. Яковлева, И. Ю. Бобрешова 36

Экстракт бадьяна в качестве регулятора роста растений

В. В. Тараненко, И. Г. Дмитриева, В. С. Муравьев 47

Пестициды

Влияние остаточных количеств гербицидов из класса сульфонилмочевин на развитие всходов люпина белого и маша по результатам биотестирования на дерново-подзолистой почве

С. В. Железова, В. Н. Колупаева, Е. В. Степанова, А. В. Мельников, М. А. Воронов, А. Э. Степанова, В. Е. Веллер 53

Эффективность и безопасность пестицидов в защите подсолнечника от вредных организмов

А. Б. Лаптиева, В. К. Мальцев 63

Совершенствование технологии применения биопрепаратов для защиты растений

А. К. Лысов, Т. В. Корнилов, И. Л. Краснобаева 71

Агроэкология

Транслокация кальция в растения ярового рапса из дерново-подзолистой супесчаной почвы, мелиорированной конверсионным мелом в широком интервале доз.

Сравнение методик подготовки данных для построения эмпирических моделей

А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, В. М. Буре 78

Плодородие и фитосанитарные качества перспективных сырьевых образцов для формирования искусственных почвенных смесей

Л. Л. Свиридова, М. А. Севостьянов, Е. В. Гришина, А. А. Свиридов, Д. Д. Поляков 86

Экотоксикология

Влияние осадков сточных вод в сочетании с различными добавками на азотное состояние чернозема выщелоченного

И. М. Габбасова, Т. Т. Гарипов, Е. С. Дорогая, М. А. Комиссаров, Ф. И. Назырова, А. С. Нигматзянов 92

Contents

No. 11, 2023

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Potash State of the Soil and Crop Productivity when Applying Mineral Fertilizers and Plant Residues

V. M. Nazariuk, F. R. Kalimullina

3

Physic-Chemical Characteristics of Organo-Clay Complexes of Agrochernozems of Different Localization on the Slope

E. V. Tsomaeva, Z. S. Artemieva, E. S. Zasukhina

11

Fertilizers

Payback of Phosphorus, Taking into Account Its Long-Term Aftereffect

O. V. Volynkina

23

Effect of Bacterial Fertilizers on the Microbiological Activity of Segregated Chernozem in Spring Barley Crops

A. Y. Cheverdin, Yu. I. Cheverdin, M. Y. Sautkina

29

Plant Growth Regulators

Hellebore Lobelya Is a Perspectiveness Bioproducer for the Development of a Biocide Preparation in Plant Protection against Harmful Arthropods

T. A. Ryabchinskaya, L. L. Yakovleva, I. Yu. Bobreshova

36

Star Anise Extract as a Plant Growth Regulator

V. V. Taranenko, I. G. Dmitrieva, V. S. Muravyov

47

Pesticides

Effect of Sulfonylureas Residues on the Lupine and Vigna Seedlings Development during Biotesting Research on Sod-Podzolic Soil

*S. V. Zhelezova, V. N. Kolupaeva, E. V. Stepanova, A. V. Melnikov,
M. A. Voronov, A. E. Stepanova, V. E. Veller*

53

Effectiveness and Safety of Pesticides in Protecting Sunflowers from Pests

A. B. Laptiev, V. K. Maltsev

63

Improvement of the Technology of Application of Biological Preparations for Plant Protection

A. K. Lysov, T. V. Kornilov, I. L. Krasnobaeva

71

Agroecology

Translocation of Calcium into Spring Rape Plants from Sod-Podzolic Sandy Loam Soil Reclaimed with Conversion Chalk in a Wide Range of Doses. Comparison of Data Preparation Techniques for Building Empirical Models

A. V. Litvinovich, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure

78

Fertility and Phytosanitary Qualities of Promising Raw Materials for the Formation of Artificial Soil Mixs

L. L. Sviridova, M. A. Sevostyanov, E. V. Grishina, A. A. Sviridov, D. D. Polyakov

86

Ecotoxicology

Impact of Sewage Sludges in Combination with Various Amendments on the Nitrogen State of Leached Chernozem

*I. M. Gabbasova, T. T. Garipov, E. S. Dorogaya, M. A. Komissarov,
F. I. Nazyrova, A. S. Nigmatzyanov*

92

КАЛИЙНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ КУЛЬТУР ПРИ ВНЕСЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ

© 2023 г. В. М. Назарюк¹, Ф. Р. Калимуллина^{1,*}

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 8/2, Россия

*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 04.04.2023 г.

После доработки 12.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В микрополевых опытах, проведенных на серой лесной почве, изучены изменения форм калия под влиянием внесения минеральных удобрений и растительных остатков. Показано, что почвенный калий, содержащийся в водорастворимой и легкообменной форме, изменялся в широких пределах. В условиях 2012 г. при внесении K60 на фоне азота и фосфора по сравнению с контролем возросло содержание водорастворимого калия примерно в 2, легкообменного — в 4 раза. В случае заделки растительных остатков в почву содержание калия в водорастворимой форме повысилось в 2 раза, легкообменной — в 2,5 раза соответственно. Содержание обменного калия изменялось в вариантах мало, изменения затрагивали в большей степени необменную форму. В частности, содержание необменного калия в 2018 г. по сравнению с 2012 г. снизилось в 1,5–2,0 раза, что потребовало создания более надежной основы для получения объективной информации о состоянии калийного фонда почв лесостепной зоны. Под влиянием K-удобрений в сочетании с растительными остатками стабилизировалась продуктивность растений, и при этом складывался положительный баланс калия в почве.

Ключевые слова: почва, формы калия, севооборот, злаки, урожайность, растительные остатки, баланс.

DOI: 10.31857/S0002188123110108, **EDN:** PQVHGS

ВВЕДЕНИЕ

Получение устойчиво высокой продуктивности сельскохозяйственных культур невозможно добиться без надежного обеспечения растений калийным питанием [1, 2]. Особенно остро такая ситуация возникает на почвах легкого гранулометрического состава [3, 4], подверженных водной и ветровой эрозии [5, 6], при размещении культур в системе севооборотов без достаточного обоснования специфики конкретных почвенно-климатических условий [7, 8]. Все это отражается на экологической устойчивости агроценозов к неблагоприятным условиям окружающей среды [9] и, как следствие, нередко вызывает снижение продуктивности культур. Решение данной проблемы затрагивает особенности заделки соломы в пахотный слой [10, 11], поиск оптимальных доз минеральных удобрений, изученность которых в настоящее время сильно отличается между собой как в географическом, так и почвенно-экологическом аспектах [12, 13].

Обоснована специфика калийного питания растений [14, 15], основанная на изучении влияния длительного применения удобрений на разных типах почв, выявлении показателей, характеризующих их калийное состояние в агроценозах. Установлено [16], что урожайность озимой пшеницы >30 ц/га можно получить во всех почвенно-климатических зонах страны только на высококультурных почвах. Внесение полного минерального удобрения N90P90K90 способствовало повышению содержания всех форм калия в почве на 20–50% [17]. В минеральном питании растений значительно лучше изучена проблема, связанная с изучением роли растительных остатков в азотном режиме почв и продуктивности растений. Однако крайне недостаточно проведено исследований, направленных на выяснение роли растительных остатков и их сочетания с минеральными удобрениями в формировании калийного фонда почв.

Цель работы — изучить состояние форм калия в серой лесной почве и обосновать эффективность применения минеральных удобрений при

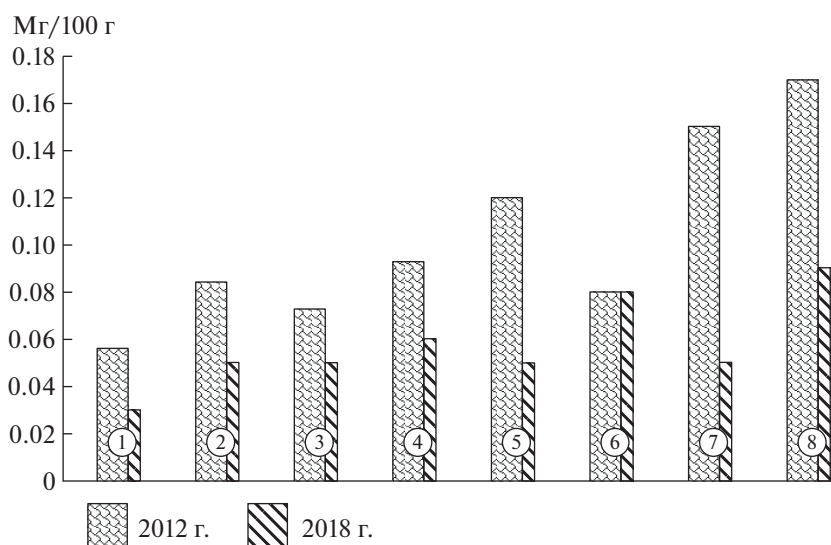


Рис. 1. Влияние минеральных удобрений и растительных остатков (PO) на аккумуляцию водорастворимого калия в почве, варианты: 1 – контроль без удобрений, 2 – запахка PO, 3 – N30P20K30, 4 – N30P20K30 + PO, 5 – N60P40K60, 6 – N60P40K60 + PO, 7 – N90P60K90, 8 – N90P60K90 + PO.

запахивании растительных остатков в системе севооборота.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение эффективности внесения минеральных удобрений и заделки в почву соломы проводили в модельном полевом севообороте с чередованием культур: овес сорта Ровесник–ячмень сорта Ача–пшеница сорта Новосибирская 22 с 2014 по 2016 г. Учетная площадь делянки составляла 1 м². Почва опытного участка – серая лесная среднесуглинистого гранулометрического состава, слабо обогащена гумусом (3.94%), имела низкое содержание обменного калия, pH 7.2. Почву каждой делянки оборачивали полиэтиленовой пленкой на глубину пахотного слоя. Почвенные образцы отбирали весной и осенью, растительные – в фазах кущения и уборки урожая.

Потребность растений в макроэлементах рассчитывали, исходя из эффективных доз минеральных удобрений, установленных ранее в полевых опытах [18, 19]. В качестве органического удобрения использовали пожнивные и корневые остатки, надземную вегетативную массу зерновых культур (солому), которые измельчали после уборки урожая и затем осенью заделывали в почву.

Аналитическую работу выполняли в трехкратной повторности следующими методами: содержание водорастворимого калия определяли при взаимодействии воды с почвой в соотношении 1:5, легкообменного калия – в 0.005 н. CaCl₂, обменного – в 1 н. CH₃COONH₄ (по Масловой), не-

обменного – в 2 н. HCl (по Пчелкину). Запасы почвенного калия рассчитывали, исходя из содержания элемента (данные получены нами) и плотности сложения для серой лесной почвы [20]. Доступный для растений калийный пул в почве определяли как суммарную величину водорастворимой, легкообменной, обменной и необменной форм. Полагали, что структурный и матричный калий при применении минеральных удобрений вряд ли может иметь существенное значение в калийном питании растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование показало, что в начальный период освоения севооборота (2012 г.) минимальное содержание водорастворимого калия в почве было отмечено в контрольном варианте (рис. 1).

Заделка в почву растительных остатков заметно повысила содержание калиевых соединений, что связано с активизацией перехода легкорастворимых солей в почвенный раствор. Внесение минимальной дозы удобрений N30P20K30 без растительных остатков практически не отразилось на дальнейшем повышении содержания водорастворимого калия в почве, что свидетельствовало о примерно одинаковом воздействии растительных остатков и минеральных удобрений на почву при усвоении элемента из почвенного раствора. И только при увеличении дозы азота, фосфора и калия в 2 раза возросло количество водорастворимого калия, причем внесение минеральных удобрений иногда могло иметь не-

которое преимущество перед органическими. Внесение максимальной дозы NPK в начальный период вегетации культур обеспечило самое высокое содержание водорастворимых солей калия в почве.

В результате обменных процессов содержание водорастворимых форм K^+ стабилизировалось на определенном уровне содержания калия в почве. Содержание водорастворимого калия за длительный период (с 2012 по 2018 гг.) снизилось во всех вариантах опыта примерно в 1.5–2.0 раза. Исключение составил лишь вариант N60P40K60, в котором содержание водорастворимого калия в почве в разные периоды было одинаковым и составило 0.5 мг/100 г. Полагаем, что это связано с различным усвоением калия растениями из водорастворимой формы в начальный период и в конце ротации, что привело к выравниванию почвенных процессов. Энергетические затраты, связанные с поглощением ионов K^+ корневыми волосками будут, очевидно, существенно меньше в начальный период севооборота, чем в заключительный, что и сказалось на распределении элемента в этой форме. Наиболее высокое содержание водорастворимого калия было в варианте N90P60K90 + растительные остатки (PO) в 2018 г. и минимальное — в контрольном варианте.

Изучение состояния легкообменной формы почвенного калия показало, что ее содержание во многом зависело от длительности использования минеральных удобрений и запахивания растительных остатков (табл. 1).

В контрольном варианте исходное содержание легкообменного калия в почве было весьма низким (≈ 1 мг/100 г). Оно постепенно снижалось и за 18 лет возделывания зерновых культур уменьшилось почти в 5 раз. Заделка в почву растительных остатков привела к существенному увеличению содержания легкообменного калия. В условиях 2012 г. его величина была восстановлена, однако в дальнейшем она вновь стабилизировалась на уровне 0.4 мг/100 г. Отсюда видно, что содержание легкообменного калия, связанное с процессами минерализации органического вещества, варьировало в довольно широких пределах. Однако в раннее проведенных исследованиях показано [21], что при длительном отрицательном балансе элемента всегда сохраняется определенный уровень легкообменного калия в почве, что дало возможность автору использовать содержание элемента в этой форме в качестве показателя обеспеченности почв калием.

Внесение минеральных удобрений в возрастающих дозах обычно повышало содержание легко-

Таблица 1. Содержание и запасы легкообменного калия в почве при многолетнем внесении минеральных удобрений и растительных остатков (PO)

Вариант	1998 г.		2012 г.		2018 г.	
	1	2	1	2	1	2
Контроль	0.9	18	0.4	9	0.2	4
PO	—	—	0.9	16	0.4	7
N30P20K30	0.8	17	0.8	17	0.5	11
N30P20K30 + PO	—	—	1.1	20	1.1	20
N60P40K60	0.9	18	1.6	35	0.7	15
N60P40K60 + PO	—	—	1.8	32	1.1	20
N90P60K90	0.8	17	2.4	53	1.1	24
N90P60K90 + PO	—	—	2.2	40	1.5	27
HCP ₀₅	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	1

Примечание. В графе 1 — содержание калия, мг/100 г, в графе 2 — запасы элемента, кг/га.

обменного калия в почве независимо от условий года. Наибольшее его содержание отмечали в почве в середине ротации зернового севооборота и существенно меньшее — в конце вегетационного периода в 2018 г. Изменения в содержании легкообменного калия в почве, вероятно, были связаны с различной интенсивностью минерализации органического вещества, что влияло на темпы высвобождения катиона в пахотном горизонте. Применение минеральных удобрений в дозах K60–90 заметно увеличивало содержание калия в этой форме. Заделка в почву растительных остатков на фоне минеральных удобрений стимулировало повышение содержания легкообменного калия. Учитывая высокую усвояемость этой формы корневой системой растений, она имеет важное значение в калийном режиме почвы в течение всего периода вегетации. Под влиянием минеральных удобрений возрастали запасы легкообменного калия в почве, которые во многом отражали определенную закономерность ее содержания. В условиях 2012 г. максимальные запасы наблюдали при внесении минеральных удобрений в дозе N90P60K90, в 2018 г. — при их сочетании с растительными остатками.

Содержание обменного калия мало изменялось под влиянием минеральных удобрений, использованных в минимальной дозе (табл. 2). При их внесении в повышенной дозе, особенно максимальной, отмечали заметное увеличение содержания обменного калия в почве. Хотя в некоторых случаях выявили лишь тенденцию к возрастанию содержания этой формы, что, по-видимому, было связано с гранулометрическим составом исследованной почвы. Она обладала значительной емкостью катионного обмена (ЕКО) [22], что в опреде-

Таблица 2. Роль минеральных удобрений и растительных остатков (*PO*) в формировании запасов обменного калия в почве

Вариант	1998 г.	2012 г.	2018 г.	В среднем за 18 лет	Lim изменений
Контроль	10.6	8.9	9.0	9.5	7.9–10.4
<i>PO</i>	—	10.1	10.9	10.5	9.2–11.6
N30P20K30	10.2	9.7	11.1	10.3	8.1–12.6
N30P20K30 + <i>PO</i>	—	13.4	14.6	14.0	9.8–17.9
N60P40K60	10.9	12.8	12.5	12.1	10.4–15.2
N60P40K60 + <i>PO</i>	—	13.9	17.9	15.9	10.8–20.0
N90P60K90	10.0	14.1	12.9	12.9	9.8–16.0
N90P60K90 + <i>PO</i>	—	15.9	19.3	17.6	10.0–19.2
<i>HCP</i> ₀₅	0.6	0.8	0.9		

ленной степени нивелировало незначительные изменения в физико-химических процессах в серой лесной почве и ее поглотительной системе. Заделка в почву растительных остатков влияла существенно на содержание обменного калия в почве, что наблюдали как при минимальной дозе удобрений, так и максимальной. За 18 лет выращивания зерновых культур на фоне достаточного минерального питания, что обеспечивалось внесением дозы N90P60K90, в случае запахивания растительных остатков содержание обменного калия в почве возросло в 2 раза. Пределы изменений оказались значительными, во всех удобренных вариантах опыта наблюдали существенные отклонения в содержании обменного калия.

В системе применения удобрений важно оценить возможности обеспечения растений почвенным калийным питанием [23]. Экспериментально найдено, что для большинства культур при их возделывании на серой лесной почве среднесуглинистого гранулометрического состава содержание обменного калия должно быть на уровне 16–18 мг/100 г. Оказалось, что в проведенных нами опытах содержание обменного калия в почве при систематическом внесении повышенных доз удобрений изменялось в довольно близких пределах — 15–20 мг/100 г, в других ситуациях оно было заметно меньше рекомендуемого уровня. Следовательно, зерновые культуры, возделываемые на серой лесной почве, нуждаются в усиленном калийном питании для получения высокой продуктивности и требуют наряду с внесением азота и фосфора заделку в пахотный слой растительных остатков, содержащих в своем составе значительное количество калия.

Необменный поглощенный калий играет важную роль в снабжении растений этим элементом в течение всего периода вегетации. Показано [24], что такая форма калия связана с трехслойными

глинистыми минералами с расширяющимся типом кристаллической решетки, от химического состава которых зависят процессы фиксации—мобилизации. В серой лесной почве среднесуглинистого гранулометрического состава обычно содержится в пределах 55–65 мг/100 г. В проведенных нами опытах содержание необменного калия в контрольном варианте исходной почвы составило 47 мг и в конце опыта снизилось примерно до 40 мг/100 г (табл. 3). Наиболее высокое содержание необменного калия отмечали в условиях 2012 г. во всех вариантах опыта, затем оно начало снижаться, что, вероятно, было связано с различной калийной нагрузкой на агроценоз и неодинаковой потребностью культур в этом элементе в разных фазах их развития.

Внесение калийных удобрений зачастую повышало содержание необменного калия в почве по сравнению с контролем, иногда оставалось

Таблица 3. Влияние растительных остатков (*PO*) и минеральных удобрений на содержание необменного калия в почве (мг/100 г, графа 1) и соотношение между этой формой K_2O и обменной (графа 2)

Вариант	1998 г.		2012 г.		2018 г.	
	1	2	1	2	1	2
Контроль	47.5	4.5	52.3	5.9	39.9	4.4
<i>PO</i>	—		67.2	6.6	44.5	4.1
N30P20K30	43.7	4.3	65.3	6.7	47.7	4.3
N30P20K30 + <i>PO</i>	—		66.5	5.0	49.8	3.4
N60P40K60	43.1	3.9	59.0	4.6	48.6	3.9
N60P40K60 + <i>PO</i>	—		70.4	5.1	52.8	2.9
N90P60K90	46.0	4.6	61.6	4.4	53.0	4.1
N90P60K90 + <i>PO</i>	—		65.1	4.1	54.4	2.8
<i>HCP</i> ₀₅	2.6		3.9		2.8	

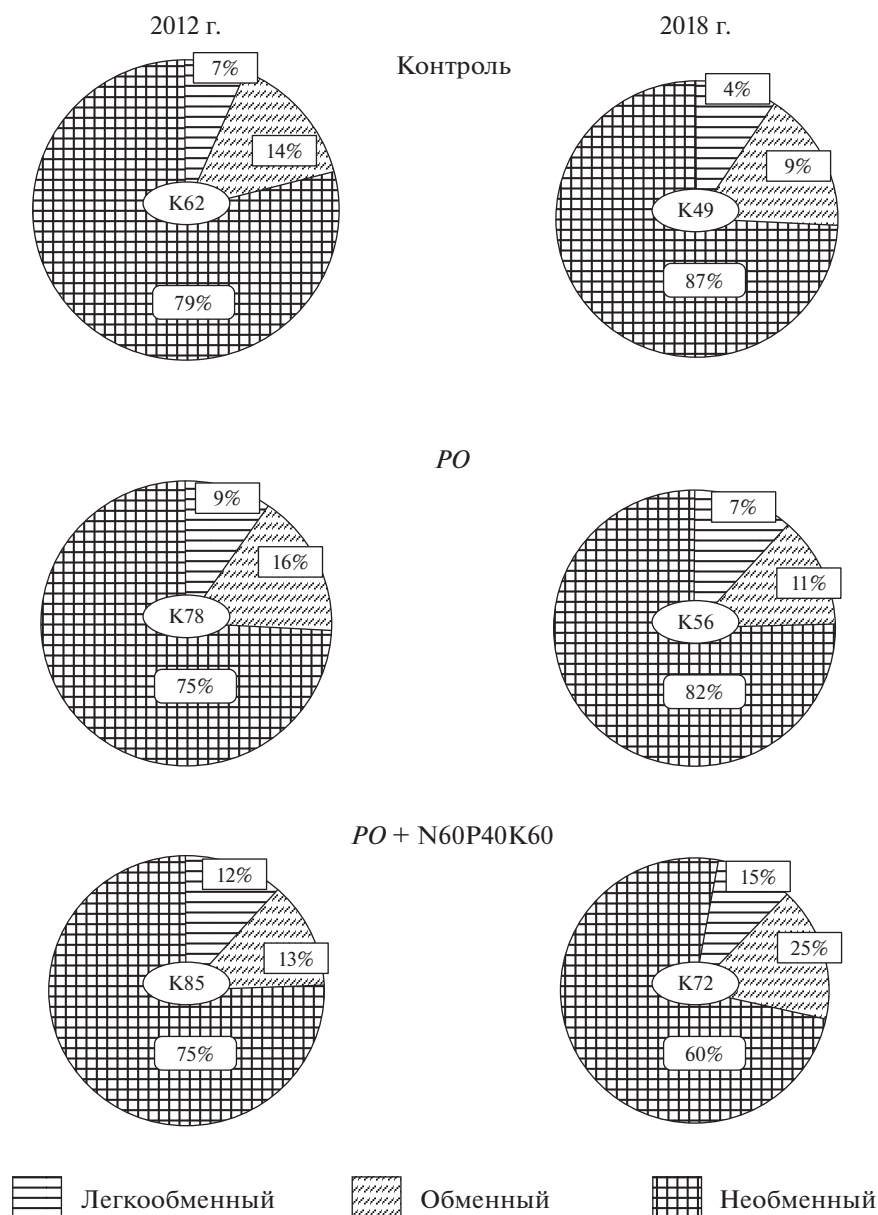


Рис. 2. Доля участия калийных форм в формировании калийного пула почвы, %. Число внутри эллипса — суммарное содержание форм калия в почве, мг/100 г почвы.

практически без изменения вместо ожидаемого увеличения в результате калийного воздействия. Использование дозы K90 на фоне NP мало повлияло на содержание необменного калия, что могло сказаться на поглощении элемента. Внесение растительных остатков при использовании минимальных доз калия K30 практически не вызвало увеличения содержания его необменной формы. В условиях 2012 г. в результате использования доз K60–90 можно отметить повышение содержания необменного калия. В 2018 г. существенных различий в изменении этой формы нами не обнаружено, хотя соотношение между не-

обменной формой и обменной четко фиксировали в пользу вариантов внесения минеральных удобрений. В другие годы такой ясной закономерности выявить не удалось.

Под влиянием минерального питания изменилось долевое участие и распределение основных форм калия в формировании калийного фонда серой лесной почвы (рис. 2). Доля легкообменного калия в контрольном варианте снизилась с 7 до 4%, тенденцию к снижению отмечали и в варианте с внесением растительных остатков. Доля легкообменного калия при внесении минеральных удобрений, напротив, заметно возросла, что было

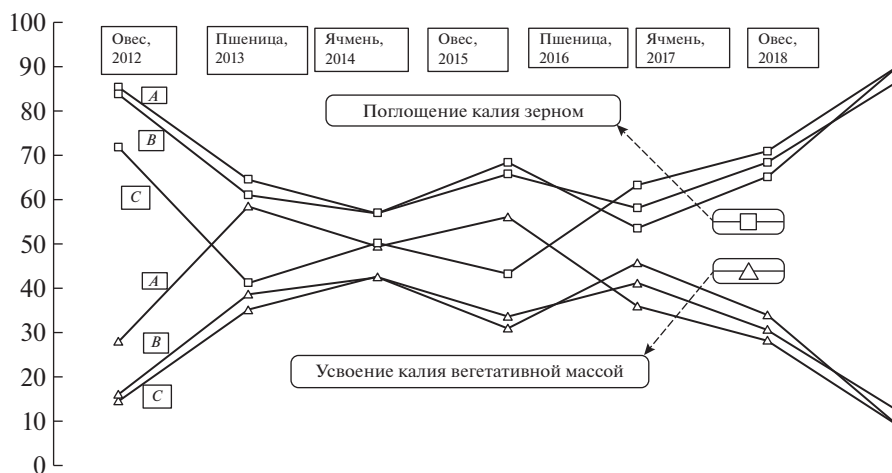


Рис. 3. Влияние уровня минерального питания на поглощение калия культурами севооборота и органами растений, %. Варианты: А — контроль без удобрений, В — растительные остатки, С — N40P40K40.

связано с улучшением калийного питания растений в течение ряда лет. Подобную закономерность в распределении легкообменного калия в почве отметили и в варианте N60P40K60.

Доля обменного калия в условиях 2012 г. мало изменялась в вариантах опыта (от 13 до 16%). В конце ротации севооборота доля этой формы калия существенно снизилась примерно до 10%, в то время как в варианте, где вносили минеральные удобрения и заделывали в почву растительные остатки, она возросла до 25%. Поскольку растительные остатки в сочетании с минеральными удобрениями оказывали значительное влияние на содержание обменного калия в почве при возделывании зерновых культур, очень важное значение имеет прием утилизации вегетативной массы при эксплуатации пахотных угодий.

Самую большую долю в калийном фонде среди усвояемых форм занимал необменный калий. Его доля в условиях 2012 г. в варианте с внесением растительных остатков и удобрением калийным удобрением составляла 75%, в контроле его было несколько больше. В конце последней ротации севооборота доля необменного калия в контрольном варианте и с внесением растительных остатков возросла, а в варианте с внесением удобрений и растительных остатков — напротив, снизилась. Доля необменного калия в контрольном варианте в опыте 2018 г. была максимальной; в остальных вариантах она была значительно меньше, особенно при внесении минеральных удобрений и запахивании растительных остатков.

Зерновые культуры, возделываемые в системе севооборота, на фоне применения минеральных удобрений и растительных остатков по-разному относились к поглощению калия зерном и вегета-

тивной массой (рис. 3). В период освоения зернового севооборота генеративные органы лучше усваивали калий из почвенных запасов и внесенного источника калия, затем начинался некоторый спад, который стабилизировался на уровне 50–70%. В конце последней ротации зернового севооборота началось усиление поглощения калия зерном, которое достигло максимума в 2018 г. Четкой закономерности в отношении поглощения этого элемента из минеральных удобрений и растительных остатков нами не обнаружено. Усвоение калия вегетативной массой в начале освоения севооборота было на минимальном уровне (15–30%), затем начало постепенно возрастать и достигло максимума при выращивании пшеницы в 2013 г. Стабилизация процессов поглощения калия вегетативной массой отмечена в течение ряда лет и только в конце последней ротации достигло минимума в результате такого взаимодействия. Циклический характер в поступлении калия в растения, вероятно, был связан с особенностями калийного режима почвы и аналогичными процессами физиологического развития зерновых культур в период их вегетации.

Разнообразие в минеральном калийном питании отразилось на формировании биомассы растений и поглощении калия зерновыми культурами (табл. 4). В среднем за последние 7 лет растения в контрольном варианте и с внесением растительных остатков мало отличались между собой и только внесение минеральных удобрений существенно повысило выход зерновой продукции и вегетативной массы. Рост урожайности зерновых культур продолжался и при внесении удобрений в более высоких дозах. Накопление нетоварной продукции заметно возрастало при использовании

Таблица 4. Продуктивность растений и баланс калия в почве при внесении минеральных удобрений и растительных остатков (PO), кг/га

Вариант	Биомасса растений	Поступило в почву в виде			Вынос растениями	Баланс
		удобрений	PO	всего		
Контроль	<u>18.4</u> 28.7	—	—	—	22.0	–22.0
PO	<u>19.6</u> 28.2	—	5.8	5.8	28.3	–22.5
N30P20K30	<u>28.7</u> 44.6	30.0	—	30.0	30.3	–0.3
N30P20K30 + PO	<u>29.7</u> 45.3	30.0	5.4	35.4	36.7	–1.3
N60P40K60	<u>34.8</u> 50.1	60.0	—	60.0	35.9	+24.1
N60P40K60 + PO	<u>35.2</u> 52.6	60.0	5.5	65.5	45.6	+19.9
N90P60K90	<u>41.3</u> 69.0	90.0	—	90.0	52.0	+38.0
N90P60K90 + PO	<u>45.4</u> 65.4	90.0	6.2	96.2	58.4	+37.8

Примечание. Над чертой — зерно, под чертой — вегетативная масса.

азота, фосфора, и калия в сочетании с заделкой в почву растительных остатков во всех вариантах опыта.

Расчет баланса калия показал, что суммарное поступление элемента в почву происходило в основном за счет минеральных удобрений, доля калия растительных остатков существенно уступала первому источнику. Вынос калия растениями был минимальным в контрольном варианте, а также при малой калийной нагрузке и утилизации вегетативной массы. Однако внесение калия в возрастающих дозах (при одновременном внесении азота и фосфора) повышало его вынос растениями. Это несомненно сказалось на его балансе, он был отрицательный в контрольном варианте и при утилизации растительных остатков. Практически бездефицитным баланс калия складывался при внесении минеральных удобрений в дозе K30 в сочетании с азотом и фосфором. При внесении более высоких доз удобрений он был положительным, особенно в вариантах с максимальным их насыщением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение калийного состояния серой лесной почвы показало, что под влиянием минеральных удобрений и растительных остатков изменение содержания калия происходило во всех его формах. Наибольшее варьирова-

ние его содержания отмечено в водорастворимой и легкообменной формах и значительно меньше — в необменной и особенно обменной. При этом содержание обменного калия при внесении калийных удобрений и растительных остатков обычно возрастало, в то время как легкообменного калия — снижалось. В целях диагностирования источников калийного питания (почва, удобрение, растительные остатки) состояние их вполне удовлетворительно отражала величина содержания обменного калия. К тому же эту форму широко использует современная агрохимическая служба, что позволяет получать необходимую информацию с минимальными экономическими и экологически оправданными затратами.

Длительная заделка растительных остатков (в течение 18 лет) мало отражалась как на величинах зерновой продукции, так и вегетативной массы. Эффективность калия возрастала при внесении полного минерального удобрения либо в сочетании с растительными остатками. Баланс калия в почве при использовании как минимальных доз удобрений так и в контрольных вариантах складывался отрицательным. В случае внесения минеральных удобрений в экологически безопасных дозах и запахивания растительных остатков баланс калия в почве во всех изученных вариантах опыта был бездефицитным, что способствовало повышению уровня почвенного плодородия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Минеев В.Г.* Агрохимия и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
2. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П.* Калий и калийные удобрения. Практ. рук-во. М.: Ледум, 2000. 185 с.
3. *Никитина Л.В.* Исследование калийного режима разных типов почв в длительных опытах Геосети // Агрохимия. 2018. № 1. С. 39–51.
4. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Распределение форм калия в почвенном профиле эродированных лугово-черноземных почв и их трансформация в агроценозах // Агрохимия. 2021. № 11. С. 16–24.
5. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н.* Содержание, запасы и формы калия в каштановых почвах Забайкалья в зависимости от орошения и возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) под картофель // Агрохимия. 2020. № 3. С. 3–10.
6. *Бараев А.И.* Почвозащитное земледелие. Избр. тр. М.: Агропромиздат, 1988. 383 с.
7. *Никитишин В.И.* Эколого-агрохимические основы сбалансированного применения удобрений в адаптивном земледелии. М.: Наука, 2003. 183 с.
8. *Лазарев В.И., Лазарева Р.И., Ильин Б.С., Боева Н.Н.* Калийный режим чернозема типичного при его длительном сельскохозяйственном использовании в различных агроэкосистемах // Агрохимия. 2020. № 2. С. 14–19.
9. *Русакова И.В.* Влияние длительного применения соломы и минеральных удобрений на биологические свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2017. № 8. С. 16–24.
10. *Турусов В.И., Богатых О.А., Дронова Н.В., Балуюнова Е.А.* Роль пожнивно-корневых остатков в восстановлении плодородия почвы // Плодородие. 2020. № 4. С. 10–12.
11. *Артемова З.С., Фрид А.С., Титова В.И.* Миграционная доступность калия растениям на суглинистых почвах // Агрохимия. 2019. № 7. С. 16–26.
12. *Анисимова Т.Ю.* Влияние соломы на продукционную способность люпина узколистного на дерново-подзолистых супесчаных почвах // Агрохимия. 2020. № 7. С. 83–89.
13. *Волынкина О.В.* Баланс питательных веществ в посевах сельскохозяйственных культур // Плодородие. 2020. № 4. С. 13–16.
14. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П., Ефремов Е.Н.* О методах определения доступных форм калия в почве // Плодородие. 2005. № 5. С. 15–18.
15. *Якименко В.Н.* Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 10. С. 16–24.
16. *Шафран С.А., Кирпичников Н.А.* Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // Агрохимия. 2019. № 4. С. 3–10.
17. *Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Шишков Д.Г., Дир Е.С.* Калийное состояние дерново-подзолистой почвы длительного стационарного опыта в условиях Предуралья // Плодородие. 2021. № 4. С. 43–46.
18. *Середина В.П.* Калий в автоморфных почвах на лесовидных суглинках. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1984. 216 с.
19. *Пивоварова Е.Г.* Влияние калийных удобрений на содержание форм калия в почвах и урожайность сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 1993. № 2. С. 44–49.
20. *Ковалев Р.В., Ильин В.Б., Трофимов С.С.* Почвы Новосибирской области. Новосибирск: Наука, 1966. 422 с.
21. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 227 с.
22. *Пчелкин В.У.* Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 336 с.
23. *Сычев В.Г., Никитина Л.В.* Трансформация калия в почвах агроценозов без применения удобрений // Плодородие. 2017. № 6. С. 5–7.
24. *Горбунов Н.И.* Минералогия и физическая химия почв. М., Наука, 1978. 293 с.

Potash State of the Soil and Crop Productivity when Applying Mineral Fertilizers and Plant Residues

V. M. Nazariuk^a and F. R. Kalimullina^{a, #}

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
prosp. acad. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

[#]*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru*

In micro-field experiments conducted on gray forest soil, changes in the forms of potassium under the influence of mineral fertilizers and plant residues were studied. It is shown that the soil potassium contained in a water-soluble and easily exchangeable form varied widely. In the conditions of 2012, when applying K60 on the background of nitrogen and phosphorus, the content of water-soluble potassium increased by about 2 times compared with the control, and the content of light-exchange potassium increased by 4 times. In the case of embedding plant residues in the soil, the potassium content in the water-soluble form increased by 2 times, light-exchange — by 2.5 times, respectively. The content of exchangeable potassium changed little in the variants, the changes affected the non-exchangeable form to a greater extent. In particular, the content of non-exchangeable potassium in 2018 decreased by 1.5–2.0 times compared to 2012, which required the creation of a more reliable basis for obtaining objective information about the state of the potash fund of the soils of the forest-steppe zone. Under the influence of K-fertilizers in combination with plant residues, plant productivity stabilized, and at the same time a positive balance of potassium in the soil was formed.

Keywords: soil, potassium forms, crop rotation, cereals, yield, plant residues, balance.

УДК 631.41:631.445.41:631.45

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНО-ГЛИНИСТЫХ КОМПЛЕКСОВ АГРОЧЕРНОЗЕМОВ РАЗНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ НА СКЛОНЕ

© 2023 г. Е. В. Цомаева¹, З. С. Артемьева^{1,*}, Е. С. Засухина²

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева
Пыжевский пер. 7, стр. 2, Москва 119017, Россия

²Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН
ул. Вавилова, 44, корп. 2, Москва 119333, Россия

*E-mail: artemyevazs@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Органо-глинистые комплексы агрочерноземов разной локализации на склоне были изучены, в том числе методом динамического светорассеяния (*DLS*). Выявлено снижение величины концентрации органического углерода ($C_{\text{орг}}$) илистых фракций в пахотных горизонтах смытых агрочерноземов, что являлось следствием постоянного обнажения почвенной массы нижележащего горизонта, провоцирующего разложение органического вещества (*ОВ*). Это сопровождалось изменениями в содержании несиликатного железа (Fe_d) в результате окислительной деструкции железоорганических комплексов, что способствовало десорбции Fe_d . Разная интенсивность эрозионных процессов оказывала влияние на тенденцию к изменению динамики Fe_d : меньшая крутизна склона (4°) способствовала увеличению нагрузки $C_{\text{орг}}$ на оксиды железа, результатом чего было увеличение десорбируемости железа, тогда как в условиях большей крутизны (6°) наблюдали снижение десорбируемости железа. Вне зависимости от положения на склоне, максимально высокие величины среднего диаметра органо-глинистых комплексов (D) наблюдали в верхних горизонтах исследованных агрочерноземов, которые снижались вниз по профилю. В результате эрозионных процессов размер органо-глинистых комплексов в пахотных горизонтах снижался по сравнению с таковым в полнопрофильных агрочерноземах (в 1.1 раза). Выявлено, что размер органо-глинистых комплексов в исследованных агрочерноземах определялся величинами содержания $C_{\text{орг}}$ и Fe_d , хотя степень их значимости различалась в верхних гумусовых ($A_{\text{пах}}$, $A1$, AB) и нижних (B , C) горизонтах. В верхних горизонтах величина D определялась содержанием $C_{\text{орг}}$, тогда как в нижних горизонтах основная роль в формировании размера органо-глинистых комплексов принадлежала Fe_d . Полученные данные позволили предполагать более значимую роль *ОВ* в агрегации илистых частиц по сравнению с таковой Fe_d . Гипотеза о множественной линейной регрессионной зависимости величины D от величин концентрации в них углерода ($C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{карбонатов}}$) и Fe_d оказалась статистически значимой как для всего набора генетических горизонтов, так и для гумусовых горизонтов. Коэффициент детерминации модели (R^2) увеличивался в ряду: $0.578 (A_{\text{пах}} + A1) < 0.678 (A_{\text{пах}} + A1 + AB + B + BC + C) < 0.724 (A_{\text{пах}} + A1 + AB) < 0.983 (AB)$.

Ключевые слова: эрозия, органо-глинистые комплексы, динамическое светорассеяние, средний диаметр, органическое вещество, несиликатное железо, карбонаты.

DOI: 10.31857/S0002188123110145, **EDN:** PWVOYG

ВВЕДЕНИЕ

Частицы почвы существуют в почвенной матрице в различных размерах, формах и в разной степени агрегирования [1]. Пространственное расположение частиц, характер и сила связей между ними определяют структуру почвы [2]. Для того чтобы частицы почвы образовали устойчивые агрегаты, необходимы связующие агенты, в качестве которых, в первую очередь, рассматри-

ваются органическое вещество (*ОВ*), оксиды алюминия и железа, кремнезем и карбонаты кальция [3]. Относительная важность этих связующих веществ зависит от их содержания в почве, что в свою очередь обусловлено типом почвы и характером ее использования. Кроме того, роль связующих веществ различна для агрегатов разной крупности, поэтому при изучении агрегации необходимо определить масштаб, в котором про-

изводят наблюдения: разветвляющиеся корни растений или микоризные гифы могут сцеплять частицы почвы в макроагрегаты (>250 мкм); растительные остатки и полисахариды, выделяемые бактериями, грибами и корнями, могут играть важную роль в формировании и связывании микроагрегатов (<250 мкм); флокуляция глины наряду со связыванием глины поливалентными катионами с *ОВ* является важным связывающим агентом в масштабе <20 мкм [4–6].

Было показано, что многие из так называемых “глинистых частиц” на самом деле представляют собой микроагрегаты размером от нано- до микрометров [7, 8]. Микроагрегатам глинистого размера отводится определяющая роль в консолидации почвенной массы на всех уровнях почвенной организации (макро-, микро-, наномасштабе) [4, 9–12]. Более того, их рассматривают в качестве “строительных единиц” (“блоков”) структурных единиц более высоких порядков [13–17]. Тем не менее, практически ничего не известно о реальных размерах глинистых частиц (среднем диаметре), локализованных в илистой фракции (<1 мкм), как и о факторах, определяющих их.

Динамическое светорассеяние – современный и достаточно простой метод, позволяющий оценить способность почвенных частиц разного размера к коагуляции и факторы, ее контролирующие [18–21]. Методика позволяет быстро измерять размеры частиц в растворе в нано- и микрометровом диапазоне. Это достигается измерением коэффициента диффузии D , который связан с гидродинамическим диаметром рассеивающей частицы уравнением Стокса–Эйнштейна:

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\eta d}, \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана (1.38054×10^{-16} эрг/град), T – температура, η – вязкость жидкости-разбавителя, в которой движется частица, и d – эквивалентный сферический диаметр. Это уравнение предполагает, что частицы движутся независимо друг от друга [22].

Цель работы – выделение глинистых агрегатов в агрочерноземах разной локализации на склоне, характеристика факторов, предположительно определяющих размер глинистых частиц: органическое вещество (как органический углерод – $C_{орг}$), валовое несиликатное железо (Fe_d), карбонаты (как неорганический углерод – $C_{карбонатов}$); количественное определение размера глинистых частиц илистой фракции (как средний диаметр – D) с помощью метода динамического светорассеяния;

изучение динамики всех перечисленных параметров под влиянием эрозионных процессов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили типичные черноземы [23] согласно международной классификации – *Naiplic Chernozems* [24] территории “Курского федерального аграрного научного центра” (Курский ФАНЦ). Черноземы данного подтипа достаточно широко распространены в Центрально-Черноземном районе, в частности, в Курской обл. Климат – умеренный, среднегодовая температура воздуха – 5°C , сумма активных температур ($>10^\circ\text{C}$) – 2425°C , годовая сумма осадков – 590 мм, включая сумму осадков за теплый период (при температуре $>10^\circ\text{C}$) – 285 мм.

Выбранные объекты представляли собой 2 полных склона одной (северной) экспозиции, имели принципиальное сходство по глубине и характеру подстилания почвообразующих пород, характеризовались близкой исходной (до сельскохозяйственного использования) мощностью почвенного профиля и набором основных горизонтов (табл. 1).

Зоны денудации–аккумуляции на исследованных склонах выделяли в соответствие с классификацией Ермолаева [25]. Были выделены зоны: 1 – отсутствие эрозии, 2 – эрозионная (эрозионно-активная), 3 – равновесная (денудации–аккумуляции) и 4 – преобладающей аккумуляции.

Глинистые агрегаты выделяли после предварительного удаления из образцов почвы свободного *ОВ* (с помощью бромформ-этанольной жидкости (БЭС) ($\rho = 1.8$ г/см³)). Остаток почвы после удаления свободного *ОВ* отмывали от следов БЭС с помощью спирта и высушивали при 60°C . Агрегаты почвы разрушали с помощью ультразвукового диспергатора зондового типа (LUZD-0.5K-02-00000 PS (Crimid, Russia)). Озвучивание (69.7 Дж/мл) образца почвы (10 г + 50 мл деионизированной воды) проводили в течение 1 мин с последующим центрифугированием и повторяли 15 раз. Водную суспензию илистых частиц (<1 мкм) собирали и высушивали при 60°C [11].

Содержание углерода (ТС) определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Япония). Все измерения выполняли в трехкратной повторности.

Валовое содержание несиликатного железа определяли модифицированным вариантом метода Мера–Джексона [26] с СФ-окончанием (фотоколориметр “ЭКОТЕСТ 2020-РС”, ЭКОНИКС, Россия).

Таблица 1. Характеристика объектов ключевых участков

Разрез	Угодье	Положение на склоне	Крутизна,°	Степень эродированности	Профиль	Глубина вскипания, см
1-й ключевой участок						
4	Пашня	Водораздел	0–1	Несмытый	Апах–А1–АВ– В	90
12		Средняя часть склона	6	Среднесмытый	Апах–А1–АВ – В	25
2		Нижняя часть склона	5	Смыто-намытый	Апах–А1– В	74
3			3	Намытый	Апах–А1– А1'– А1"	Не вскипает
2-й ключевой участок						
35	Пашня	Водораздел	0–1	Несмытый	Апах–А1–АВ– В–BC	60–70
102		Средняя часть склона	4	Среднесмытый	Апах–А1–АВ– В–BC–C	20–30
34			3	Смыто-намытый	Апах–А1–АВ– В–BC	30–40
101		Нижняя часть склона	3	Намытый	Апах–А1–АВ– В	Не вскипает

Средний диаметр органо-глинистых комплексов исследовали методом динамического светорассеивания (*DLS*) в их водных суспензиях (разведение 1 : 20) на анализаторе NanoBrook Omni (Brookhaven Instruments Corporation, USA). Для каждого образца илтистых частиц выполняли 3 серии по 5 последовательных измерений и далее рассчитывали величину среднего эффективного диаметра.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием статистического пакета Microsoft Excel 2010 и OriginPro 8 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA). Выбранный уровень значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика органо-глинистых комплексов

Углерод органический ($C_{орг}$) и неорганический ($C_{карбонатов}$). Минимально наблюдающиеся величины концентрации $C_{орг}$ в пахотных горизонтах обоих ключевых участков отмечены в эродированных агрочерноземах. При этом величины концентрации $C_{орг}$ в них очень близки таковым подповерхностных горизонтов полнопрофильных вариантов, что предполагает эрозионный вынос почвенной массы верхнего слоя ~30 см эродированных агрочерноземов. Максимальные наблюдаемые величины концентрации $C_{орг}$ отмечены в пахотных горизонтах намытых агрочерноземов (рис. 1а). Пахотные горизонты смыто-намытых вариантов демонстрировали промежуточные

(между полнопрофильными и эродированными почвами) величины концентрации $C_{орг}$.

Распределение карбонатов ($C_{карбонатов}$) было обратно таковому $C_{орг}$ (рис. 1б). Поверхностные горизонты полнопрофильных агрочерноземов были практически лишены карбонатов. Вниз по профилю количество карбонатов увеличивалось. Исключение отмечено лишь для намытых разновидностей, где их количество в профиле менялось незначительно (рис. 1б). Тем не менее, минимально наблюдаемые количества карбонатов отмечены именно в намытых агрочерноземах.

Выявлена корреляционная зависимость (экспоненциальная) величины концентрации органического углерода ($C_{орг}$) от количества илтистой фракции в почве: она снижалась по мере увеличения содержания илтистых частиц: $R^2 = 0.78$, $n = 32$, $P < 0.05$ (рис. 2а), что согласуется с ранее полученными данными для почв разного генезиса [1, 27–31].

Для неорганического углерода ($C_{карбонатов}$) выявлена логарифмическая корреляционная зависимость величины его концентрации от количества илтистой фракции в почве: она увеличивалась по мере роста содержания илтистых частиц: $R^2 = 0.64$, $n = 32$, $P < 0.05$ (рис. 2б).

Несиликатное железо (валовое) (Fe_d). Максимальное содержание Fe_d отмечено в поверхностных (пахотных) горизонтах, минимальное – внизу профиля (рис. 3). Исключение наблюдали лишь в намытых агрочерноземах, где горизонты с

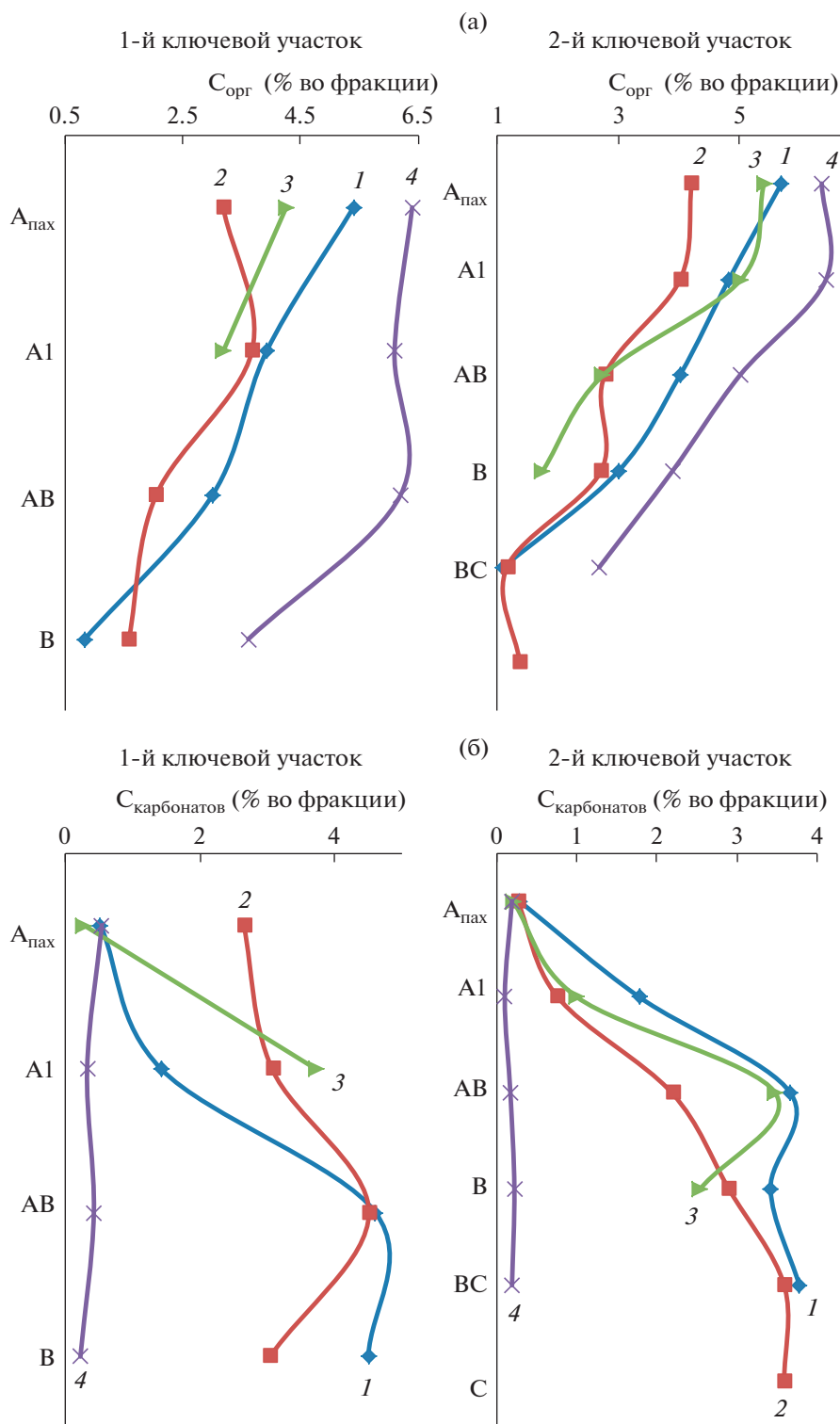


Рис. 1. Распределение углерода: (а) — органического ($C_{орг}$) и (б) — неорганического ($C_{карбонатов}$) (% во фракции) в органо-глинистых комплексах исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне; 1 — несмытый, 2 — смытый, 3 — смыто-намывтый, 4 — намывтый. Нумерация та же на рис. 2–6.

максимальными величинами содержания Fe_d чередовались с пониженными.

Тем не менее, в динамике содержания несиликатного железа в пахотных горизонтах под влия-

нием эрозионных процессов на разных ключевых участках единой тенденции не наблюдали (рис. 3). В пахотном горизонте смытого агрочернозема 1-го участка (разр. 12) отмечено снижение кон-

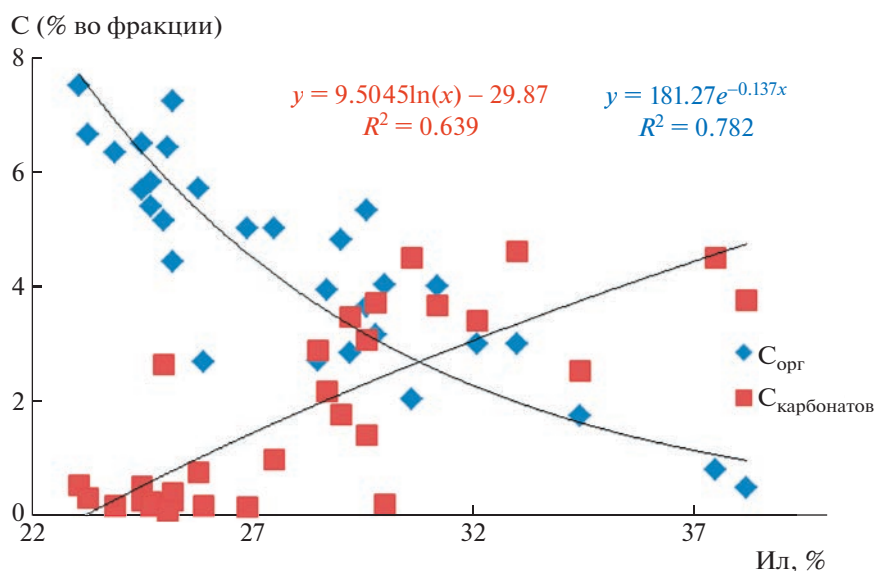


Рис. 2. Зависимость величины концентрации углерода (органического – $C_{\text{орг}}$ и неорганического – $C_{\text{карбонатов}}$) от содержания илистой фракции в исследованных агрочерноземах разной локализации на склоне.

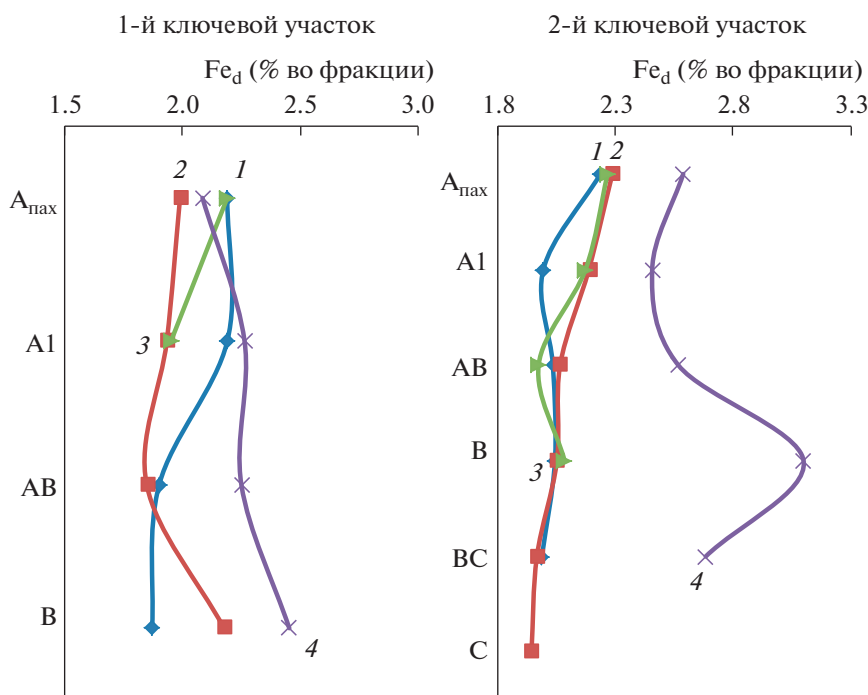


Рис. 3. Распределение Fe_d (% во фракции) в органо-глинистых комплексах исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне.

центрации Fe_d по сравнению с таковой полно-профильного агрочернозема (2.0 против 2.2% во фракции соответственно), на 2-м участке (разр. 102), напротив, концентрация Fe_d увеличивалась по сравнению с таковой несмытой почвы: 2.3 против 2.2% во фракции (рис. 3). Эти различия могли быть следствием разной интенсивности

эрозионных процессов, обусловленной, в том числе, разной крутизной склонов: 6° (1-й участок) против 4° (2-й участок), что согласовалось с большей величиной потери $C_{\text{орг}}$ (% на массу фракции) в пахотном горизонте 1-го участка по сравнению с таковой 2-го участка: 41% (в 1.7 раза) против 26% (в 1.4 раза) соответственно. Следовательно,

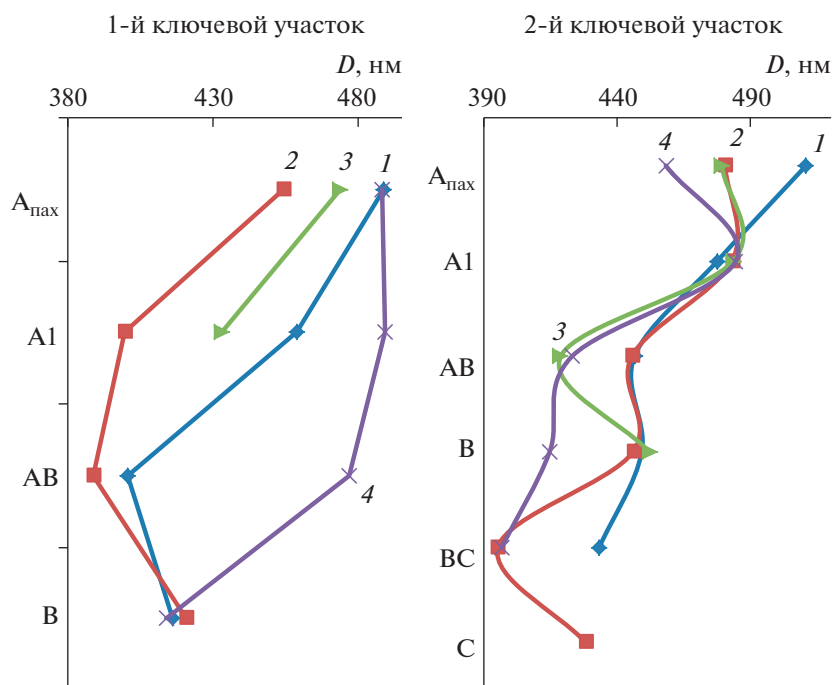


Рис. 4. Распределение величины среднего диаметра органо-глинистых комплексов (D , нм) в исследованных агрочерноземах разной локализации на склоне.

большее количество десорбируемого железа в эродированном варианте 2-го участка по сравнению с таковым 1-го участка могло быть связано с большей загрузкой $C_{\text{орг}}$ на оксиды Fe (мольное отношение $C_{\text{орг}} : \text{Fe}$), что свидетельствовало о менее прочном связывании *ОВ* [32, 33].

Максимальные величины концентрации Fe_d , как правило, отмечены в намытых агрочерноземах обоих ключевых участков (рис. 3). Поскольку горизонты намытых агрочерноземов в наибольшей степени обогащены *ОВ*, нагрузка $C_{\text{орг}}$ на оксиды Fe в этом случае была весьма высока, что облегчало десорбируемость Fe_d .

Размер органо-глинистых комплексов в исследованных агрочерноземах разной локализации на склоне. Для величины среднего диаметра илестых частиц (органоглинистых комплексов) в исследованных агрочерноземах обоих ключевых участков наблюдали единую тенденцию: максимально высокие величины в верхних горизонтах снижались вниз по профилю (рис. 4). В гумусовых горизонтах ($A_{\text{пах}}$, A_1 , AB) величина D варьировала в пределах 400–501 нм. Для нижележащих горизонтов (B , BC , C) средний диаметр илестых частиц был меньше: 395–449 нм.

Более крупный размер илестых частиц (D) в пахотном горизонте полнопрофильного агрочернозема 2-го участка по сравнению с таковым 1-го

участка (511 против 489 нм соответственно), по-видимому, был обусловлен более высокими концентрациями обоих структурообразующих агентов: $C_{\text{орг}}$ (5.7 против 5.4% во фракции соответственно) и Fe_d (2.55 против 2.47% во фракции соответственно).

Пахотные горизонты эродированных агрочерноземов обоих ключевых участков характеризовались меньшими размерами органо-глинистых комплексов по сравнению с таковыми полнопрофильных агрочерноземов: 454 против 489 нм соответственно (1-й участок) и 480 против 511 нм соответственно (2-й участок) (рис. 4). То есть, величина снижения среднего диаметра была примерно одинаковой на обоих участках (в ~ 1.1 раза).

Для пахотных горизонтов намытых агрочерноземов ключевых участков были отмечены разные тенденции. Если на 1-м участке величина D намытого агрочернозема восстанавливалась до уровня полнопрофильного варианта (488 против 489 нм соответственно), то на 2-м участке она оказалась наименьшей среди пахотных горизонтов данного участка (458 нм). Для пахотных горизонтов смыто-намытых почв были отмечены промежуточные (между несмытыми и смытыми вариантами) величины D .

Была определена влияние $C_{\text{орг}}$ в органо-глинистых комплексах (% во фракции), несиликат-

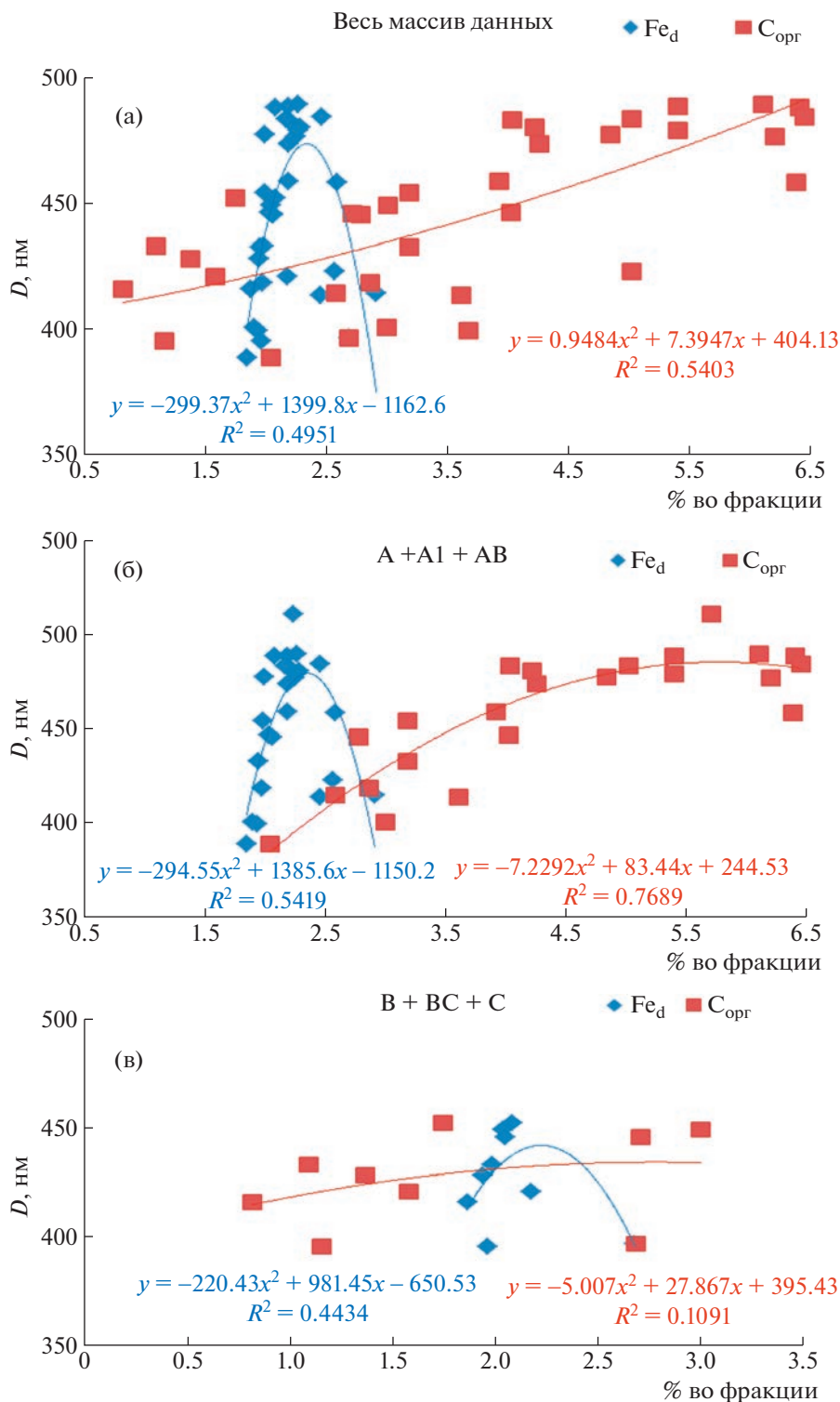


Рис. 5. Зависимость величины среднего диаметра органо-глинистых комплексов (D , нм) от $C_{\text{орг}}$ и Fe_d (% во фракции) в них: (а) — весь массив аналитических данных, (б) — гумусовые горизонты, (в) — иллювиальные горизонты и порода.

ного железа (% во фракции) на величину D органо-глинистых комплексов.

Статистический анализ (весь массив аналитических данных) выявил, что величина D в

чуть большей степени обусловлена величиной содержания $C_{\text{орг}}$ ($R^2 = 0.60$, $n = 34$, $P < 0.05$) по сравнению с Fe_d ($R^2 = 0.50$, $n = 34$, $P < 0.05$) (рис. 5а).

Посчитали целесообразным разделить весь массив данных на 2 блока: гумусовые (Апах, А1, АВ) и нижние (В, ВС, С) горизонты.

Для гумусовых горизонтов тенденции остались прежними (как и для всего массива аналитических данных), однако корреляционные зависимости стали более выраженными: $C_{орг}$ ($R^2 = 0.72$ против 0.60 соответственно и Fe_d ($R^2 = 0.54$ против 0.50 соответственно), $n = 25$, $P < 0.05$) (рис. 5б).

Для нижних горизонтов корреляционные зависимости оказались значительно более слабыми (рис. 5в). Тем не менее, можно утверждать, что в нижних горизонтах величина среднего диаметра илистых частиц определялась в значительной степени содержанием несиликатного железа ($R^2 = 0.44$, $n = 9$, $P < 0.05$), что, по-видимому, было обусловлено в том числе отсутствием/недостатком *ОВ* в нижних горизонтах почв ($R^2 = 0.09$, $n = 9$, $P < 0.05$).

Таким образом, в верхних горизонтах (Апах, А1, АВ) размер илистых частиц в значительной степени зависел от органического вещества ($C_{орг}$), тогда как в нижележащих горизонтах (В, ВС, С) основная роль в формировании размера органо-глинистых комплексов принадлежала оксидам железа. Наши аналитические данные выявили более значимую роль *ОВ* в агрегации глинистых частиц по сравнению с таковой несиликатного железа.

С применением методов статистического анализа проверили гипотезу о множественной линейной регрессии величины среднего диаметра органо-глинистых комплексов от величин концентрации в них углерода (органического – $C_{орг}$ и неорганического – $C_{карбонатов}$), а также несиликатного железа (Fe_d). То есть проверяли гипотезу о том, что имела место следующая линейная зависимость:

$$D_i = a_0 + a_1(C_{орг})_i + a_2(C_{карбонатов})_i + a_3(Fe_d)_i + \varepsilon_i, \quad (2)$$

$$4i = 1, 2, \dots, n,$$

где a_k , $k = 0, 1, 2, 3$ – коэффициенты линейной регрессии, i – номер наблюдения в рассматриваемой выборке, D_i , $(C_{орг})_i$, $(C_{карбонатов})_i$, $(Fe_d)_i$ – i -е величины среднего диаметра и факторов-предикторов: величин концентрации $C_{орг}$, $C_{карбонатов}$, Fe_d соответственно; ε_i , $i = 1, 2, \dots, n$, – независимые ошибки, обусловленные неизвестными факторами, имеющие нулевое среднее и одно и то же распределение вероятностей.

Таким образом, уравнение регрессии величины среднего диаметра (D) в зависимости от вели-

чин $C_{орг}$, $C_{карбонатов}$, Fe_d выглядит следующим образом:

$$\bar{D}_i = a_0 + a_1(C_{орг})_i + a_2(C_{карбонатов})_i + a_3(Fe_d)_i, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\bar{D}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ – есть предсказанные этой регрессионной зависимостью величины среднего диаметра.

Для оценки статистической значимости гипотезы о наличии линейной регрессионной зависимости величины среднего диаметра от указанных выше факторов предикторов применяли критерий Фишера. Уровень значимости принимали равным 0.05. В качестве дополнительного аргумента в пользу принятия гипотезы о линейной регрессионной зависимости принимали достаточно большую величину коэффициента детерминации R^2 . Кроме того, для оценки значимости коэффициентов линейной регрессионной зависимости использовали t -критерий Стьюдента.

В результате проведения статистического анализа экспериментальных данных были выявлены следующие регрессионные зависимости величины среднего диаметра органо-глинистых комплексов (D) от величин концентрации органического и неорганического углерода ($C_{орг}$ и $C_{карбонатов}$ соответственно) и несиликатного железа (Fe_d) в органо-глинистых комплексах исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне. Была выявлена множественная регрессионная связь между величиной D и факторами-предикторами $C_{орг}$, $C_{карбонатов}$ и Fe_d , которая имела следующий вид для разных наборов генетических горизонтов:

Апах + А1 + АВ + В + ВС + С:

$$D_i = 599.37 + 9.26(C_{орг})_i - 13.74(C_{карбонатов})_i - 74.10(Fe_d)_i, \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

Апах + А1 + АВ:

$$D_i = 566.58 + 12.94(C_{орг})_i - 14.23(C_{карбонатов})_i - 67.51(Fe_d)_i, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

Апах + А1:

$$D_i = 620.67 + 14.24(C_{орг})_i - 14.93(C_{карбонатов})_i - 94.79(Fe_d)_i, \quad (6)$$

$$I = 1, 2, \dots, n.$$

Таблица 2. Коэффициенты линейной статистической модели D

Параметр	a	Value	SE	t	P_1	R^2	F	P_2
Апах + А1 + АВ + В + ВС + С ($n = 34$)								
x_0	a_0	599.3708	52.7660	11.3590	2.17E–12	0.678	21.065	1.545E–07
x_1	a_1	9.2912	3.2471	2.8614	0.0076			
x_2	a_2	–13.7371	4.2936	–3.1994	0.0032			
x_3	a_3	–74.0956	19.1970	–3.8597	5.61E–4			
Апах + А1 + АВ ($n = 25$)								
x_0	a_0	566.5820	53.5338	10.5836	7.11E–10	0.724	18.384	4.372E–06
x_1	a_1	12.9382	4.2952	3.0122	0.0066			
x_2	a_2	–14.2342	4.3594	–3.2652	0.0037			
x_3	a_3	–67.5091	19.2533	–3.5064	0.0021			
Апах + А1 ($n = 19$)								
x_0	a_0	620.6708	81.9572	7.5731	1.68E–06	0.578	6.850	0.004
x_1	a_1	14.2421	5.3945	2.6401	0.0185			
x_2	a_2	–14.9306	6.4647	–2.3096	0.0356			
x_3	a_3	–94.7917	34.5896	–2.7405	0.0152			
АВ ($n = 6$)								
x_0	a_0	628.0854	30.2609	20.7557	0.0023	0.983	39.629	0.025
x_1	a_1	27.9719	3.5704	7.8343	0.0159			
x_2	a_2	–24.5775	2.9064	–8.4564	0.0137			
x_3	a_3	–101.4072	11.1661	–9.0817	0.0119			
В + ВС + С ($n = 9$)								
x_0	a_0	809.8796	262.3716	3.0868	0.0273	0.610	2.607	0.164
x_1	a_1	15.6909	9.4970	1.6522	0.1594			
x_2	a_2	–21.1737	19.7071	–1.0744	0.3317			
x_3	a_3	–165.8171	95.3457	–1.7391	0.1425			

Примечание. $x_1 = C_{\text{орг}}$ (% во фракции); $x_2 = C_{\text{карбонатов}}$ (% во фракции); $x_3 = Fe_d$ (% во фракции); SE – стандартная ошибка, t – критерий Стьюдента, P_1 – значимость t -статистики, R^2 – коэффициент детерминации, F – критерий Фишера, P_2 – значимость критерия Фишера.

АВ:

$$D_i = 628.09 + 27.97(C_{\text{орг}})_i - 24.58(C_{\text{карбонатов}})_i - 101.41(Fe_d)_i, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

Статистическая значимость этих регрессионных связей подтверждена следующими результатами статистических расчетов (табл. 2): достаточно высокие коэффициенты детерминации; величины критерия Фишера превышают $F_{\text{крит}}$; величины уровня значимости $P < 0.05$; все коэффициенты линейной регрессии значимы ($P < 0.05$); удовлетворительное соответствие модельных и аналитических данных по величине (рис. 6).

Таким образом, гипотеза о множественной линейной регрессионной зависимости величины среднего диаметра органо-глинистых комплексов от величин концентрации в них углерода (органического и неорганического) и несиликатного железа оказалась статистически значимой как для всего набора генетических горизонтов, так и для гумусовых горизонтов. Коэффициент детерминации модели (R^2) увеличивался в ряду: 0.578 (Апах + А1) < 0.678 (весь набор аналитических данных) < 0.724 (Апах + А1 + АВ) < 0.983 (АВ). Максимально наблюдаемый коэффициент детерминации в модели для горизонта АВ, по-видимому, был обусловлен промежуточным положением в почвенном профиле (эффект экотона).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных четко демонстрировал обнажение в результате эрозионных процессов почвенного материала нижележащих горизонтов. Это отражалось в первую очередь на снижении величины концентрации $C_{\text{орг}}$ илистых фракций в пахотных горизонтах эродированных агрочерноземов. При этом величины концентрации $C_{\text{орг}}$ в них очень были близки таковым подповерхностных горизонтов, что предполагало эрозионный вынос почвенной массы верхнего слоя ~30 см эродированных агрочерноземов. Это сопровождалось изменениями содержания несиликатного железа в илистой фракции пахотного горизонта эродированных агрочерноземов, что было следствием постоянного обнажения почвенной массы ранее нижележащего горизонта, провоцирующее разложение органического вещества (*ОВ*) данного горизонта. Это способствовало высвобождению железа из железоорганических комплексов в результате их окислительной деструкции железобактериями. Тем не менее, пахотные горизонты эродированных агрочерноземов не всегда характеризуются меньшим по сравнению с таковым полнопрофильных вариантов содержанием Fe_d , что обусловлено интенсивностью эрозионных процессов, которая зависит, в том числе, от крутизны склона. В случае меньшей кривизны (2-й ключевой участок – 4°) наблюдали незначительное увеличение содержания Fe_d в пахотном горизонте эродированного агрочернозема по сравнению с таковым полнопрофильного варианта за счет большей загрузки $C_{\text{орг}}$ на оксиды Fe (мольное отношение $C_{\text{орг}} : \text{Fe} = 9$), что свидетельствовало о менее прочном связывании *ОВ* на более загруженных поверхностях в отличие от 1-го ключевого участка (кривизна 6°), где наблюдали снижение содержания Fe_d ($C_{\text{орг}} : \text{Fe} = 7$).

В зонах денудации–аккумуляции и преимущественной аккумуляции наблюдали многообразие процессов, участвующих в формировании смыто-намытых и намытых почв. Для пахотных горизонтов смыто-намытых вариантов обоих ключевых участков отмечена единая тенденция – весьма близкие величины концентрации несиликатного железа с таковыми полнопрофильных вариантов, которые могут даже превышать их. Максимально наблюдавшиеся величины содержания Fe_d , как правило, отмечены в намытых агрочерноземах, что обусловлено наибольшей загрузкой $C_{\text{орг}}$ на оксиды Fe, что облегчает десорбируемость Fe_d .

Выявлено, что размер илистых частиц в исследованных агрочерноземах определяли как $C_{\text{орг}}$, так и несиликатное железо, хотя степень их зна-

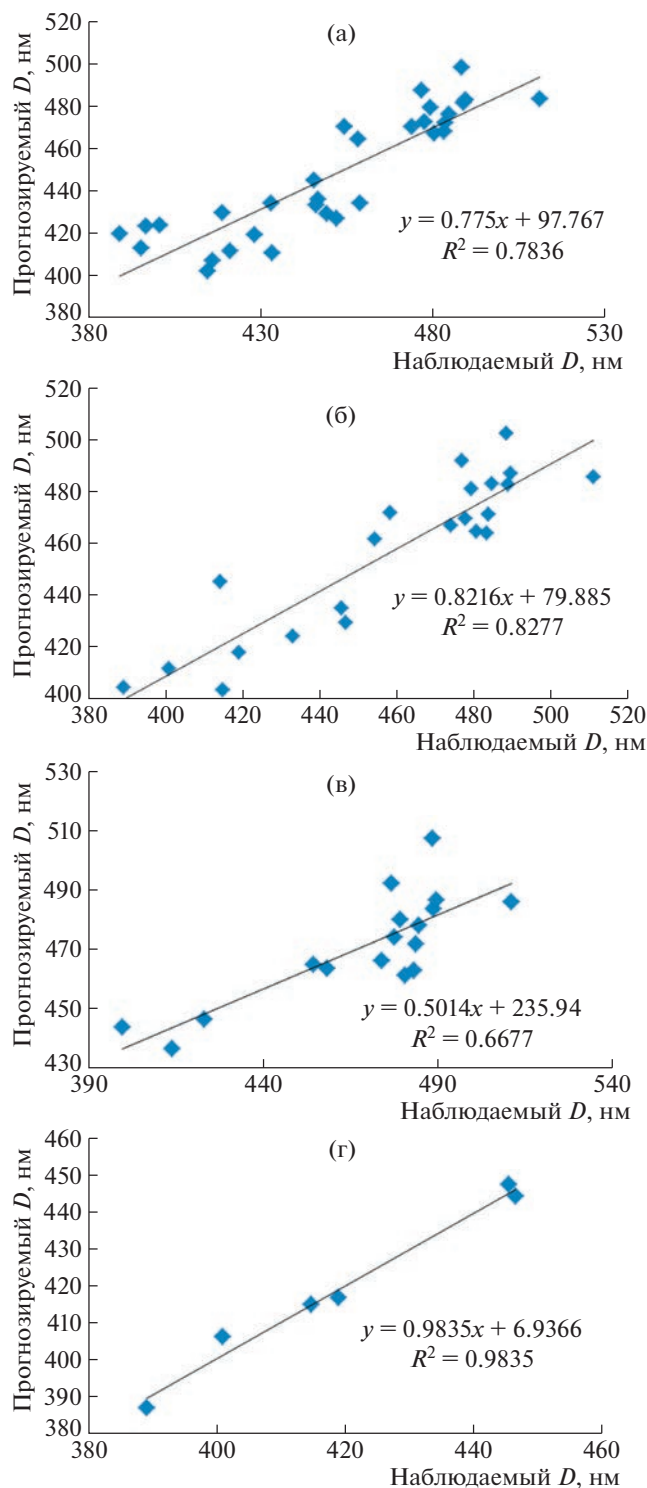


Рис. 6. Графики корреляции аналитических и модельных данных по величине D : $D = f(C_{\text{орг}}, C_{\text{карбонатов}}, \text{Fe}_d)$; (а) – Апх + А1 + АВ + В + ВС + С ($n = 34$, $R^2 = 0.78$, $P < 0.05$), (б) – Апх + А1 + АВ ($n = 25$, $R^2 = 0.83$, $P < 0.05$), (в) – Апх + А1 ($n = 19$, $R^2 = 0.67$, $P < 0.05$), (г) – АВ ($n = 6$, $R^2 = 0.98$, $P < 0.05$).

чимости различалась в верхних гумусовых (Апах, А, АВ) и нижних (В, С) горизонтах: в верхних горизонтах величина D определялась OB , тогда как в нижних горизонтах основная роль в формировании размера органо-глинистых комплексов принадлежит оксидам железа. Тем не менее, полученные данные дали основание предполагать более значимую роль OB в агрегации илистых частиц по сравнению с таковой несиликатного железа.

Гипотеза о множественной линейной регрессионной зависимости величины D от величин концентрации в них углерода ($C_{орг}$ и $C_{карбонатов}$) и Fe_d оказалась статистически значимой как для всего набора генетических горизонтов, так и для гумусовых горизонтов. Коэффициент детерминации модели (R^2) увеличивался в ряду: 0.578 (Апах + А1) < 0.678 (Апах + А1 + АВ + В + ВС + С) < 0.724 (Апах + А1 + АВ) < 0.983 (АВ).

Авторы выражают признательность профессору А.С. Фриду за конструктивные замечания.

Исследование проведено с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемяева З.С., Кириллова Н.П., Данченко Н.Н., Когут Б.М., Таллер Е.Б.* Физико-химические характеристики органо-глинистых комплексов хронорядя дерново-подзолистых почв методами динамического светорассеяния и светорассеяния с анализом фаз // Почвоведение. 2020. № 4. С. 424–429.
2. *Barral M.T., Arias M., Guérif J.* Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates // Soil. Res. 1998. V. 46. P. 261–272.
3. *Baver L.D., Gardner W.H.* Soil physics. Wiley Eastern Limited, New Delhi. 1972. 498 pp.
4. *Tisdall J.M., Oades J.M.* Organic matter and water-stable aggregates in soil // Soil Sci. 1982. V. 33. P. 141–163.
5. *Oades J.M.* Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management // Plant Soil. 1984. V. 76. P. 319–337.
6. *Oades J.M., Waters A.C.* Aggregate hierarchy in soils // Aust. J. Soil Res. 1991. V. 29. P. 815–828.
7. *Chenu C., Plante A.F.* Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the “organo-mineral complex” // European J. Soil Sci. 2006. V. 57. P. 596–607.
8. *Федотов Г.Н., Артемяева З.С.* Коллоидная составляющая грануло-денсиметрических фракций почв // Почвоведение. 2015. № 1. С. 61–70.
9. *Edwards A.P., Bremner J.M.* Dispersion of soil particles by sonic vibrations // J. Soil Sci. 1967. V. 18. P. 47–63.
10. *Fernández-Ugalde O., Barré P., Hubert F. et al.* Clay mineralogy differs qualitatively in aggregate-size classes: clay-mineral-based evidence for aggregate hierarchy in temperate soils. Eur. J. Soil Sci. 2013. V. 64. P. 410–422.
11. *Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B.* Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants // Catena. 2021. V. 204. P. 105403.
12. *Артемяева З.С., Зазовская Э.П., Засухина Е.С., Цомаева Е.В.* Изотопный состав углерода органического вещества водоустойчивых структурных отделиностей типичного чернозема в контрастных вариантах землепользования // Почвоведение. 2023a. № 3. С. 339–352.
13. *Chenu C., Stotzky G.* Interactions between microorganisms and soil particles: An overview. in: Huang P.M., Bollag J.M., Senesi N., (Eds.), Interactions between Soil Particles and Microorganisms – Impact on the Terrestrial Ecosystem. John Wiley & Sons, Chichester. 2002. P. 3–39.
14. *Lehmann J., Kinyangi J., Solomon D.* Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms // Biogeochemistry. 2007. V. 85. P. 45–57.
15. *Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., et al.* Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008. V. 171. P. 61–82.
16. *Asano M., Wagai R.* Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic Andisol. Geoderma. 2014. V. 216. P. 62–74.
17. *Totsche K., Amelung W., Gerzabek M., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C. et al.* Microaggregates in soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2018. V. 181. P. 104–136.
18. *Pinheiro J.P., Mota A.M., d'Oliveira J.M.R., Martinho J.M.G.* Dynamic properties of humic matter by dynamic light scattering and voltammetry // Anal. Chim. Acta. 1996. V. 329. P. 15–24.
19. *Kretschmar R., Holthoff H., Sticher H.* Influence of pH and Humic Acid on Coagulation Kinetics of Kaolinite: A Dynamic Light Scattering Study // J. Colloid Interface Sci. 1998. V. 202. P. 95–103.
20. *Mori Y., Togashi K., Nakamura K.* Colloidal properties of synthetic hectorite clay dispersion measured by dynamic light scattering and small angle X-ray scattering // Adv. Powder Technol. 2001. V. 12. P. 45–59.
21. *Palmer N.E., von Wandruszka R.* Dynamic light scattering measurements of particle size development in aqueous humic materials // Fresenius J. Anal. Chem. 2001. V. 371. P. 951–954.
22. NanoBrook. 2014. Version 1.0. Holtsville: Brookhaven Instruments Corporation; [cited 2023 April 16]. Available from: <https://www.brookhaveninstruments.com/product/nanobrook-series/>

23. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
24. World reference base for soil resources 2014. A framework for international classification, correlation and communication, Word Soil Resource Report 106. FAO. Rome. 2014. 181 p.
25. Ермолаев О.П. Пояса эрозии в природно-антропогенных ландшафтах речных бассейнов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1992. 147 с.
26. Mehra O.P., Jackson M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate // Clay Miner. 1960. V. 7. P. 317–327
27. Артемьева З.С. Органические и органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв. Автореферат на соиск. уч. ст. доктора биол. наук. 2008. 48 с.
28. Артемьева З.С. Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества дерново-подзолистых почв в период зарастания пашни лесом // Проблемы региональной экологии. 2017. № 2. С. 54–59.
29. Травникова Л.С., Артемьева З.С., Сорокина Н.П. Распределение гранулоденсиметрических фракций в дерново-подзолистых почвах, подверженных плоскостной эрозии // Почвоведение. 2010. № 4. С. 495–504.
30. Artemyeva Z., Zigova A., Kirillova N., Štátný M., Kirillova N., Holubík O., Podrázský V. Evaluation of aggregate stability of Haplic Stagnosols using dynamic light scattering, phase analysis light scattering and color coordinates // Archives of Agronomy and Soil Science. 2017. V. 63. № 13. P. 1838–1851.
31. Artemyeva Z.S., Žigová A., Kirillova N.P., Štátný M. Dynamics of organic matter in soils following a change in landuse on Permo-Carboniferous rocks in the Cesky Brod area (Czech Republic) // Acta Geodynamica et Geomaterialia 2018. V. 15. № 4. P. 339–348.
32. Kaiser K., Guggenberger G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils // Org. Geochem. 2000. V. 31. P. 711–725.
33. Eusterhues K., Rumpel C., Kögel-Knabner I. Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: importance of specific surface area, iron oxides and micropores // Eur. J. Soil Sci. 2005. V. 56. P. 753–763.

Physic-Chemical Characteristics of Organo-Clay Complexes of Agrochernozeams of Different Localization on the Slope

E. V. Tsomaeva^a, Z. S. Artemyeva^{a, #}, and E. S. Zasukhina^b

^aThe V.V. Dokuchaev Soil Institute
Pyzhevsky per. 7, bldg. 2, Moscow 119017, Russia

^bFederal Research Center “Computer Science and Control” of the RAS
ul. Vavilova 44, bldg. 2, Moscow 119333, Russia

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

Organo-clay complexes of agrochernozeams of different localization on the slope were studied, including by the method of dynamic light scattering (DLS). A decrease in the concentration of organic carbon (C_{org}) of silty fractions in the arable horizons of washed-out agrochernozeams was revealed, which was a consequence of the constant exposure of the soil mass of the underlying horizon, provoking the decomposition of organic matter(s). This was accompanied by changes in the content of non-silicate iron (Fe_d) as a result of oxidative degradation of organo-iron complexes, which contributed to the desorption of Fe_d . Different intensity of erosion processes influenced the tendency to change the dynamics of Fe_d : a lower slope steepness (4°) contributed to an increase in the load of C_{org} on iron oxides, resulting in an increase in iron desorption, whereas in conditions of greater steepness (6°), a decrease in iron desorption was observed. Regardless of the position on the slope, the highest values of the average diameter of organo-clay complexes (D) were observed in the upper horizons of the studied agrochernozeams, which decreased down the profile. As a result of erosion processes, the size of organo-clay complexes in arable horizons decreased in comparison with that in non-eroded agrochernozeams (by 1.1 times). It was revealed that the size of organo-clay complexes in the studied agrochernozeams was determined by the values of the content of C_{org} and Fe_d , although the degree of their significance differed in the upper humus (Aarable, A1, AB) and lower (B, C) horizons. In the upper horizons, the value of D was determined by the content of C_{org} , whereas in the lower horizons, the main role in the formation of the size of organo-clay complexes belonged to Fe_d . The obtained data allowed us to assume a more significant role of organic matter (OM) in the aggregation of clay particles compared to that of Fe_d . The hypothesis of a multiple linear regression dependence of the value of D on the values of the concentration of carbon (C_{org} and $C_{carbonates}$) and Fe_d in them turned out to be statistically significant both for the entire set of genetic horizons and for humus horizons. The coefficient of determination of the model (R^2) increased in a row: 0.578 (Apl + A1) < 0.678 (Apl + A1 + AB + B + BC + C) < 0.724 (Apl + A1 + AB) < 0.983 (AB).

Keywords: erosion, organo-clay complexes, dynamic light scattering, average diameter, organic matter, non-silicate iron, carbonates.

УДК 631.85:631.816

ОКУПАЕМОСТЬ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ ДЛИТЕЛЬНОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ¹

© 2023 г. О. В. Волюнкина

*Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия**E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru*

Поступила в редакцию 03.04.2023 г.

После доработки 12.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В 52-летнем стационарном опыте на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ изучили действие и последствие фосфорного удобрения на фоне внесения азота. Доза Р40 в сочетании с азотом, вносимая 25 лет в зернопропашном севообороте кукуруза—две пшеницы—овес (в сумме Р1000), после прекращения применения оказывала длительное последствие в посеве бессменной пшеницы после стерни. В эксперименте оценена экономическая эффективность действия и последствие дозы фосфора Р1000. С учетом 27-летнего последствие окупаемость фосфора дозы Р40, добавленной к N40—50, повысилась с 9.0 до 15.5 кг/кг.

Ключевые слова: зернопропашной севооборот, бессменная пшеница после стерни, фосфорное удобрение, действие, последствие удобрения, урожайность культур, окупаемость удобрения.

DOI: 10.31857/S0002188123110157, **EDN:** PWRZKJ

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность азотных и фосфорных удобрений тесно взаимосвязана. На выщелоченном черноземе, бедном подвижным фосфором, добавление фосфора к азоту повышает урожайность яровой пшеницы в 1.6–2.6 раза [1]. Оптимальное содержание подвижного фосфора в почве в некоторых литературных источниках завышено. Например, в работе Алексеевой для черноземов разных зон Украины рекомендовано достижение содержания высокого уровня фосфора — 100–180 мг/кг [2]. По данным ученых Тамбовского НИИСХ, при изучении 3-х уровней содержания P_2O_5 все 3 уровня были повышенными: 96, 122 и 157 мг/кг. Уже на 5-й год удобрение действовало слабо, а на 3-м фоне не давало существенных прибавок урожая [3].

В исследованиях, посвященных оптимизации доз азота и фосфора на обыкновенных и южных черноземах, соавторы составили таблицу подбора доз для 3-х фонов обеспеченности подвижным P_2O_5 и 3-х уровней наличия нитратов внутри каждого из фосфорных фонов. Среди многих вариантов внесения НРК в исследованиях этих авторов более эффективной была экономная смесь N33P19K9 [4, 5].

В России на 01.01.2019 г. насчитывалось почв пашни с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора 26%, средним — 34% [6]. Курганская обл. выделяется среди разных регионов России низким содержанием подвижного фосфора в почве. В Нечерноземной зоне есть примеры, когда за счет активного применения фосфорных удобрений доля бедных фосфором почв снижена с 51.9 в 1971 г. до 21.7% в 2010 г. [7]. В Курганской обл. подобный эффект тоже отмечен, например, в 1-м туре обследования почв в 1966–1972 гг. бедных подвижным фосфором почв насчитывали 74%, но за счет внесения удобрений их доля к 1995–1999 гг. снизилась до 40%. В дальнейшем с уменьшением использования удобрений к 2016 г. низкие запасы подвижного фосфора составили 62% пашни [8]. При этом много сельскохозяйственных предприятий вносят только азотные удобрения. Насколько повышается эф-

¹ Исследование выполнено в Курганском НИИСХ — филиале УрФАНИЦ УрО РАН в лабораториях агрохимии и земледелия в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002 “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, рационального применения пестицидов и биопрепаратов, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

фективность азота при совместном его применении с фосфором или на окультуренном по фосфору фоне, показали полевые опыты Курганского НИИСХ [9, 10]. За счет малой подвижности фосфора удобрений он оказывает длительное последствие (22–32 года) после прекращения применения фосфорного удобрения [11].

Цель работы — анализ действия и последствия фосфорных удобрений на величину урожайности сельскохозяйственных культур за 52 года стационарного опыта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент заложен в 1971 г. заведующим отделом агрохимии В.И. Волынским на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ. Автор работы — исполнитель этого опыта с 1993 г. по настоящее время. Исследование в течение 7-ми ротаций в 1971–1998 гг. вели в зернопропашном севообороте с чередованием культур кукуруза—пшеница—пшеница—овес. Культуры выращивали при ежегодной вспашке. Последний посев кукурузы был в 1995 г., далее бессменно сеяли пшеницу. В конце этого периода в земледельческой практике Курганской и других областей произошли изменения — сокращение посевов кормовых культур и объемов проведения вспашки. Для изучения нового агрофона в 2000 г. севооборот в опыте был заменен бессменной пшеницей, высеваемой после стерни.

Стационарному опыту 52 года. Почва на участке — выщелоченный чернозем маломощный малогумусный среднесуглинистый. Агрохимические свойства почвы в слое 0–20 см: pH_{KCl} 6.2–6.4 ед. при закладке и 5.0–5.2 ед. — в настоящее время, содержание гумуса — 4.5%, суммы кальция и магния — 20–22 мг-экв/100 г, общего азота — 0.20%, общего фосфора — 0.07%, содержание подвижных P_2O_5 и K_2O — 40 и 250–300 мг/кг почвы соответственно. Азотное удобрение в опыте — аммонийная селитра в средних в севообороте дозах $\text{N}_{25-50-75}$ и $\text{N}_{20-40-60}$ на бессменной пшенице; соответственно фосфорное удобрение в этих вариантах опыта — суперфосфат P_{40} и аммофос P_{20} (с перерывом на 12 лет в 1996–2007 гг.). Удобрения вносили до посева дисковой сеялкой СЗ–3.6 на глубину 4–5 см. Среднегодовые осадки в центральной зоне Курганской обл. равны 350 мм и за май–август — 190 мм при часто повторяющихся засухах в июне или июле. За годы проведения исследования в севообороте было 20 благоприятных по увлажнению растений лет, за период выращивания бессменной пшеницы — 7 лет, в такие годы с

помощью азотно-фосфорного удобрения ее урожайность повышалась до 20–28–32 ц/га.

Почву отбирали весной перед внесением новых доз удобрения, т.е. определяли их остаточное количество. Содержание подвижного P_2O_5 в слое 0–20 см почвы под влиянием ежегодного применения суперфосфата в севообороте в течение 1971–1995 гг. в смесях $\text{N}_{50}\text{P}_{40}$ и $\text{N}_{50}\text{P}_{40}\text{K}_{40}$ повысилось до 100–110 мг/кг. В 1996–2007 гг. фосфорное удобрение, как уже упоминали, не вносили и применяли один азот. Бессменная пшеница в эти годы использовала последствие (Пос) доз P_{40} и $\text{P}_{40}\text{K}_{40}$ на азотном фоне, эффективность которых была близкой по влиянию на урожайность. Постепенно содержание P_2O_5 в почве снизилось до 70–80 мг/кг. Поэтому в 2008–2022 гг. снова стали применять фосфорные удобрения на фоне комбинации NP в виде аммофоса P_{20} , а в вариантах NPK продолжили учет последствия фосфора и калия (Пос PK), длительность которого важно было установить. Поскольку содержание калия в почве на участке под опытом высокое, проявление последствия относим в основном к фосфору. К 52-му году исследования сумма внесенного фосфора в вариантах NPK составила P_{1000} , NP — P_{1300} . Среднегодовые дозы фосфора к 2022 г. на 2-х сравниваемых фонах равнялись P_{19} и P_{25} . Схема опыта предусматривала сравнение в годы севооборота 3-х севооборотных доз азота — $\text{N}_{25-50-75}$ без фосфора и совместно с P_{40} и $\text{P}_{40}\text{K}_{40}$. В посевах бессменной пшеницы применяли дозы азота $\text{N}_{20-40-60}$ без фосфора и на фонах внесения P_{20} , а также и исследовали эффект Пос PK .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для объективной оценки влияния 2-х фосфорных фонов следует их сравнить с самого начала формирования. В годы севооборота в посеве кукурузы, как и овса, варианты NP и NPK были равноценными. В посеве пшеницы добавление калия к азотно-фосфорному удобрению имело небольшое преимущество. Внесение одного азота на почве, бедной подвижными фосфатами, проигрывало в посевах всех культур севооборота. К контролю прибавки урожайности от азотно-фосфорного и полного минерального удобрения при второй дозе азота были равны: кукурузы — 3.6 и 3.8 ц з.е./га, 1-й и 2-й пшеницы после кукурузы — в среднем 5.7 и 6.6, овса — 3.2 и 3.6 ц з.е./га. По сравнению с внесением только азотного удобрения совместное внесение азота и фосфора давало дополнительно в годы севооборота прибавку урожайности: кукурузы — 2.0–2.2, пшеницы —

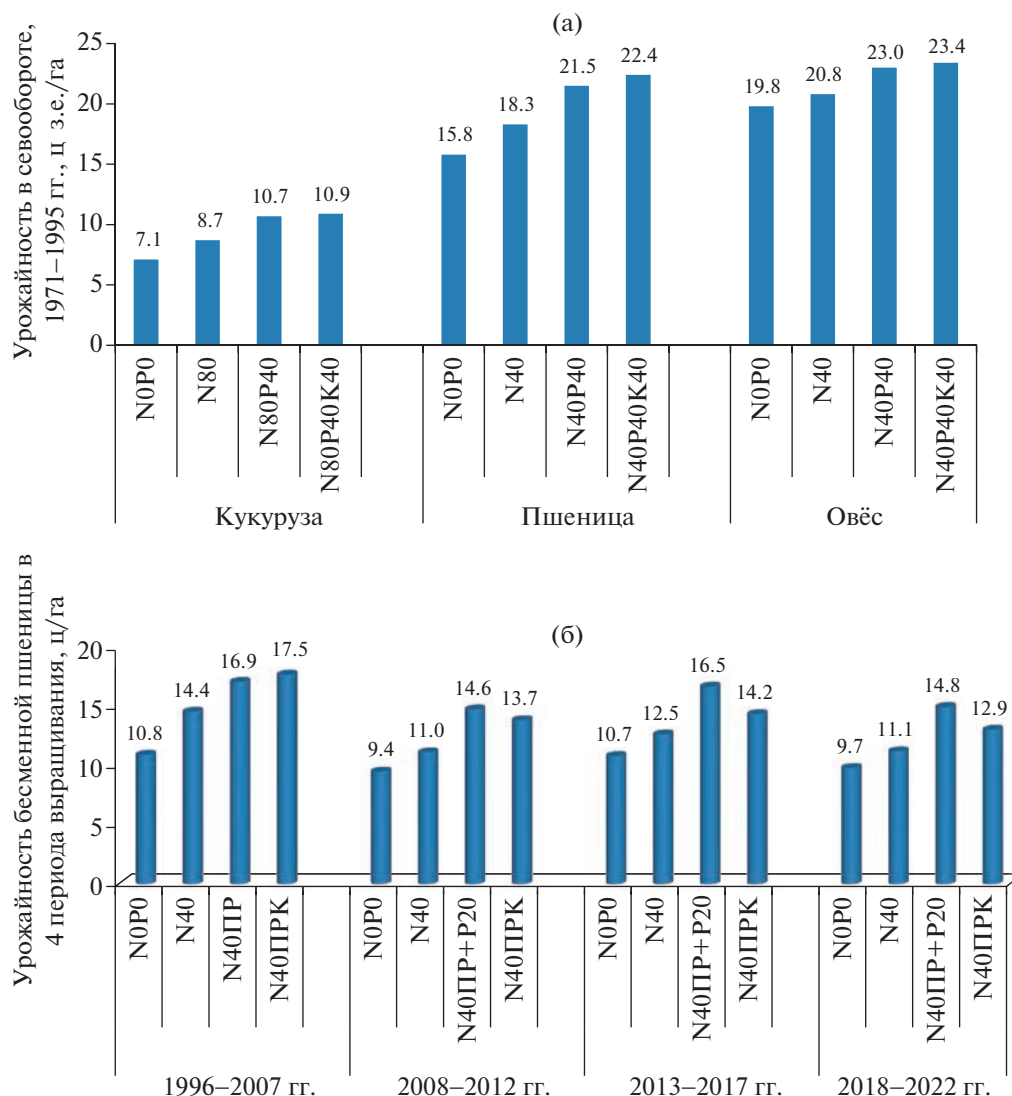


Рис. 1. Урожайность при разном составе удобрения: (а) – сельскохозяйственных культур зернопропашного севооборота (1971–1995 гг.), (б) – бесменной пшеницы (1996–2022 гг.), ц з.е./га.

3.2–4.1 и овса – 2.2–2.6 ц з.е./га. На рис. 1а показано действие и последствие 2-х фосфорных фонов в сочетании со 2-й дозой азота.

Данные последующих лет посева бесменной пшеницы разбиты на 4 периода, в 1-й из них фосфор не вносили, поэтому оценили последствие суперфосфата на пшенице, урожайность оказалась близкой на разных фонах с преимуществом фона NPK перед NP всего в 0.6 ц/га (рис. 1б).

Далее в течение 3-х периодов восстановили фосфорные фоны. В комбинации с применением NP и сравнением этого фона с последствием (Пос) фосфора в вариантах NPK применение P20 в 2008–2012 гг. увеличило урожайность в среднем по сравнению с фоном последствия на ≈ 1 ц/га, в течение

следующих 2-х периодов – на 2.1 и 1.9 ц/га соответственно.

Более подробный анализ сравнения этих фонов вскрыл очень важную закономерность взаимодействия фосфора с дозой азота. Применение одного азота в посеве бесменной пшеницы на бедной фосфатами почве в среднем за время восстановления фосфорного фона (15 лет) повышало ее урожайность на 1.4–1.7 ц/га (табл. 1). Увеличение дозы с N20 до N40–60 при отдельном внесении азота всегда оказывалось нецелесообразным. Добавление фосфора существенно изменяло продуктивность пшеницы, но его действие зависело от дозы азота, повышая урожайность культуры на 1.5 – при 1-й дозе и на 2.2–2.1 ц з.е./га – при 2-х следующих. Одно и то же количество добав-

Таблица 1. Урожайность бессменной пшеницы при разном составе удобрения, ц зерна/га

Год/ Вариант	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Среднее	+/- к контролю
Контроль	5.2	11.2	7.5	18.3	4.8	9.8	8.9	7.9	10.2	16.8	8.4	8.0	8.6	2.2	21.3	9.9	—
N20	5.7	12.3	9.1	20.9	6.5	11.5	10.2	7.7	11.4	20.1	9.6	8.7	8.3	3.2	24.9	11.3	1.4
N20ПосР	6.8	14.1	10.6	23.4	7.5	13.3	13.0	8.7	13.6	20.9	10.5	10.9	9.7	3.2	26.2	12.8	2.9
N20ПосР + Р20	6.0	13.1	9.8	24.5	6.5	13.8	13.5	9.0	13.9	22.8	11.9	12.7	11.3	2.7	28.9	13.4	3.5
N40	5.6	12.9	8.9	21.2	6.2	11.8	11.6	7.5	12.5	20.9	9.9	9.3	8.6	2.5	25.3	11.6	1.7
N40ПосР	6.6	15.8	11.6	27.9	6.5	13.5	14.3	8.9	13.7	23.9	12.1	11.6	11.0	2.5	27.3	13.8	3.9
N40ПосР + Р20	6.3	16.8	12.3	30.6	6.8	14.6	16.2	10.0	15.7	26.2	12.6	13.5	12.2	3.3	32.2	15.3	5.4
N60	4.2	11.9	9.6	21.5	6.3	11.3	6.2	8.0	12.0	22.1	12.3	10.3	7.9	2.7	26.0	11.5	1.6
N60ПосР	6.7	16.3	11.7	27.1	7.1	12.4	8.0	9.7	13.6	25.2	11.0	13.2	10.6	2.7	28.7	13.6	3.7
N60ПосР + Р20	6.3	17.5	12.3	30.6	6.9	14.6	10.0	10.3	14.0	30.5	14.1	16.3	12.1	3.1	29.8	15.2	5.3
НСР ₀₅	1.4	2.0	2.2	3.2	1.2	2.1	3.2	1.45	1.4	2.7	2.0	1.9	1.2	0.6	3.2		0.96

Примечания. 1. Пос — последствие. Первый год внесения добавочной дозы Р20 (2008) — засушливый, как и 2012, 2021 г. 2. НСР₀₅ фактора дозы азота — 0.96, фактора эффект Р20 — 0.59 ц зерна/га.

ленного к азоту фосфора Р300 обеспечило за 15 лет очень разные суммы прибавок — 22.5 ц зерна/га в сочетании с N20, 33.0 — при N40 и 31.5 ц зерна/га — на фоне N60. Поэтому окупаемость 1 кг фосфора с переходом фоновой дозы азота от N20 к N40—60 увеличивалась с 7.5 до 11.0 и 10.5 кг зерна. Поначалу отзывчивость пшеницы на добавление Р20 к первой дозе азота N20 отмечали только в годы формирования высокой урожайности, как это было в 2011 и 2017 гг. По мере истощения фона последствие фосфора положительная реакция стала проявляться и при умеренной урожайности пшеницы. За 15 лет при этой дозе азота лишь 5 раз отмечена прибавка от Р20 не менее 1 ц/га зерна, при более высоких дозах азота N40—60 — 9—10 раз.

При суммировании годовых прибавок от действия фосфора в дозе Р40 соответственно 3-м азотным фонам (2.1, 3.6 и 4.4 ц з.е./га) и его последствие (1.3, 2.6 и 3.2 ц з.е./га) получено 3.4; 6.2 и 7.6 ц з.е./га. Окупаемость 1 кг фосфора прибавками урожайности культур в период севооборота составила 5.2, 9.0 и 11.0 кг з.е. С учетом последствие фосфора в посевах бессменной пшеницы

оплата существенно возросла, также различаясь в зависимости от фонов 3-х доз азота: 8.5, 15.5 и 19.0 кг з.е./кг д.в. суперфосфата (табл. 2).

Уровень существенных прибавок урожайности от применения Р40 как в годы действия, так и последствие, зависел от условий увлажнения периода вегетации и дозы азота. Например, в годы севооборота по мере возрастания дозы азота повторяемость более высоких прибавок повышалась с 60% лет до 76—80%, в годы последствие соответственно — с 41 до 70%.

Более обоснованно делать заключение о сроке возобновления применения фосфора лучше не по одному опыту. В Курганском НИИСХ есть эксперимент, где прослежено за последствием 3-х суммарных доз фосфора Р240—360—720, внесенных в запас в половинных дозах в 1971 и 1975 гг. в зернопаровом севообороте пар—пшеница—пшеница—овес. Последствие 3-х разных количеств запасного внесения фосфора проявлялось 27—39—45 лет в одной из закладок опыта и 34—34—44 года — во второй. Исключая годы с паром, последствие первого фона хватило в 2-х закладках опыта

Таблица 2. Суммарный эффект действия и последействия дозы Р40 за 52 года

Два периода исследования	Показатель	Доза азота в севообороте и в посеве бессменной пшеницы		
		N25–20	N50–40	N75–60
Действие в севообороте, ц з.е./га (1971–1995 гг.)	Прирост от азота за год	1.4	1.6	1.4
	прибавка от добавленной дозы Р40	2.1	3.6	4.4
	Оплата Р40, кг/кг	5.2	9.0	11.0
Последействие в посеве бессменной пшеницы, ц з.е./га (1996–2022 гг.)	Прирост от азота за год	1.9	2.3	2.4
	прибавка от последействия Р40	1.3	2.6	3.2
Общий прирост за год от Р40 за 52 года, ц з.е./га		3.4	6.2	7.6
Окупаемость с учетом последействия Р40, кг/кг		8.5	15.5	19.0

на 20–25 посевов, второго – на 25–29 и третьего – на 33–34. Среднегодовое количество внесенного фосфора к этим срокам уменьшалось до Р9–9–16 в одном из полей опыта и до Р7–10–16 в другом [12]. Можно считать, что уже при снижении среднегодовой дозы до Р10–16 следует возобновлять применение фосфорных удобрений.

На основании результатов этих двух опытов В.И. Волынским была откорректирована для местных условий шкала Чирикова по наличию подвижного фосфора в слое 0–20 см почвы. В ней уровни содержания подвижного P_2O_5 (мг/кг) делятся следующим образом: очень низкое – <20, низкое – 20–45, среднее – 45–60, повышенное – 60–80 и высокое – >80 [13].

В посевах бессменной пшеницы в среднем за последние 14 лет содержание подвижного фосфора в слое 0–20 см почвы оказалось следующим: в контроле – в среднем 48 мг/кг (при изменениях по годам от 36 до 64), при внесении одного азота – 40 мг/кг (от 32 до 47), в варианте с Р19, в котором все еще в течение 27 лет отмечали последействие фосфора, – 61 мг/кг (от 57 до 70) и на фоне Р25 – 86 мг/кг (от 77 до 112).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования свидетельствовали о тесном взаимодействии фосфорного удобрения с дозой азота. Эта закономерность проявлялась в севообороте и при выращивании бессменной пшеницы после стерни. С повышением дозы азота с N20 до N40–60 потребность растений в фосфоре возрастала, и число лет с существенным приростом урожайности увеличивалось с 5 до 9–10. Длительность последействия фосфора зависела от дозы применения удобрения и уровня урожайности культур. Дозы Р240–360–720 в одном из опытов Курганского НИИСХ ока-

зывали положительное последействие в посевах пшеницы. В другом опыте от дозы Р1000 в течение 27 лет проявлялось последействие фосфора.

Надежным ориентиром необходимости возобновления применения фосфора является установление среднего количества от внесенного ранее фосфора, приходящегося на год, ко времени, когда принимают решение о внесении фосфорного удобрения. При снижении этой величины до Р10–16, а также при уменьшении содержания подвижного P_2O_5 до 50–60 мг/кг следует вновь применять фосфорное удобрение.

Оплата Р40 в севообороте на 1 кг д.в. суперфосфата соответственно 3-м фонам азота N25–50–75 составила 5.2, 9.0 и 11.0 кг з.е. С учетом последействия фосфорного удобрения в посевах бессменной пшеницы она повысилась до 8.5, 15.5 и 19.0 кг зерна/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шафран С.А. Влияние типа почвы и содержания подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений // Агрохимия. 2015. № 3. С. 26–33.
2. Алексеева Д.М. Основные итоги и задачи исследований по установлению оптимальных параметров уровня плодородия почв в интенсивном земледелии / Регулирование плодородия почв, круговорота и баланса питательных веществ в земледелии СССР. М., 1981. С. 170–175.
3. Вислобокова Л.Н., Скорочкин Ю.П., Иванова О.М. Эффективность удобрений под озимую пшеницу в зависимости от содержания фосфора в почве // Комплексное применение средств химизации в адаптивно-ландшафтном земледелии. Мат-лы 44-й Международ. научн. конф. молод. ученых и специалистов 22–23 апреля 2010 г. (ВНИИА). М.: ВНИИА, 2010. С. 39–40.
4. Чуб М.П., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Плодородие черноземного и продуктивность зернопарового севообо-

- рота при длительном применении минеральных удобрений // *Агрохимия*. 2010. № 7. С. 3–13.
5. Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Оптимизация доз азотных и фосфорных удобрений на черноземных почвах Поволжья с различным содержанием фосфора // *Плодородие*. 2017. № 2. С. 8–11.
 6. Сычев В.Г., Аканова Н.М. Агроэкологическая оценка эффективности аммофоса в технологии возделывания различных культур // *Плодородие*. 2020. № 1 (112). С. 3–6.
 7. Шафран С.А. Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и ее резервы // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
 8. Состояние плодородия пашни Курганской области на 01.01.2016 года в картограммах, диаграммах и таблицах. Курган, 2016. 27 с.
 9. Емельянов Ю.Я., Копылов А.Н., Волынкина О.В., Кириллова Е.В. Приемы эффективного использования фосфорного удобрения // *Агрохимия*. 2014. № 7. С. 27–32.
 10. Волынкин В.И., Волынкина О.В. Влияние удобрений на урожайность яровой пшеницы в бессменных посевах по стерне // *Агрохимия*. 2014. № 12. С. 24–30.
 11. Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М., Адрианов С.Н., Бражникова Н.В., Карпова Д.В., Карпунин А.И., Кирпичников Н.А., Конончук В.Д., Самойлов Л.Н. Способы, сроки и формы внесения фосфора в агроценозе // *Агробιοгеοхимический цикл фосфора* / Под ред. А.Л. Иванова. М.: РАСХН, 2012. С. 299–321.
 12. Волынкин В.И., Волынкина О.В., Кирилова Е.В. Пути управления системой удобрения зерновых культур в зернопаровом севообороте // *Эконом. сел.-хоз. и перераб. предприятий*. 2019. № 7. С. 61–66.
 13. Волынкин В.И., Волынкина О.В., Данилова Л.Ф., Новоселов В.П., Попова Л.П., Емельянов Ю.Я., Притчин А.Н. Научные основы системы удобрения сельскохозяйственных культур в севообороте // *Научные основы систем земледелия Курганской области: рекомендации*. Курган, 2001. С. 62–110.

Payback of Phosphorus, Taking into Account Its Long-Term Aftereffect

O. V. Volynkina

*Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the RAS
ul. Belinskogo 112a, Yekaterinburg 620142, Russia*

E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

In a 52-year stationary experiment at the Central Experimental Field of the Kurgan Research Institute, the effect and aftereffect of phosphorus fertilizer against the background of nitrogen application were studied. A dose of P40 in combination with nitrogen, introduced for 25 years in the corn—two wheat—oats crop rotation (in the amount of P1000), after discontinuation of use, had a long aftereffect in sowing permanent wheat after stubble. In the experiment, the economic efficiency of the action and aftereffect of a dose of phosphorus P1000 was evaluated. Taking into account the 27-year aftereffect, the payback of the phosphorus dose of P40 added to N40–50 increased from 9.0 to 15.5 kg/kg.

Keywords: grain-tillage crop rotation, permanent wheat after stubble, phosphorus fertilizer, effect, aftereffect of fertilizer, crop yield, fertilizer payback.

УДК 631.46:631.445.41:633.16:631.811.98

ВЛИЯНИЕ БАКТЕРИАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ЧЕРНОЗЕМА СЕГРЕГАЦИОННОГО В ПОСЕВАХ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ

© 2023 г. А. Ю. Чевердин^{1,*}, Ю. И. Чевердин¹, М. Ю. Сауткина²

¹Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева
397463, Воронежская обл., Таловский р-н, пос. 2-го участка Института им. Докучаева, кварт. 5, 81, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии
394087 Воронеж, ул. Ломоносова, 105, Россия

*E-mail: cheverdin@bk.ru

Поступила в редакцию 14.04.2023 г.

После доработки 20.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В полевом опыте, в Воронежской обл. на территории Воронежского ФАНЦ изучили изменения микробиологической активности почвы под влиянием бактериальных ассоциативных биопрепаратов и минеральных удобрений в течение 2021–2022 гг. Микробные штаммы использовали для предпосевной обработки семян. Почва опытного участка — чернозем обыкновенный (сегрегационный) среднегумусный тяжелосуглинистый. Обеспеченность доступными формами элементов питания — средняя и высокая. Сорт ячменя — Таловский 9. Технология возделывания — общепринятая в зоне. Установлено сохранение почвенного плодородия и рациональное его использование вследствие изменения направленности микробиологических процессов в почве при применении диазотрофов. Ассоциативные препараты замедляли процессы минерализации гумусовых веществ. Снижалась численность бактерий, связанных с деструкцией органического вещества. При комплексном использовании минеральных удобрений с ризобактериями существенным образом уменьшались количество нитрификаторов, ответственных за процессы денитрификации, и потери почвенного азота. Отмечено значительное увеличение на естественном фоне удобренности численности почвенной грибной микрофлоры под влиянием диазотрофов.

Ключевые слова: биопрепараты, плодородие, микробиология, почвенные микроорганизмы, удобрения, яровой ячмень, чернозем.

DOI: 10.31857/S0002188123110042, **EDN:** PPJXPP

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования указывают на взаимосвязь почвенного плодородия и интенсивности микробиологических процессов. Почвенные микроорганизмы выполняют многообразные функции сохранения почвенного плодородия, синтеза гумусовых веществ, круговорота биогенных элементов в почве [1–3].

Применение нетрадиционных удобрений изменяет направленность микробиологических процессов в почве. Усиливается активность почвенной микрофлоры, вследствие чего повышается эффективное и потенциальное почвенное плодородие [4, 5].

Применение биостимулятора роста Рестарт (бактерии *Rhodococcus erythropolis* OPI-01) на яровом ячмене позволило получить более высокую

урожайность, что в свою очередь приводило к увеличению микробной биомассы в почве [6].

Предпосевная обработка семян микробными и биологически активными препаратами усиливает микробиологическую активность почвы. Увеличивается количество бактерий амилолитиков, аммонификаторов, повышается нитрогеназная активность. Численность почвенных грибов снижается в 1.2–1.9 раза [7, 8].

В исследованиях, проведенных в Воронежской обл., отмечен высокий вклад бактериальных удобрений в интенсификацию микробиологических процессов в почве [9]. В связи этим цель работы — изучение влияния микробных штаммов на структуру микробного ценоза чернозема сегрегационного.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в отделе агропочвоведения Воронежского ФАНЦ им. В.В. Докучаева в 2021–2022 гг. Почвенный покров опытного участка представлен черноземом обыкновенным (сегрегационным) среднесильным среднегумусным тяжелоуглинистым. Содержание гумуса — 6.5–6.8%, pH_{H_2O} 7.1, pH_{KCl} 6.5–6.7, H_g — 1.3–1.9 мг-экв/100 г. Обеспеченность элементами минерального питания — средняя и повышенная.

Объект исследования — яровой ячмень сорта Таловский 9. Исследование проведено в полевом и лабораторном опытах. Предшественник — зерновые. Площадь посевной делянки — 6.4 м², учетной — 5 м². Повторность шестикратная. Опыт двухфакторный: фактор 1-го порядка — фоны удобренности (без удобрений и N60P60K60), фактор 2-го порядка — бактериальные биопрепараты: Мизорин, штамм 2П-7, штамм 17-1, штамм 18-5. В качестве минерального удобрения использовали азофоску с внесением под предпосевную культивацию. Основная обработка почвы — вспашка на 20–22 см трактором МТЗ-1221. Количество аммонификаторов определяли на мясопептонном агаре (МПА); бактерии, использующие минеральные формы азота, и актиномицеты — на крахмал-амиачном агаре (КАА); целлюлозолитические микроорганизмы — на среде Виноградского; азотобактер — на почвенных пластинах; нитрифицирующие бактерии — на выщелоченном агаре; минерализаторы гумуса — на нитратном агаре [10]. Уборку проводили напрямую комбайном “Сампо-130” при достижении полной спелости зерна. Ассоциативные микробные штаммы использовали для инокуляции непосредственно перед посевом. Микробные препараты были получены из НИИСХ микробиологии. Состав микробных препаратов представлен ниже.

Штамм 18-5, штамм 17-1. Основой этих биопрепаратов являются бактерии рода *Pseudomonas* sp. Проявляют свою высокую эффективность при предпосевной инокуляции семян и опрыскивании вегетирующих растений. Способны подавить активность фитопатогенных грибов. Могут использовать минеральные и органические источники азота.

Мизорин, штамм 7. Входящие в состав данных биопрепаратов бактерии *Arthrobacter mysoarens* обладают широким спектром действия на фитопатогенные микроорганизмы, подавляя развитие корневых гнилей в 2–5 раз, фитофтороза — в 2–4 раза. Также Мизорин повышает устойчивость растений к засухе, ограничивает поступление и накопление в растениях нитратов. Бактерии *Ar-*

throbacter mysoarens являются diazотрофными микроорганизмами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из важных процессов круговорота азота в природе является аммонификация. В результате происходит деструкция азотсодержащих соединений с выделением аммиака или ионов аммония. Процесс аммонификации проходит за счет деятельности бактерий различных родов: *Bacillus*, *Clostridium*, *Arthrobacter*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Proteus*. Активность данной группы микроорганизмов определяют по выращиванию их на мясопептонном агаре.

По данным, полученным в результате нашего исследования, можно судить о разноплановом влиянии минеральных удобрений и ризобактерий на деятельность аммонификаторов. На фоне с естественным уровнем плодородия положительное влияние на численность данной группы микроорганизмов оказывал только штамм 17-1, и относительно контроля превышение составило 1.37 млн КОЕ/г почвы (табл. 1). Во всех остальных вариантах с применением ассоциативных штаммов отмечено снижение активности бактерий-аммонификаторов. Если в контроле этот показатель был равен 9.18 млн КОЕ/г почвы, то в вариантах с инокулянтами изменялся в пределах 6.7–7.47 млн КОЕ/г почвы.

Довольно высокий рост количества бактерий-аммонификаторов происходил благодаря внесению минерального удобрения — азофоски в дозе N60P60K60. По отношению к фону без удобрений повышение составило 2.38 млн КОЕ/г почвы. В вариантах, где применяли обработку семян ассоциативными штаммами, сохранялась закономерность снижения активности аммонификаторов, отмеченная на естественном фоне удобренности. Их численность в вариантах под влиянием diaзотрофов варьировала в пределах 9.34–11.2 млн КОЕ/г почвы. При этом в контроле эта величина была больше и равнялась 11.6 млн КОЕ/г почвы.

Бактерии амилаолитики, культивируемые на крахмал-амиачном агаре (КАА), участвуют в синтезе гумусовых веществ [11]. Количество их в почве определялось как внесенным комплексным удобрением, так и примененными в опыте препаратами на основе ассоциативных штаммов. На фоне без удобрений на численность амилаолитиков положительное воздействие оказали только штаммы 17-1 и 18-5. В относительном выражении превышение по отношению к контролю составило 17.4 и 15.3% соответственно (табл. 1). Под действием остальных биопрепаратов активность

Таблица 1. Микробиологическая активность почвы под посевами ярового ячменя (2021–2022 гг.)

Фон удобренности	Вариант	млн КОЕ/г почвы					тыс. КОЕ/г почвы			КОЕ/50 г почвы
		общая численность	МПА	КАА	актиномицеты	минерализаторы гумуса	микробиоты	клетчатковые	нитрификаторы	азотобактер
Без удобрений	Контроль	42.9	9.2	14.4	2.67	16.7	27.2	75.3	0.51	238
	Мизорин	39.2	7.5	13.8	2.32	15.6	46.4	71.8	0.61	250
	Шт. 2П-7	41.4	6.7	13.7	2.66	18.3	36.0	62.8	0.56	251
	Шт. 17-1	43.1	10.6	16.9	2.82	12.9	33.6	66.4	0.50	192
	Шт. 18-5	46.4	7.7	16.6	2.90	19.2	40.9	59.1	0.54	208
Среднее (диазотрофы)		42.5	8.1	15.2	2.68	16.5	39.2	65.0	0.55	225
Среднее (фон)		42.6	8.3	15.10	2.67	16.5	36.8	67.1	0.54	228
N60P60K60	Контроль	49.9	11.6	15.5	2.82	20.0	47.0	89.5	0.70	253
	Мизорин	44.8	9.7	15.4	2.54	17.2	40.5	70.8	0.53	128
	Шт. 2П-7	50.3	9.3	18.1	3.6	19.3	41.2	82.5	0.59	186
	Шт. 17-1	44.4	9.3	16.5	3.0	15.6	40.9	78.2	0.51	191
	Шт. 18-5	52.5	11.2	16.8	3.0	21.4	36.5	76.1	0.63	185
Среднее (диазотрофы)		48.0	9.9	16.7	3.0	18.4	39.8	76.9	0.57	172
Среднее (фон)		48.4	10.2	16.5	3.0	18.7	41.2	79.4	0.59	188
<i>HCP</i> ₀₅		1.6	0.9	0.8	0.2	1.1	1.3	1.6	0.06	22

амилолитиков была несколько меньше, но все же близкая к контролю.

Дополнительное улучшение условий минерального питания растений за счет внесения комплексного удобрения способствовало повышению количества амилолитиков на 7.7%. Бактериальные препараты в сочетании с удобрениями стимулировали активность данной группы микроорганизмов практически в большинстве вариантов. Их содержание изменялось в пределах 16.5–18.1 млн КОЕ/г почвы. При этом в контроле численность бактерий амилолитиков отмечена на уровне 15.5 млн КОЕ/г почвы. Близкие к контролю показатели отмечены при инокуляции мизорином, активность амилолитиков составила 15.4 млн КОЕ/г почвы.

Почвенные актиномицеты относятся к группе микроорганизмов, являющимися хорошими деструкторами органического вещества, они так-

же способны продуцировать вещества со свойствами антибиотиков [12]. По данным нашего исследования, численность актиномицетов в почве зависела в значительной степени от инокуляции семян ассоциативными бактериями. При этом роль отдельных штаммов была неоднозначной. Мизорин, независимо от фона минерального питания, не способствовал увеличению численности актиномицетов. Можно отметить деструктивную роль этого штамма по влиянию на их активность.

На естественном фоне удобренности численность *Actinomycetales* в контрольном варианте составила 2.7 млн КОЕ/г почвы (табл. 1). Инокуляция Мизорином снижала количество актиномицетов до минимального уровня 2.3 млн КОЕ/г почвы. Предпосевная обработка семян остальными диазотрофными штаммами способствовала

повышению их активности до 2.8–2.9 млн КОЕ/г почвы.

Минеральные удобрения в чистом виде способствовали повышению численности актиномицетов. При комплексном их использовании с инокулянтами отмечен более существенный рост их активности — от 6.4 до 26%. Наиболее заметное увеличение было характерно при применении штамма 17-1.

К минерализаторам гумуса относятся микробные сообщества, участвующие в процессе разрушения гумусовых веществ. Их высокая активность может негативным образом сказываться на почвенной плодородии. В нашем исследовании ассоциативные азотфиксаторы оказывали неоднозначное влияние на процесс дегумификации. Часть штаммов повышала активность минерализаторов гумуса, другая, наоборот, снижала. На естественном фоне удобренности, где не применяли минеральные удобрения, при использовании штаммов 17-1 и Мизорина отмечено снижение численности минерализаторов гумуса на 23.1 и 6.5% соответственно (табл. 1). В остальных вариантах с инокулянтами было характерно некоторое повышение активности данных микроорганизмов относительно контроля. При использовании штаммов 2П-7 и 18-5 увеличение составило 9.5 и 15.1%.

Минеральное удобрение в чистом виде стимулировало рост (на 3.3 млн КОЕ/г почвы) содержания минерализаторов гумуса, что могло свидетельствовать о негативном влиянии удобрений на процесс его трансформации. В тех вариантах, где кроме внесения азофоски использовали бактеризацию семян ячменя, происходило снижение численности минерализаторов гумуса практически во всех вариантах (исключение — штамм 18-5). Показатели изменялись в пределах 15.6–19.3 млн КОЕ/г почвы. В контроле их количество отмечено на уровне 20.0 млн КОЕ/г почвы.

Почвенная грибная микрофлора составляет самую большую эколого-трофическую группу, участвующую в трансформации органических остатков растений и синтезе гумуса. Значительную роль в процессах гумусообразования имеют именно почвенные микроскопические грибы.

Количество почвенных грибов в нашем исследовании было подвержено влиянию как ассоциативных штаммов, так и минерального удобрения. Использование одних только инокулянтов, без припосевного внесения азофоски выявило их положительную роль в гумусообразовании. Отмечено существенное увеличение количества микровицетов под влиянием диазотрофных

штаммов. Содержание почвенных грибов варьировало в вариантах с инокулянтами в пределах 33.6–46.4 тыс. КОЕ/г почвы (табл. 1), в контроле их было заметно меньше — 27.2 тыс. КОЕ/г почвы.

На фоне внесения минерального удобрения отмечены более высокие показатели грибной биомассы. Применение минеральных удобрений стимулировало рост активности почвенных микровицетов. Максимальная их численность отмечена в варианте с использованием азофоски в чистом виде. В контроле (без инокулянтов) содержание микроскопических грибов было на уровне 47.0 тыс. КОЕ/г почвы. Комплексное использование минеральных удобрений и ассоциативных штаммов азотфиксаторов оказывало ингибирующее действие на активность микровицетов. Их численность в вариантах с инокулянтами менялась в пределах 36.5–41.2 тыс. КОЕ/г почвы. Как свидетельствовали результаты исследования, инокулянты совместно с удобрениями способствовали снижению количества грибной массы. Но все показатели при этом были более высокими, чем на неудобренном фоне.

Целлюлозоразрушающим бактериям в почве принадлежит значительная роль в разложении растительных остатков. Данные микроорганизмы представлены в почве в виде аэробных и анаэробных форм. Анализируя данные проведенного исследования по насыщенности почвы клетчатковыми бактериями, следует отметить, что наиболее высокий показатель их численности отмечен на фоне применения минеральных удобрений. Максимальное их количество отмечено в контроле без инокулянтов — 89.5 тыс. КОЕ/г почвы (табл. 1). Совместное использование ассоциативных бактерий и удобрений вызывало некоторое ингибирование активности целлюлозолитических микроорганизмов до 21%.

На естественном уровне удобренности отмечена схожая закономерность содержания клетчатковых микроорганизмов в прикорневой зоне почвы, но при меньших абсолютных показателях. Максимальное их содержание было характерно для контроля без инокулянтов — 75.3 тыс. КОЕ/г почвы. В остальных вариантах, где производили обработку семян ячменя бактериальными препаратами, происходило уменьшение их количества по отношению к контролю. Их численность изменялась в пределах 59.1–71.8 тыс. КОЕ/г почвы.

В процессе нитрификации происходит двухступенчатая трансформация аммиака до нитритов и нитратов. Этот процесс главным образом происходит при активном участии бактерий-нитрификаторов (*Nitrosomonas* и *Nitrobacter*) [13].

Оценка активности нитрификаторов в нашем исследовании показала неоднозначную роль штаммов диазотрофов, определяемую фоном минерального питания. На естественном не удобренном фоне отмечено увеличение численности бактерий-нитрификаторов при обработке семян большинством штаммов. При комплексном использовании предпосевной инокуляции семян ячменя и минерального удобрения было характерно уменьшение их количества.

На фоне без удобрений необходимо выделить применение Мизорина и штамма 2П-7, где под их влиянием отмечено повышение нитрификационной способности по отношению к контролю. В относительном выражении увеличение составило 19.6 и 9.8% (табл. 1). На фоне применения минерального удобрения ризобактерии вызывали снижение численности нитрификаторов. Если в контроле показатель был равен 0.70 тыс. КОЕ/г почвы, то в вариантах с диазотрофами он варьировал в интервале 0.51–0.63 тыс. КОЕ/г почвы.

Снижение нитрификационной способности под влиянием диазотрофных штаммов можно считать положительным фактором, т.к. происходило снижение потерь почвенного азота в процессах денитрификации, что позволяет более рационально использовать элементы питания и сохранять почвенное плодородие.

Общее фоновое содержание колоний азотобактера в почве в нашем опыте было довольно низким, что могло быть обусловлено значительным увлажнением и недостатком кислорода в отдельные годы исследования (2022 г.).

К азотобактеру относится вид свободноживущих бактерий *Azotobacter chroococcum*, обладающих способностью фиксировать молекулярный атмосферный азот. На фоне без применения минеральных удобрений отмечена неоднозначность воздействия ризобактерий на численность свободноживущих азотфиксаторов. Отдельно взятые штаммы инокулянтов (Мизорин и 2П-7) способствовали незначительному увеличению числа колоний азотобактера (до 5%). В остальных же вариантах ассоциативные штаммы вызывали только снижение численности азотобактерий, вне зависимости от фона минерального питания. На фоне N60P60K60 количество данных групп почвенной микробиоты варьировало в интервале 128–191 КОЕ/50 г почвы (при 253 КОЕ/50 г почвы в контроле).

Для более полной оценки направленности микробиологических процессов в почве произведен расчет коэффициента минерализации гумуса по Мишустину (соотношение МПА : КАА). Ко-

Таблица 2. Коэффициенты минерализации гумуса

Фон удобренности	Вариант	Коэффициент минерализации гумуса
Без удобрений	Контроль	0.64
	Мизорин	0.54
	Шт. 2П-7	0.49
	Шт. 17-1	0.63
	Шт. 18-5	0.46
N60P60K60	Контроль	0.75
	Мизорин	0.63
	Шт. 2П-7	0.52
	Шт. 17-1	0.57
	Шт. 18-5	0.67

эффициент минерализации гумуса отражает проходящие в почве процессы разложения гумуса на конечные продукты. Достаточно высокие коэффициенты минерализации могут свидетельствовать о повышении скорости распада гумусовых веществ.

Анализируя рассчитанные коэффициенты минерализации, можно судить о снижении распада гумуса под действием микробных биопрепаратов. На естественном фоне удобренности в контроле без инокулянтов коэффициент минерализации был равен 0.64 (табл. 2), в вариантах с биопрепаратами — существенно снижался и варьировал в интервале 0.46–0.54, т.е. отмечали уменьшение процесса минерализации гумуса до 28.1% по отношению к контролю. На фоне применения минеральных удобрений в дозе N60P60K60 отмечены более высокие коэффициенты минерализации, но при этом оставались характерные аналогичные закономерности снижения интенсивности минерализации под действием бактериальных штаммов. Минеральное удобрение в чистом виде несколько увеличивало (на 0.11) коэффициент по отношению к абсолютному контролю, и он был равен 0.75. При этом в тех вариантах, где применяли инокулянты, коэффициент варьировал в пределах 0.52–0.67.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование структуры микробного ценоза позволило отметить положительную роль ассоциативных диазотрофных штаммов в сохранении и стабилизации плодородия чернозема обыкновенного (сегрегационного) в посевах

ярового ячменя. Изменяя направленность микробиологических почвенных процессов, бактериальные биопрепараты позволили сохранять и воспроизводить почвенное плодородие. Предпосевная инокуляция семян ярового ячменя снижала риски непродуктивной потери почвенного азота и уменьшение скорости распада гумусовых веществ. Наиболее заметно было снижение деградационных процессов при комплексном использовании минеральных удобрений и ризобактерий.

Более высокая общая численность почвенных бактерий отмечена при внесении минеральных удобрений под посевы ярового ячменя. На естественном фоне минерального питания их количество отмечено в среднем на уровне 42,6, на фоне N60P60K60 – 48,4 млн КОЕ/г почвы.

Диазотрофные препараты снижали активность бактерий-амонификаторов, минерализаторов гумуса, целлюлозолитиков. Уменьшались потери гумуса в процессе дегумификации и азота в процессе денитрификации.

Применение ризобактерий увеличивало численность в почве актиномицетов на естественном фоне до 8,7, на удобренном – до 26,2%. Наибольшее развитие актиномицетов отмечено при применении штаммов 2П-7, 17-1 и 18-5.

Инокуляция ассоциативными штаммами повышала активность микромицетов. Наиболее существенный рост численности на фоне без удобрений отмечен при использовании препарата Мизорин (на 70,3%) и штамма 18-5 (на 50,2%). При комплексном применении минеральных удобрений и диазотрофов было характерно снижение активности почвенных грибов при применении всех штаммов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорова К.В. Сравнительная характеристика микробиологических свойств почв до и после внесения удобрений // Проблемы экологии Южного Урала: сб. мат.-лов X Всерос. научн.-практ. конф. с международ. участием, посвящ. 25-летию кафедры биологии и почвоведения, Оренбург, 20–21 октября 2021. Оренбург: Изд-во Оренбур. гос. ун-т, С. 223–225.
2. Чевердин Ю.И., Чевердин А.Ю., Сауткина М.Ю. Микробные препараты в посевах зерновых культур Центрального Черноземья: Монография. Каменная Степь: Изд-во Истоки, 2021. 278 с.
3. Щур А.В., Валько В.П., Валько О.В. Биологическая активность почвы как показатель эффективного плодородия при различных способах обработки почвы и видах удобрений // Издәністер, Нәтижелер. 2014. № 4. С. 195–203.
4. Багаутдинова Г.Г., Нурмухаметов Н.М., Киреева Н.А. Биологическая активность почв и продуктивность сахарной свеклы при обработке биопрепаратом // Вестн. Оренбур. гос. унта. 2009. № 6 (100). С. 540–542.
5. Леонова Ю.В., Спасская Т.А. Влияние нетрадиционных удобрений на микробиологическую активность дерново-подзолистой супесчаной почвы // Агропромышл. технол. центр. России. 2020. № 4 (18). С. 84–87.
<https://doi.org/10.24888/2541-7835-2020-18-84-87>
6. Мухина М.Т., Ламмас М.Е. Формирование микробиологической активности почвы под ячменем при обработке растений биостимулятором роста // Плодородие. 2022. № 5 (128). С. 91–94.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.128.23>
7. Божко А.А., Ползухина Н.А., Хамова О.Ф., Ползухин П.В., Сейтуарова А.Д., Шулико Н.Н., Паршутин Ю.Ю. Биологическая активность почвы ризосферы овса посевного (*Hordeum vulgare* L.) при инокуляции семян ассоциативными диазотрофами // Пробл. агрохим. и экол. 2019. № 2. С. 60–64. DOI: 10.26178/AE.2019.15.54.010
8. Ступина Л.А., Мосина А.С. Влияние карбоксиметилированных препаратов и ризоторфина на микробиологическую активность черноземов Приобской лесостепи и симбиотическую активность сои // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 3 (114). С. 84–89.
9. Чевердин А.Ю., Сауткина М.Ю., Чевердин Ю.И., Чевердина Г.В. Изменение микробиологической активности почвы под влиянием диазотрофных препаратов в посевах ярового ячменя // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования: II Международ. научн.-практ. интернет-конф., с. Солёное Займище, 28 февраля 2017 г., Прикаспийский НИИ аридного земледелия. Солёное Займище: Прикаспийский научн.-исслед. ин-т аридн. земледел., 2017. С. 1095–1097.
10. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
11. Воробьев Н.И., Свиридова О.В., Попов А.А. Граф-анализ гено-метаболических сетей почвенных микроорганизмов, трансформирующих растительные остатки в гумусовые вещества // Сел.-хоз. биол. 2011. Т. 46. № 3. С. 88–93.
12. Gomes R.C., Semedo L.T.A.S., Soares R.M.A. Chitinolytic actinomycetes from a Brazilian tropical soil active against phytopathogenic fungi // World J. Microbiol. Biotechnol. 2000. V. 16. № 1. P. 109–110.
13. Фаизова В.И., Цховребов В.С. Влияние сельскохозяйственных культур на численность нитрификаторов // Эволюция и деградация почвенного покрова: Сб. научн. ст. по мат.-лам IV Международ. научн. конф., Ставрополь, 13–15 октября 2015 г. Ставрополь: Изд-во АГРУС, 2015. С. 430–436.

Effect of Bacterial Fertilizers on the Microbiological Activity of Segregated Chernozem in Spring Barley Crops

A. Y. Cheverdin^{a, #}, Yu. I. Cheverdin^a, and M. Y. Sautkina^b

^a*Voronezh Federal Agricultural Scientific Centre named after V.V. Dokuchaev
POS 2 division of the Dokuchaev Institute, quart. 5, 81, Voronezh region, Talovsky district 397463, Russia*

^b*All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology
ul. Lomonosova 105, Voronezh 394087, Russia*

[#]*E-mail: cheverdin@bk.ru*

In the field experiment, in the Voronezh region on the territory of the Voronezh FASC, changes in the microbiological activity of the soil under the influence of bacterial associative biological products and mineral fertilizers during 2021–2022 were studied. Microbial strains were used for pre-sowing seed treatment. The soil of the experimental site is ordinary (segregational) medium–humus heavy loamy chernozem. The availability of available forms of batteries is medium and high. The barley variety is Talovsky 9. The cultivation technology is generally accepted in the zone. The preservation of soil fertility and its rational use due to changes in the direction of microbiological processes in the soil with the use of diazotrophs has been established. Associative preparations slowed down the processes of mineralization of humic substances. The number of bacteria associated with the destruction of organic matter decreased. With the complex use of mineral fertilizers with rhizobacteria, the number of nitrifiers responsible for denitrification processes and losses of soil nitrogen significantly decreased. A significant increase in the natural background of fertilization of the number of soil fungal microflora under the influence of diazotrophs was noted.

Keywords: biological products, fertility, microbiology, soil microorganisms, fertilizers, spring barley, chernozem.

УДК 631.81:632.95.591.2

ЧЕМЕРИЦА ЛОБЕЛЯ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ БИОПРОДУЦЕНТ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БИОЦИДНОГО ПРЕПАРАТА В ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ ОТ ВРЕДНЫХ ЧЛЕНИСТОНОГИХ

© 2023 г. Т. А. Рябчинская^{1,*}, Л. Л. Яковлева¹, И. Ю. Бобрешова¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, п. ВНИИСС, 92, Россия

*E-mail: biometod@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2023 г.

После доработки 27.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Приведены результаты трехлетних исследований по разработке биологического биоцидного препарата для борьбы с вредными членистоногими на основе этаноловых экстрактов биологически активных веществ чемерицы Лобеля. Проведена апробация первых опытных образцов препарата на ряде видов членистоногих фитофагов. В лабораторных экспериментах определены наиболее эффективные и перспективные для дальнейших исследований образцы препарата. Установлено, что их биологическая эффективность зависит от технологии изготовления препаратов, содержания действующей композиции веществ, концентрации рабочего раствора и видовой принадлежности фитофагов. Отдельные образцы по эффективности были сравнимы с традиционными инсектицидами из группы авермектинов.

Ключевые слова: чемерица Лобеля, биологически активные вещества, биоцидный препарат, защита растений, вредные членистоногие.

DOI: 10.31857/S000218812311011X, **EDN:** PVFIKL

ВВЕДЕНИЕ

Усиливающийся во всем мире интерес к биологизированным системам защиты растений от вредных членистоногих побуждает исследователей к разработке новых экологически щадящих или безопасных приемов и средств борьбы с использованием природных материалов. В ассортименте биологических инсектоакарицидов имеется очень небольшое количество разрешенных к применению экологичных препаратов, в основном на основе микробных организмов, в частности, различных штаммов бактерии *Bacillus thuringiensis*, var. *kurstaki* (спорово-кристаллический комплекс), а также энтомопатогенного гриба *Beauveria bassiana* и некоторых других видов (*Lecanicillium lecanii*, *Metarhizium anisopliae*). Хорошо зарекомендовали себя также препараты на основе продуктов жизнедеятельности особой группы бактерий (актиномицета *Streptomyces avermitili*) – антибиотиков аверсектин С и абамектин. И несмотря на то, что издавна известны инсектицидные свойства многих высших растений, отвары и настои которых широко используют в народной

практике защиты растений, биопрепараты из растительных токсикантов не разрабатывались, если не считать группу пиретроидов – синтетических химических инсектицидов на основе токсичного вещества пиретрина, выделенного из долматской ромашки. Наибольший интерес исследователей вызывали представители хвойных пород, инсектицидные свойства которых связаны в основном с терпеноидными алкалоидами [1].

В институте защиты растений уже в течение нескольких лет проводят работу над созданием биоцидного препарата на основе экстрактов инсектицидных растений. При этом задача выделения отдельных действующих веществ не ставилась, а цель исследования состояла в разработке средства борьбы с вредными членистоногими, изготавливаемого из сухого растительного биоматериала. Основной задачей настоящего исследования было испытание более 30 образцов экстрактов и препаративных форм, разработанных в основном на основе этаноловых экстрактов биологически активных веществ чемерицы Лобеля.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Растительный материал использовали в сухом виде после естественного высушивания в помещении или при 30° в термостате. Измельчение растений до пылевидного состояния проводили в лабораторной электрической мельнице.

В 2020–2021 гг. были проведены рекогносцировочные исследования по установлению инсектоакарицидной активности этаноловых экстрактов чемерицы Лобеля и отдельных смесей его с другими растениями, в 2022 г. – испытание различных образцов препарата на основе данного растения.

Варианты апробированных образцов препаратов на основе разных растений отличались содержанием экстрагируемого действующего начала, технологией извлечения токсикантов, наличием консервирующих веществ.

При проведении испытаний в качестве тест-объектов использовали следующие виды тлей: гелихризовая – *Brachycaudus helichrysi* Kalt., капустная – *Brevicoryne brassicae* L., кизиловая – *Anoecia corni* F., зеленая розанная – *Macrosiphum rosae* L. Из сосущих вредителей хорошим тест-объектом проявил себя обыкновенный паутинный клещ – *Tetranychus urticae* C.L. Koch. Из листогрызущих вредных насекомых испытания проводили только на личинках колорадского жука – *Leptinotarsa decemlineata* Say. Насекомых и клещей для лабораторных экспериментов собирали в природных станциях на разных видах культурных и сорных растений при условии достижения ими достаточно высокой плотности популяции. Постановку опытов в лаборатории осуществляли по мере появления в природе того или иного вида членистоногих в уязвимой фазе развития. В состав препаративных форм инсектицидного препарата вводили компонент, представляющий собой поверхностно активное вещество, и при необходимости – консервант.

Оценку инсектицидного действия образцов экстрактов проводили в лабораторных условиях в чашках Петри по общепринятым методикам выявления инсектоакарицидного и других типов воздействия химических соединений на членистоногих [2]. Обработку тест-объектов и частей растений (листья, веточки, соцветия) проводили микропульверизатором объемом 10 мл. На тлях и клещах эксперимент продолжали в течение 1–3 сут, пока части растений сохраняли в чашках Петри нормальное физиологическое состояние. Дно чашек выстилали фильтровальной бумагой и ежедневно смачивали водой. Количество тест-объектов в одной повторности – ≥50 экз. При работе с

личинками колорадского жука 1–3-го возрастов – 10 экз. Повторность вариантов четырех-пятикратная. Контроль – обработка водой. В отдельных опытах в качестве эталонов использовали известные инсектицидные препараты группы авермектинов: Вертимек КЭ и Фитоверм КЭ. Биологическую эффективность образца определяли по гибели из 50–100 учетных особей в каждой повторности с учетом естественной смертности особей в контроле по формуле:

$$C = \frac{A - B}{100 - B} \times 100\%,$$

где C – биологическая эффективность, %; A – гибель насекомых в опыте, %; B – гибель насекомых в контроле, % [3].

Статистическую обработку полученных данных проводили методом дисперсионного анализа с использованием специальной программы компьютерного обеспечения.

При анализе того или иного образца экстракта или препарата в качестве инсектицидного средства по результатам экспериментов учитывали степень варибельности достижения биологической эффективности, поскольку последняя находится в существенной зависимости от многих факторов (вид тест-объекта и кормового растения), но в самой большей степени – от нормы применения препарата или концентрации рабочего раствора, которые и определяют результат. Анализируя данные проведенных опытов, приняли за удовлетворительную биоцидную активность препаративной формы показатель воспроизводимости, который определяли как долю экспериментов с результатом биологической эффективности >60%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди более чем 30 видов изученных растений, произрастающих на территории европейской части России, наиболее сильные инсектицидные свойства проявились у борщевика Сосновского и чемерицы Лобеля (*Veratrum lobelianum* Bernh., сем. Мелантиевые – Melanthiaceae). Чемерица – многолетнее (до 80-ти лет жизни) корневищно-луковичное травянистое растение, которое отличается светолюбием и холодостойкостью, предпочитает увлажненные почвы, произрастает преимущественно на пастбищах, на сырых лугах и лесных полянах, в поймах рек. Высота растения достигает 180 см, имеет характерную складчатость листьев с замкнутыми влагалищными основаниями. У нецветущих растений листовые влагалища плотно вложены одно в другое,

образуя ложный стебель. До первого цветения, которое может наступить через 10 и более лет с момента прорастания семени, растение существует в виде моноподиальных побегов 1-го порядка. Массовое цветение этого вида отмечено с интервалами в 2–5 лет. В зависимости от возрастного состояния масса корневища и глубина его залегания в почве существенно различаются [4, 5].

Все органы растения содержат алкалоиды, которых в корнях накапливается до 2.4, в корневищах — до 1.3% [6, 7]. Алкалоиды чемерицы являются азотсодержащими стероидными соединениями, к которым относятся: иервератровые алкалоиды — иервин, изоиервин, изорубиервин, вератрамин; цевератровые алкалоиды — протоверин и протовератрины *A* и *B*. Вследствие высокого содержания алкалоидов, чемерица Лобеля ядовита, но является ценным лекарственным растением, применяемым в народной медицине с глубокой древности. Для изготовления лекарственных препаратов в борьбе с эктопаразитами человека и животных используют корневища с корнями [8, 9].

В 2020 г. при испытании большого количества этаноловых экстрактов различных растений (содержание сырой растительной массы — 10–20% при экстрагировании 40-, 70- и 96%-ным этиловым спиртом) была установлена их невысокая инсектицидная активность по отношению к использованным тест-объектам (личинкам колорадского жука и разным видам тлей), которая не превышала 40–50% при высоких концентрациях рабочего раствора (до 10–30%). Среди вариантов опытов была апробирована аптечная настойка чемерицы Лобеля или чемеричная вода, которая также обладала низкой эффективностью. Это позволило предположить, что концентрация действующих токсичных веществ в образцах экстрактов была явно недостаточной для получения желаемого эффекта. Для того чтобы повысить их токсичность, была предпринята попытка постепенного выпаривания спиртовой фракции при температуре 40–45°. Чемеричная вода была упарена в 6 раз, и при концентрации рабочего раствора 4–5% была достигнута смертность личинок колорадского жука до 100%. Аналогичный эффект не был получен ни в одном из используемых вариантов с экстрактами разных видов растений. На грушево-зонтичной тле биологическая эффективность его составила 63.2% (при концентрации рабочего раствора 3%), а на кизиловой тле — 73.9%. Таким образом, была доказана перспективность чемерицы Лобеля в качестве биопродукта инсектицидных веществ.

Дальнейшая работа в 2021 г. была продолжена с натуральным этаноловым экстрактом из высушенных измельченных корней данного растения.

При экстрагировании действующих веществ содержание сухого материала составляло 30–40%. Дополнительное концентрирование достигалось выпариванием жидкой фракции до 10 крат. Однако такое концентрирование токсикантов не вызвало увеличение инсектицидной активности полученных образцов. Это явление могло быть связано с включением определенных защитных механизмов насекомых при действии токсичными веществами (антифидантный и репеллентный эффекты). Дальнейшие исследования позволили определить оптимальное содержание растительного материала при экстрагировании, которое не превышало 20%. При этом для экстракции наиболее предпочтительно использование этанола 70%-ной концентрации.

В 2022 г. работа была направлена на отработку оптимального состава экстрактов на основе чемерицы Лобеля и технологии их получения. Ниже приведены результаты испытаний различных образцов экстрактов в лабораторных условиях на разных тест-объектах.

Очень удобным биологическим объектом для оценки биологической эффективности образцов препарата являлся обыкновенный паутинный клещ. В табл. 1 представлены результаты оценки акарицидного действия опытных образцов в сравнении с известным инсектоакарицидом авермектиновой группы — Вертимек, КЭ.

В серии опытов участвовал также экстракт трав, основу которого (70%) составляла чемерица. Другие растительные компоненты представляли собой биоматериал видов с наиболее высокой инсектицидной активностью. Испытание такой смеси было обусловлено целью снижения содержания в препарате доли чемерицы, поскольку ее биоматериал технологически более сложен как при получении сырья, так и его переработке. По результатам опыта 1, было выяснено, что наиболее эффективным экстрагентом токсичных веществ чемерицы являлся 70%-ный этанол, биологическая эффективность данного экстракта была существенно больше, чем при экстрагировании токсикантов более концентрированным этанолом. При этом для получения исходного экстракта отпадала необходимость высокой концентрации биоматериала, достаточно высокую эффективность имел экстракт с 20%-ным содержанием сухой растительной массы (табл. 1).

В 3-х последующих экспериментах оценили акарицидную активность смесового экстракта 4-х видов растений с преобладанием чемерицы. В опыте 2 было апробировано 3 концентрации рабочего раствора — 1, 2 и 3%. Во всех вариантах использования

Таблица 1. Акарицидное действие образцов экстрактов на основе чемерицы Лобеля (тест-объект – обыкновенный паутинный клещ)

Растение-биопродуцент	Образец	Концентрация этанола	Доля биомассы	Концентрация рабочего раствора	Смертность	Биологическая эффективность	HCP ₀₅
		%					
Вода	—	—	—	—	32.1	—	8.1
Вертимек (эталон)	—	—	—	1.0	100	100	
Чемерица	17	96	30	1.0	100	100	
	90	96	20	1.0	93.9	91.0	
	91	70	20	1.0	100	100	
Вода	—	—	—	—	27.5	—	7.7
Вертимек (эталон)	—	—	—	1.0	100	100	
Смесь трав*	96	70	20	1.0	75.3	65.9	
				2.0	68.9	57.1	
				3.0	86.2	81.0	
Вода	—	—	—	—	14.3	—	7.2
Вертимек (эталон)	—	—	—	1.0	100	100	
Смесь трав*	96	70	20	1.0	89.3	87.5	
				2.0	90.9	89.3	
				3.0	93.3	92.2	
Вода	вода	—	—	—	5.5	—	8.0
Вертимек (эталон)	—	—	—	1.0	72.5	70.9	
Смесь трав*	96	70	20	1.0	96.0	95.8	
				2.0	88.7	88.0	
				1.0	98.0	97.9	

*Чемерица, тысячелистник, полынь горькая, чистотел (7 : 1 : 1 : 1). То же в табл. 2–7.

дозировок биологическая эффективность существенно (на 19–43%) уступала эталону при максимальной эффективности (81.0%) при применении самой высокой концентрации раствора.

В опыте 3 данной серии были использованы аналогичные варианты исследованных экстрактов, однако обыкновенный паутинный клещ питался на другом растении-хозяине. В данном случае проявилась аналогичная тенденция к повышению биологической эффективности смесового экстракта, однако различия в эффективности данных вариантов были статистически несущественными при достаточно высоком защитном эффекте (88–92%). Можно предположить, что в формировании устойчивости членистоногих к различным средствам защиты вполне могут играть определенную роль элементы кормового растения. В следующем опыте 4 эффективность действия смесового экстракта в 2-х рабочих концентрациях (1 и 2%) была на уровне действия препарата Вертимек, экстракт чистой чемерицы по-

казал сходное защитное действие со смесовым экстрактом в одинаковой концентрации.

При испытании смесового экстракта на розанной тле, эффективность его была значительно меньше, чем Вертимека, и снижалась с повышением концентрации рабочего раствора в 1.5–2.0 раза. В данном случае устойчивость к испытываемому экстракту была обусловлена видовыми особенностями фитофага (табл. 2).

Кизилевая тля последней генерации в высокой численности развивалась в позднелетний период на декоративном дереве (сем. Кизилевые). В серии опытов была проведена дополнительная проверка эффективности экстрактов различной технологии приготовления и концентрации рабочего раствора (табл. 3). В опыте 1 сравнили биологическую эффективность исходных экстрактов без их концентрирования упариванием. Экстракт чистой чемерицы существенно (более чем на 11%) уступал по эффективности эталонному препарату Фитоверм, а смесовой экстракт показал высокую эффективность, сравнимую в концентрациях рабо-

Таблица 2. Эффективность образцов на основе исходных экстрактов против розанной тли на розах при различных концентрациях рабочего раствора

Биопродуцент (образец)	Образец	Концентрация этанола, %	Содержание биомассы при экстрагировании, %	Концентрация рабочего раствора, %	Смертность, %	Биологическая эффективность, %
Вода	—	—	—	—	3.3	—
Вертимек	—	—	—	1.0	93.5	93.5
Смесь трав*	96	70	20	1.0	61.4	60.1
				2.0	43.4	41.5
				3.0	33.3	31.0

Таблица 3. Эффективность образцов экстрактов на кизиловой тле в зависимости от концентрации действующих веществ и экстракта рабочего раствора

Биопродуцент	Образец	Коэффициент упаривания	Концентрация рабочего раствора, %	Смертность, %	Биологическая эффективность, %	НСР ₀₅ %
Вода+	—	—	—	14.9	—	6.9
Фитоверм (эталон)	—	—	1.0	99.2	99.1	
Чемерица	91	—	1.0	88.1	86.0	
Смесь трав *	96	—	1.0	83.2	80.2	
		—	2.0	98.8	98.6	
		—	3.0	95.0	94.1	
Вода	—	—	—	26.5	—	7.2
Вертимек (эталон)	—	—	1.0	100	100	
Смесь трав	96	2	1.0	80.3	73.2	
			2.0	90.9	90.9	
		3	1.0	65.9	65.9	
			2.0	78.5	78.5	
Чемерица	91	2	1.0	97.4	97.4	
			2.0	96.4	96.4	
Вода	—	—	—	11.4	—	8.3
Вертимек (эталон)	—	—	1.0	71.8	71.8	
Смесь трав	96	2	1.0	89.8	89.8	
			2.0	91.5	90.7	
Чемерица	91	2	1.0	85.5	84.0	
		—	1.0	66.3	62.0	

чего раствора 2 и 3% с защитным эффектом эталона.

При концентрировании действующих веществ экстрактов чистой чемерицы способом упаривания в 2 раза в опыте 2 их эффективность повысилась до уровня эталона в аналогичной концентрации (1%), смесевой экстракт показал аналогичную эффективность только при повышенной концентрации рабочего раствора (2%). Более сильное концентрирование экстракта упариванием (в 3 раза) суще-

ственно снижало его защитное действие по сравнению с другими вариантами. В опыте 3 данные варианты были апробированы повторно. Подтвердилось более активное инсектицидное действие экстракта чемерицы при 2-кратном упаривании, которое существенно превысило эффективность исходного экстракта (на 19%) и эталона. Примерно на этом же уровне и больше эталона проявился защитный эффект смесевых образцов в концентрациях рабочего раствора 1 и

Таблица 4. Эффективность образцов экстрактов против капустной тли в зависимости от концентрации рабочего раствора

Биопродуцент	Образец	Коэффициент упаривания	Концентрация рабочего раствора, %	Смертность, %	Биологическая эффективность, %	НСР ₀₅ %
Вода	—	—	—	9.1	—	6.1
Вертимек (эталон)	—	—	1.0	93.5	92.9	
Смесь трав *	96	2	1.0	86.8	85.4	
			2.0	96.9	96.6	
Чемерица	91	—	1.0	97.9	97.7	7.2
		—	2.0	92.7	92.0	
Вода	—	—	—	31.9	—	
Вертимек (эталон)	—	—	1.0	100	100	
Смесь трав	96	3	1.0	56.7	52.4	
		2	1.0	86.6	85.2	
Чемерица	91	—	1.0	93.8	93.2	
		—	2.0	81.7	79.9	
		2	1.0	85.7	84.2	

2% (табл. 3). Таким образом, было установлено, что определенное (не более чем в 2 раза) упаривание исходного экстракта может существенно повышать его эффективность.

Два эксперимента с аналогичными опытными вариантами были проведены в осенний период на капустной тле (табл. 4). На данном тест-объекте эффективность как концентрированного упариванием в 2 раза экстракта чистой чемерицы, так и исходного, варьировала от 80 до 98%, что в принципе сравнимо с инсектицидным эффектом эталонных вариантов, причем достаточной для достижения высокого эффекта была технологически оптимальная концентрация 1%, как и у эталона — препарата Вертимек. Что касается смесового экстракта, то двукратное упаривание и повышение концентрации рабочего раствора до 2% повышало эффективность действия его в отдельных случаях до уровня эталона, но стабильность результата не всегда была подтверждена.

Таким образом, результаты исследования в 2021 г. показали достаточно высокую инсектоакрицидную активность экстракта чемерицы Лобеля и ее смеси с другими травами, но целесообразность продолжения разработки второго не подтвердилась, поскольку расход сырья при получении более концентрированного препарата будет почти в 2 раза больше, чем при использовании исходного экстракта. Тем не менее, поиск других вариантов смесевых экстрактов был продолжен в 2022 г. при использовании сухого растительного материала при более тонком его измельчении. Было испытано

12 вариантов различных образцов препаративных форм с включением поверхностно-активного вещества и консерванта, необходимых для повышения прилипаемости к обрабатываемой поверхности и стабильности биопрепарата. Приведены результаты лабораторных испытаний образцов, показавших биологическую эффективность на различных тест-объектах $\geq 60\%$ (табл. 5–7).

Среди группы тлей, служивших в качестве тест-объектов, наиболее значимые результаты были получены для 2-х видов: гелихризовой и кизиловой тлей (табл. 5). Поскольку технологически и экономически наиболее приемлемой концентрацией рабочего раствора в борьбе с вредными членистоногими является 1%, более высокие дозировки при испытаниях не рассматривали в качестве перспективных. Был апробирован ряд образцов препарата как на основе однокомпонентного экстракта чемерицы, так и 2–4-компонентного (по видам используемых растений). В опыте 1 на гелихризовой тле со сливы, 4-компонентный образец 2С показал существенно более высокую биологическую эффективность по сравнению со смесевой композицией экстракта чемерицы и борщевика, хотя и уступал по эффективности эталону Вертимек.

В следующих двух опытах образцы были испытаны также в более низкой концентрации рабочего раствора (0.5%). Влияние снижения концентрации рабочего раствора на эффективность образцов препарата в опытах проявлялось неоднозначно.

Таблица 5. Эффективность различных образцов препаративных форм по отношению к различным видам тлей

Тест-объект, вид тли	Образец	Растения- биопродукенты	Концентрация рабочего раствора	Смертность	Биологическая эффективность	<i>HCP</i> ₀₅
			%			
Гелихризовая (на сливе)	Вода	—		31.6	—	5.2
	Вертимек (эталон)	—	1.0	99.1	98.7	
	2C	Смесь трав*	1.0	88.3	82.9	
	8C	Чемерица + + борщевик	1.0	78.3	68.3	
Кизиловая (на дерене декоративном)	Вода	—	—	5.8	—	7.4
	2C	Смесь трав	0.5	88.9	88.2	
			1.0	76.0	74.5	
	4C	Чемерица + + бархатцы	0.5	81.6	80.5	
			1.0	7.1	77.8	
	6C	Чемерица + + борщевик	0.5	73.8	72.2	
			1.0	46.4	43.1	
	7C	Чемерица + + бархатцы	0.5	57.7	55.1	
			1.0	73.5	71.9	
	8C	Чемерица + + борщевик	0.5	84.6	83.7	
		1.0	90.9	90.3		
Кизиловая (на дерене декоративном)	Вода	—	—	3.0	—	5.8
	1C	Смесь трав	0.5	93.8	93.5	
			1.0	57.7	56.3	
	3C	Чемерица + + бархатцы	0.5	75.4	74.6	
			1.0	27.5	25.1	
	5C	Чемерица + + борщевик	0.5	45.5	43.7	
			1.0	93.8	93.5	
	1Ч	Чемерица	0.5	81.0	80.4	
		1.0	70.3	69.3		

Логичный вывод, который можно было сделать при проведении экспериментов, состоял в том, что с повышением концентрации токсичной смеси смертность особей и биологическая эффективность препарата должны увеличиваться. Однако, как видно из представленных в табл. 5 данных, изменение концентрации рабочего раствора в 2-х случаях не повлияло на эффективность препарата, в 2-х случаях она увеличилась с повышением дозировки и в 5-ти случаях существенно снижалась. Естественно, что такой результат может быть связан с различным составом токсикантов в образцах, а также механизмами их действия, которые отмечены нами в опытах и ранее, но пока эти факторы остаются неизученными. При этом на эффективность биоинсектицидов оказывали свое действие и биологические

особенности целевых объектов, что важно, в частности, при разработке препарата для такой группы вредных объектов как тли. Определение оптимальной нормы применения препаратов будет проводиться после окончательного выбора наиболее эффективного образца. Пока можно констатировать, что испытанные препаративные формы биоинсектицидов обладают высокой эффективностью, превышающей 80%, которая приближается к эффектам действия химических инсектицидов.

По результатам испытаний 13 изготовленных образцов с включением чемерицы Лобеля, для дальнейших исследований заслуживают внимание 3 препаративных формы: 1C и 2C (на основе смеси 4-х трав), воспроизводимость результатов действия которых наиболее высока, а также 8C

Таблица 6. Инсектицидная активность образцов препаративных форм на основе чемерицы Лобеля для личинок колорадского жука

Образец	Биопродуценты активных веществ	Концентрация рабочего раствора	Смертность	Биологическая эффективность	<i>HCP</i> ₀₅
		%			
Вода	—	—	23.3	—	5.3
Вертимек (эталон)	—	—	98.6	98.2	
1 <i>Ч</i>	Чемерица	0.5	66.7	56.5	
		1	36.7	17.4	
		2	77.5	67.9	
2 <i>Ч</i>	Чемерица	3	86.7	82.6	
		0.5	76.7	69.6	
		1	86.7	82.6	
3 <i>Ч</i>	Чемерица	2	85.0	78.6	
		3	66.7	56.5	
		0.5	68.8	54.6	
4 <i>Ч</i>	Чемерица	1	70.0	57.1	
		2	52.5	32.1	
		1	77.5	67.9	
8 <i>С</i>	Чемерица + + борщевик	2	60.0	42.9	
		0.5	83.3	78.3	
		1	93.3	91.3	

(чемерица Лобеля + борщевик Сосновского), с наибольшей максимальной и средней эффективностью. Большинство образцов по отношению к группе тлей показали более высокую эффективность, чем препаративная форма на основе одного биопродуцента чемерицы – 1Ч (рис. 1).

Еще один достаточно сложный тест-объект для испытания биоинсектицидов – колорадский жук, борьба с которым осуществляется на стадии личинок младших возрастов. Этот опасный вредитель картофеля в течение многих лет подвергается сильному воздействию химических инсекти-

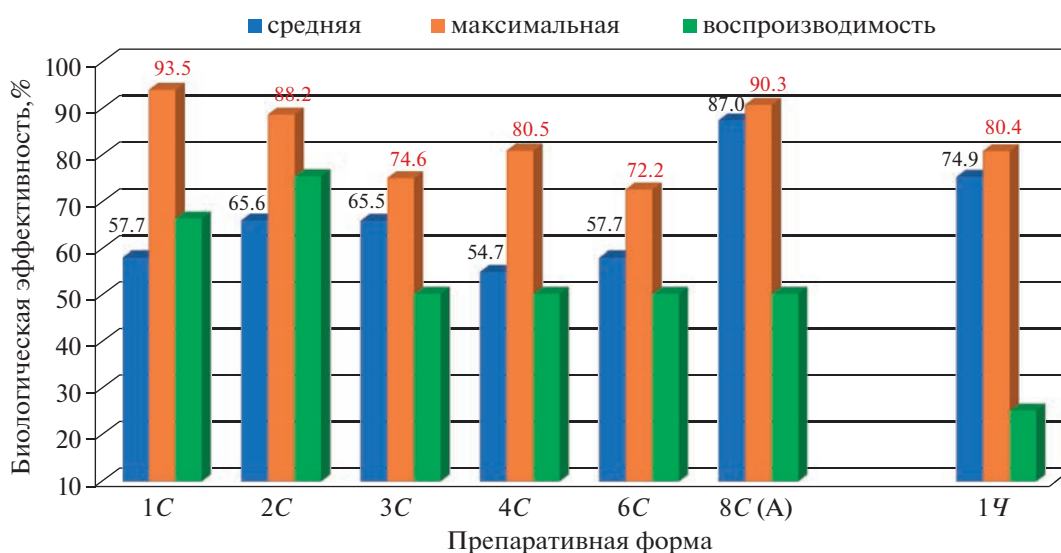
**Рис. 1.** Биологическая эффективность образцов препарата на основе смесевых экстрактов чемерицы Лобеля по отношению к группе тлей.

Таблица 7. Акарицидная активность образцов препаративных форм на основе чемерицы Лобеля и смесей трав по отношению к обыкновенному паутинному клещу

Образец	Растения- биопродуценты активных веществ	Концентрация рабочего раствора	Смертность	Биологическая эффективность	<i>HCP</i> ₀₅
			%		
Вода		—	3.08	—	5.8
Вертимек (эталон)		1.0	88.0	87.7	
1С	Смесь трав*	1.0	61.0	59.8	
2С	Смесь трав	1.0	64.3	63.3	
3С	Чемерица + бархатцы	1.0	69.6	68.7	
Вода	—	—	11.8	—	5.4
Вертимек (эталон)	—	1.0	98.3	98.1	
1С	Смесь трав	1.0	74.4	71.0	
2С	Смесь трав	1.0	70.6	66.7	
4С	Чемерица + бархатцы	1.0	95.4	94.8	
Вода	—	—	18.0		4.8
Вертимек (эталон)	—	—	100	100	
4С	Чемерица + бархатцы	0.5	98.1	97.7	
		1.0	61.0	52.4	
7С	Чемерица + бархатцы	0.5	95.4	94.4	
		1.0	85.7	82.6	7.0
Вода	—	—	15.6		
Вертимек (эталон)	—	—	100	100	
7С	Чемерица + бархатцы	0.5	58.9	51.3	
		1.0	57.8	50.0	
		2.0	85.1	82.3	
2Ч	Чемерица	0.5	56.6	48.6	
		1.0	74.0	69.2	
		2.0	22.7	8.4	

цидов, в результате чего популяции данного вида выработали устойчивость ко многим группам пестицидов, в том числе и перекрестную, определяющую общую резистентность к разным токсикантам [10].

В первых опытах, учитывая высокую резистентность вредителя к пестицидам, испытали образцы при высокой концентрации рабочего раствора (2–5%), хотя данные дозировки существенно превышали технологически оптимальную норму применения (1%). Наибольшую эффективность показали образцы 1Ч и 2Ч на основе чистой чемерицы (при высоком содержании сухого вещества во время экстрагирования) в самой высокой концентрации раствора 5% (соответственно 87.5 и 60.2%). Далее была предпринята попытка снижения концентрации рабочего раствора, учитывая прецедент испытаний на группах. Снижение концентрации рабочего раствора

до 1% при использовании нескольких образцов (2Ч и 8С) позволило получить относительно высокую эффективность (83–91%), хотя и существенно уступающую токсическому действию эталона Вертимек (табл. 6).

Обобщая результаты испытаний 13 образцов на основе чемерицы и ее смесей с другими травами, можно констатировать, что 3 из них (1Ч, 2Ч и 8С) с учетом полученных данных можно использовать в дальнейших исследованиях по разработке биопрепарата (рис. 2).

Акарицидную активность образцов препарата на основе чемерицы оценили на обыкновенном паутинном клеще. В табл. 7 представлены результаты, полученные в ряде экспериментов. В таблицу включены варианты с эффективностью на уровне $\geq 60\%$.

Образцы препарата на основе четырехкомпонентной смеси против паутинного клеща оказа-

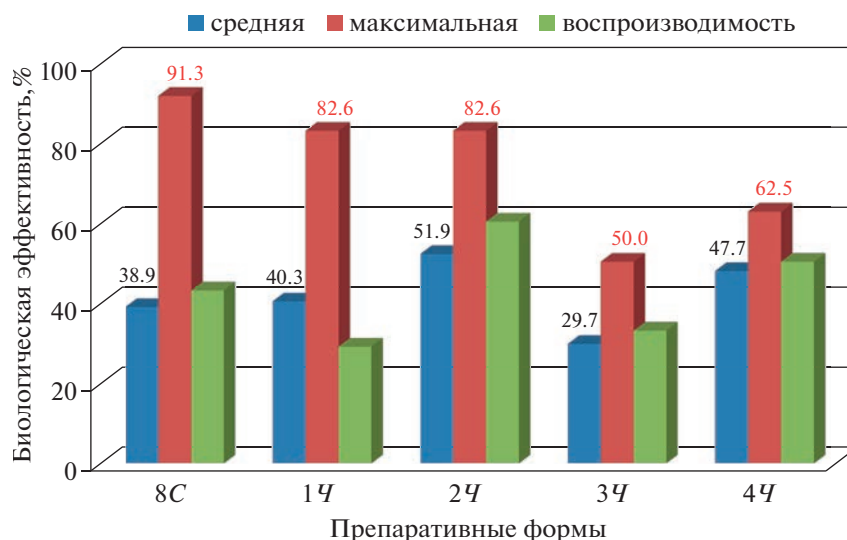


Рис. 2. Инсектицидное действие образцов препарата на основе смесевых экстрактов чемерицы Лобеля по отношению к колорадскому жуку.

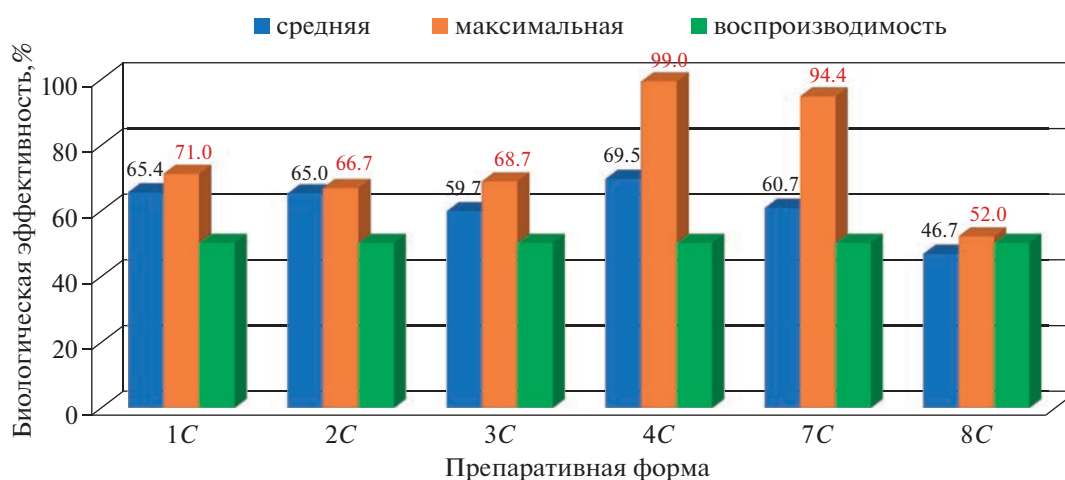


Рис. 3. Акарицидное действие образцов препарата на основе смесевых экстрактов чемерицы Лобеля по отношению к обыкновенному паутинному клещу.

лись менее эффективными, чем против группы тлей, в двух опытах они существенно уступали эталону Вертимек. Однако двухкомпонентный экстракт трав (бархатцы и чемерица) в образце 4C (опыты 2 и 3) показали эффективность на уровне эталона при концентрациях рабочего раствора 0.5 и 1.0%, хотя воспроизводимость результата в опытах варьировала.

Достаточно высокая биологическая эффективность (до 94.4%) была достигнута и при обработке образцом 7C в отдельных вариантах. Смесевые образцы на основе чемерицы и борщевика при испытаниях не показали существенной перспективности. По результатам проведенных экс-

периментов предполагаем продолжить исследования 2-х образцов 4C и 7C на основе экстрактов смеси чемерицы и бархатцев мелкоцветных (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате трехлетних исследований, после анализа инсектоакарицидных свойств ≈ 30 видов растений было установлено, что одним из самых перспективных для разработки биоцидного препарата на основе природных биологически активных веществ является чемерица Лобеля. При апробировании ≈ 30 -ти вариантов препаративных форм, изготовленных на основе этаноловых и

гидроглицериновых экстрактов, для дальнейших исследований было отобрано несколько опытных образцов. Установлено, что наиболее эффективные опытные образцы препарата обладали разной степенью токсичности для отдельных групп членистоногих. Например, для группы тлей для дальнейших исследований были отобраны варианты препаративных форм на основе этаноловых экстрактов из 2–4-компонентных смесей трав (тысячелистника, полыни горькой, чистотела большого) с включением чемерицы Лобеля при ее содержании в сухом биоматериале от 50 до 70% (образцы 1С, 2С и 8С). Их биологическая эффективность была сравнима с эффектами действия инсектицида Вертимек КЭ авермектиновой группы. На колорадском жуке более эффективными показали себя образцы с использованием чистой чемерицы 1Ч и 2Ч, а также на основе смесового экстракта чемерицы и борщевика Сосновского – образец 8С. Наиболее эффективные акарицидные свойства отмечены у образцов 4С и 7С на основе биологически активных веществ двухкомпонентной смеси: чемерицы и бархатцев мелкоцветных при биологической эффективности на уровне 90%. Исследования по разработке биоцидов на основе чемерицы Лобеля, а также борщевика Сосновского будут продолжены с доработкой наиболее эффективных опытных образцов и технологических регламентов их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнова И.М., Миронов В.Г. Применение хвойных препаратов для защиты яблони от вредителей // Защита растений в условиях реформирования агропромышленного комплекса: экономика, эффективность, экологичность: тез. докл. Всерос. съезда по защите раст. Декабрь, 1995 г. С.-Петербург. СПб., 1995. С. 459–460.
2. Выявление инсектоакарицидного, рострегулирующего и других типов воздействия химических соединений на членистоногих. Метод. рекоменд. / Под ред. Кукуленко С.С., Андреева Е.И. Черкассы, 1982. 62 с.
3. Коваленков В.Г., Тюрина Н.М. Методические рекомендации по мониторингу чувствительности фито- и энтомофагов к применяемым инсектицидам. М., 2002. 32 с.
4. Гаммерман А.Ф., Гусынин И.А., Ильин М.М. Ядовитые растения лугов и пастбищ. М., СПб.: Изд-во АН СССР, 1950. 524 с.
5. Губанов И.А., Киселева К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н. *Veratrum lobelianum* Bernh. — чемерица Лобеля // Иллюстрированный определитель растений Средней России: в 3 т. М.: Товарищ-во научн. изд-й КМК: Ин-т технол. исслед-й, 2002. Т. 1. Папоротники, хвощи, плауны, голосеменные, покрытосеменные (однодольные). С. 478–527.
6. Azimova S.S., Yunusov M.S. Natural compounds. Alkaloids: plant sources, structure and properties. N.Y.: Springer Science Business Media, 2013. P. 654–721.
7. Shakirov R., Yunusov S.Yu. Alkaloids of *Veratrum lobelianum* // Chem. Natural Compound. 1971. V. 7. № 6. P. 840–841.
8. Мадебейкин И.Н. Ядовитые растения // Пчеловодство. 1993. № 9. С. 12–13.
9. Землинский С.Е. Лекарственные растения СССР. Изд-е 3-е. М.: МЕДГИЗ, 1958. С. 309–311.
10. Сухорученко Г.И., Васильева Т.И., Иванова Г.П., Иванов С.Г., Зверев А.А. Положение с резистентностью колорадского жука *Leptinotarsa decemlineata* Say. (Coleoptera, Chrysomelidae) к инсектицидам в разных зонах картофелеводства России // Вестн. защиты раст. 2010. № 3. С. 30–38.

Hellebore Lobelya Is a Perspectiveness Bioproducer for the Development of a Biocide Preparation in Plant Protection against Harmful Arthropods

T. A. Ryabchinskaya^{a, #}, L. L. Yakovleva^a, and I. Yu. Bobreshova^a

^aAll-Russian Research Institute for Plants Protection
p. VNIIS 92, Voronezh region, Ramonsky district 396030, @city, Russia

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

The results of three years of research on the development of a biological biocidal preparation for the control of harmful arthropods based on ethanol extracts of biologically active substances of Lobel's hellebore are presented. The first experimental samples of the drug were tested on a number of arthropod phytophagous species. In laboratory experiments, the most effective and promising samples of the preparation for further research were determined. It has been established that their biological effectiveness depends on the technology of manufacturing preparations, the content of the active composition of substances, the concentration of the working solution and the species of phytophages. Individual samples were comparable in effectiveness with traditional insecticides from the avermectin group.

Keywords: Lobel's hellebore, biologically active substances, biocidal preparation, plant protection, harmful arthropods.

УДК 631.811.98

ЭКСТРАКТ БАДЬЯНА В КАЧЕСТВЕ РЕГУЛЯТОРА РОСТА РАСТЕНИЙ¹

© 2023 г. В. В. Тараненко^{1,*}, И. Г. Дмитриева², В. С. Муравьев²

¹Федеральный научный центр биологической защиты растений
350039 Краснодар 39, Россия

²Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина
350044 Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

*E-mail: viktaranen@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В настоящее время большое внимание уделяется снижению применения химических средств защиты растений и увеличению использования природных стимуляторов роста. Растительные экстракты представляют собой неисчерпаемый источник для поиска новых биологически активных веществ (БАВ). Экологической чистотой обладают экстракты, при получении которых в качестве растворителя используют жидкий диоксид углерода – CO₂-экстракты. Целью исследования было изучение рострегулирующих свойств CO₂-экстракта бадьяна. В трехлетний период 2020–2022 гг. были проведены полевые мелкоделяночные опыты на растениях озимой пшеницы сорта Безостая 100, кукурузы сорта Краснодарский 191 АМВ, сои сорта Арлета и риса сорта Фаворит. Применение CO₂-экстракта бадьяна способствовало получению достоверной и существенной прибавки урожайности всех перечисленных культур. Урожайность озимой пшеницы увеличилась на 10.4, кукурузы – на 9.8, сои – на 16.8, риса – на 7.4% (средние данные за 3 года). Отмечено положительное влияние экстракта бадьяна на формирование и развитие органов растений, определявших структуру урожая культур, повысилось качество зерна. На примере растений озимой пшеницы установлено усиление фотосинтетической активности под воздействием регулятора роста.

Ключевые слова: регулятор роста растений, CO₂-экстракт бадьяна, озимая пшеница, кукуруза, соя, рис, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188123110133, **EDN:** PWWQKV

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия разработка, изучение и применение регуляторов роста и развития растений приобретают все более массовый характер. Регуляторы роста в производстве сельскохозяйственной продукции не менее важны, чем минеральные удобрения и средства защиты растений [1, 2]. Работы по поиску новых действующих веществ во всем мире ведутся интенсивно и в различных классах химических соединений [3–6]. В то же время все острее становится проблема пестицидного пресса на окружающую среду. Ксенобиотиками загрязнены почва, вода, продукты питания, наносится ущерб здоровью человека, животных [7]. В связи с этим крайне важно, чтобы регуляторы роста были безопасными для человека и окружающей среды. В настоящее время научные исследования сместились в направлении использова-

ния природных продуктов, которые обладают высокой активностью и являются экологически безопасными. Растительные экстракты представляют собой “зеленую” кладовую, содержащую многочисленные биологически активные вещества с различными видами влияния как на человека, так и на растения [8].

Исследований, посвященных поиску биостимуляторов, в мировом научном сообществе в последние годы становится все больше. Изучают экстракты лекарственных растений, большого числа экзотических видов, природные эфирные масла и т.п. [9]. В Российской Федерации подобных исследований существенно меньше. Опубликованы работы по изучению экстрактов тополя бальзамического [10], хвойного сырья [11], морских водорослей [12], экстракта картофеля в ювенильный период [13] и некоторые другие. Таким образом, именно в России, богатой возобновляемыми природными ресурсами, целесообразно

¹ Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме FGRN-2022-0004.

развивать подобные актуальные исследования в области агротехнологий.

Настоящая работа посвящена изучению рост-регулирующих свойств CO_2 -экстракта бадьяна. Экологическая чистота растительных экстрактов зависит от метода их производства. Лучшие по качеству растительные экстракты получают благодаря использованию вместо органических растворителей так называемых “зеленых” растворителей. Практическую реализацию получил способ извлечения ценных компонентов из сырья жидким диоксидом углерода (CO_2). Процесс осуществляется при комнатной температуре ($18\text{--}25^\circ\text{C}$), но под высоким давлением 65 атм. CO_2 -экстракты обладают массой достоинств. Извлекаемые из сырья биологически активные вещества не подвергаются термической обработке, следовательно, не разрушаются. Экстракты отличаются экологической чистотой — не содержат остаточных количеств растворителя. Они находят применение в качестве пищевых добавок и антиоксидантов при производстве продуктов питания и в парфюмерной промышленности. Для исследований использовали CO_2 -экстракт бадьяна производства ООО “Караван” (г. Краснодар).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент осуществляли в условиях полевого мелкоделяночного опыта на растениях озимой пшеницы, кукурузы, сои и риса в период 2020–2022 гг. Для посевов озимой пшеницы, кукурузы и сои использовали экспериментальное поле Федерального научного центра биологической защиты растений (г. Краснодар). Почва — чернозем выщелоченный обыкновенный малогумусный, характеризовалась следующими показателями: содержание гумуса в пахотном слое — от 2.9 до 3.2%, верхний слой имел нейтральную и слабокислую реакцию ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 6.7–7.0), объемная масса — 1.23–1.35 г/см³ и порозность — 52.0–54.0%.

Опыты с растениями риса проводили на экспериментальном орошаемом участке Федерального научного центра риса г. Краснодара. Почва лугово-черноземная слабосолонцеватая тяжело-суглинистая характеризовалась следующими показателями: содержание гумуса — 3.3%, подвижных форм: азота — 0.44, фосфора — 3.85 и калия — 18.2 мг/100 г почвы, pH 7.3.

Климат зоны — умеренно-континентальный, умеренно-влажный и теплый. Среднегодовая температура воздуха составляет $10.0\text{--}10.8^\circ\text{C}$, среднегодовое количество осадков — 600–645 мм,

распределение их по месяцам неравномерное, коэффициент увлажнения — 0.25–0.40.

Суммарное количество осадков в 2020 г. составило 539, в 2021 г. — 846, в 2022 г. — 792 мм. В целом погодные условия для проведения исследования были благоприятными для роста и развития растений озимой пшеницы в полевые сезоны 2021 и 2022 гг., сезон 2020 г. был засушливым, для пропашных культур самым благоприятным был сезон 2021 г.

Озимая пшеница. В опытах использовали посе-вы озимой пшеницы сорта Безостая 100. Сорт среднерослый, устойчив к полеганию и осыпанию, среднеранний, характеризуется высокой и стабильной урожайностью. Масса 1000 зерен равна 40–44 г. Относится к мягким пшеницам. Допущен для возделывания в Центрально-Черноземном, Северо-Кавказском и Нижневолжском регионах.

Кукуруза. Для проведения эксперимента использовали семена кукурузы сорта Краснодарский 291 АМВ. Сорт относится к среднераннему типу с вегетационным периодом 106–110 сут. Высота растений — 180–200 см, зерно желтое зубовидное, масса 1000 семян — 280–300 г. Оригинатор гибрида — Краснодарский НИИСХ им. П.П. Лукьяненко.

Соя. Под опыты на растениях сои были разбиты делянки в посевах сои сорта Арлета. Производитель семян (оригинатор сорта) — компания “СОКО”. Рекомендован для выращивания в Краснодарском крае. Сорт раннеспелый, вегетационный период — 99 сут. Тип роста растений — детерминантный, ветвление слабое. Сорт характеризуется высоким содержанием белка и высокой масличностью. Потенциальная урожайность — до 35.0, в повторных посевах — до 23.0 ц/га.

Рис. Для проведения полевых опытов использовали сорт риса Фаворит. Разработчик сорта — ВНИИ риса. Вегетационный период — 100–120 сут, среднеспелый, разновидность италика. Длина зерна средняя, отличается высокими показателями качества. Масса 1000 абсолютно сухих зерен — 28–33 г, количество колосков — до 100 шт., высота растений — 90–95 см. Средняя урожайность сорта — ≈ 60.0 ц/га.

Посев каждой культуры выполняли семенами первого класса в оптимальный срок для центральной зоны Краснодарского края селекционной сеялкой центрального точного высева с рекомендованной нормой высева. Удобрения не применяли (нулевой фон). Учетная площадь делянки — 5.0 м², повторность четырехкратная, расположение делянок рендомизированное.

Для определения рострегулирующего эффекта на вегетирующие растения наносили водную эмульсию экстракта бадьяна. При приготовлении эмульсии использовали эмульгатор ОП-7 в количестве 0.01% от массы растворителя. Обработку посевов проводили методом двукратного опрыскивания посевов при норме расхода регулятора роста 30 г/га и расхода раствора 300 л/га. Растения озимой пшеницы обрабатывали в фазах кушения и флагового листа, растения кукурузы — в фазах 3–5- и 8–10-ми листьев, растения сои — в фазах 4–6 листьев и бутонизации, растения риса — в фазах кушения и выметывания.

В качестве эталона сравнения был выбран препарат Бигус ВР, созданный на основе природных гуминовых кислот (препаративная форма — водный раствор, действующее вещество — калиевые соли гуминовых кислот, концентрация 25 г/л по кислоте). Нанесение эталона осуществляли в тех же дозах, в те же сроки. Растения контрольного варианта выращивали без обработки.

В соответствии с руководством по регистрационным испытаниям [14], в опыте проводили следующие наблюдения, учеты и анализы: фенология, густота стояния растений, биометрия растений после созревания, содержание основных элементов питания в зерне (%) определяли с помощью анализатора “ФТ-7”.

Урожай убирали в период полного созревания зерна поделаночно. После обмолота с каждой деланки отбирали образец зерна согласно ГОСТ 12042-80 для определения массы 1000 зерен. Кроме того, с каждой деланки отбирали сноп для определения биометрических показателей.

Для растений озимой пшеницы определяли общее содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов) в листьях культуры. Первую пробу отбирали перед обработкой рострегулятором, вторую — на 5-е сут после обработки, следующие — через каждые 10 сут до конца вегетации. Количество пигментов определяли на спектрофотометре Genesys 8 (Thermo Spectronic, Англия) в экстрактах 96%-ного этанола с последующим расчетом по формулам Лихтеналлера [15].

Полученные данные подвергали статистической обработке методом дисперсионного анализа с использованием программы STATISTICA [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Трехлетнее полевое исследование позволило установить, что CO_2 -экстракт бадьяна обладает существенными рострегулирующими свойствами.

Несмотря на различные погодные условия, применение экстракта бадьяна на растениях озимой пшеницы сорта Безостая 100 способствовало стабильному повышению урожайности культуры на 8.6–11.5%, что в среднем за 3 года составило 10.4% (табл. 1). Интенсивнее осуществлялось накопление белка и сырой клейковины в зерне озимой пшеницы: содержание белка в зерне увеличилось на 1.2%, содержание клейковины и крахмала — на 1.2–1.7%.

Обработанные рострегулятором растения опережали в росте растения контрольного варианта, повышалось общее и продуктивное кушение. Длина колоса увеличилась на 16.9, количество колосков в колосе — на 4.4–5.8, количество зерен колосе — на 20.0, масса зерна в колосе превышала контрольный вариант на 23.1, масса 1000 зерен — на 4.6%. Все перечисленные параметры положительно отличались от таковых в варианте с использованием эталона Бигус, ВР (табл. 2).

Величина и качество урожая существенно зависит от фотосинтетической активности культуры, интенсивности процессов дыхания и обмена веществ в растениях. В ходе эксперимента установлено, что в течение всего периода наблюдения общее содержание фотосинтетических пигментов в обработанных регулятором роста растениях было больше, чем в контрольном варианте (рис. 1).

Прибавка урожайности кукурузы сорта Краснодарский 291 АМВ под влиянием CO_2 -экстракта бадьяна составила в среднем 5.7 ц/га (9.8%). Изучение структуры основных показателей урожайности кукурузы показала, что применение рострегулятора способствовало увеличению длины початка на 10.9, количества зерен в початке — на 18.4, массы зерен в початке — на 14.8% по отношению к контролю (табл. 2). Использование экстракта бадьяна повлияло и на массу зерна в початке, по сравнению с контрольным вариантом она возросла на 12.2%.

Существенное и стабильное повышение урожайности при применении CO_2 -экстракта бадьяна получено и на растениях сои сорта Арлета, прибавка урожая составила 16.8%. Улучшилось и качество зерна: содержание белка увеличилось на 2.3, масличность — на 1.6% (табл. 1). Повышение урожайности явилось следствием положительно-го влияния регулятора роста на формирование и развитие органов, определяющих структуру урожая. По данным учета, количество бобов на 1 растение превышало контроль на 14.5, масса семян с 1-го растения — на 15.4, масса 1000 семян — на 14.8%.

Таблица 1. Влияние экстракта бадьяна на урожайность культур (средние за 2020–2022 гг.)

Вариант	Урожайность	Прибавка к контролю		Содержание в зерне, %	
	ц/га		%	белка	крахмала
Озимая пшеница сорта Безостая 100					
Экстракт бадьяна	77.5	7.3	10.4	13.8	72.1
Эталон Бигус ВР	74.5	4.3	6.1	13.0	71.3
Контроль	70.2	—	—	12.6	70.4
<i>HCP</i> ₀₅	2.8	—	—	0.3	0.7
Кукуруза сорта Краснодарский 291 АМВ					
Экстракт бадьяна	64.1	5.7	9.8	11.0	77.0
Эталон Бигус ВР	61.8	3.4	5.9	9.8	76.5
Контроль	58.4	—	—	9.4	75.4
<i>HCP</i> ₀₅	2.6	—	—	0.5	0.8
Соя сорта Арлета					
Экстракт бадьяна	33.8	4.9	16.8	37.8	масличность, % 25.6
Эталон Бигус ВР	31.3	2.4	8.4	35.9	24.0
Контроль	28.9	—	—	35.5	23.8
<i>HCP</i> ₀₅	1.9	—	—	0.4	0.8
Рис сорта Фаворит					
Экстракт бадьяна	73.0	5.0	7.4	9.5	43.0
Эталон Бигус ВР	70.1	2.1	4.4	9.3	42.9
Контроль	68.0	—	—	8.8	42.4
<i>HCP</i> ₀₅	2.2	—	—	0.5	0.4

Таблица 2. Влияние экстракта бадьяна на структуру урожая культур (средние за 2020–2022 гг.)

Вариант	Высота растений, см	Длина колоса (початка), мм	Количество зерен в колосе (початке), шт.	Масса зерна в колосе (початке)	Масса 1000 семян
				г	
Озимая пшеница сорта Безостая 100					
Экстракт бадьяна	90	8.3	34.9	1.6	42.9
Эталон Бигус ВР	84	7.4	31.9	1.6	42.0
Контроль	81	7.1	29.0	1.4	41.0
<i>HCP</i> ₀₅	3	0.3	0.6	0.2	0.8
Кукуруза сорта Краснодарский 291 АМВ					
Экстракт бадьяна	218	21.2	566	201	394
Эталон Бигус ВР	214	20.0	512	190	374
Контроль	211	18.3	477	176	348
<i>HCP</i> ₀₅	2	0.6	19	9	12
Рис сорта Фаворит					
Экстракт бадьяна	96	16.2	68.2	2.2	36.0
Эталон Бигус, ВР	96	15.4	64.8	2.1	35.1
Контроль	91	14.6	61.7	2.0	34.1
<i>HCP</i> ₀₅	3	0.6	4.6	0.1	1.0

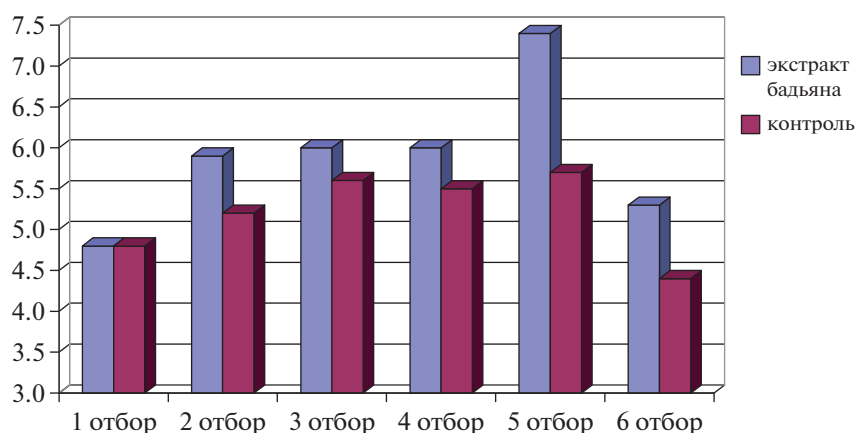


Рис. 1. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях озимой пшеницы, мг/дм²; 1–6 – отборы проб в течение вегетации растений.

Отзывчивость растений риса сорта Фаворит на воздействие CO₂-экстракта бадьяна тоже была достаточно высокой, в среднем прибавка урожайности за трехлетний период была на уровне 7.4% при сохранении качества зерна (табл. 1). Что касается структуры урожая, то по данным эксперимента, у обработанных регулятором роста растений в сравнении с необработанными высота увеличилась на 5.5, длина метелки – на 10.9, количество зерен в метелке – на 10.5, масса зерна в метелке – на 10.0, масса 1000 семян – на 5.9%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показана возможность использования экстракта бадьяна, полученного методом сверхкритической жидкостной экстракции, в качестве безопасного природного регулятора роста растений. Трехлетние полевые испытания позволили обнаружить высокую отзывчивость культур озимой пшеницы, кукурузы, сои и риса на применение экстракта бадьяна в качестве ростостимулятора. Под его влиянием наблюдали более интенсивное развитие органов, формирующих структуру урожая, увеличилась масса зерна с одного растения и масса 1000 зерен. Как следствие, повысилась урожайность культур, содержание белка в зерне была больше, чем у растений контрольного варианта. Обнаружено также усиление фотосинтетической активности растений озимой пшеницы. Результаты этого исследования могут внести свой вклад в экологическое производство сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сияншин О.Г., Шаповал О.А., Шулаева М.М. Инновационные регуляторы роста растений в сельскохозяйственном производстве // Плодородие. 2016. № 5. С. 38–42.
2. Nickell L.G. Plant growth regulating chemicals. CRC Press, 2018. 266 p.
3. Rademacher W. Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production // J. Plant Growth Regul. 2015. V. 34. P. 845–872.
4. Дядюченко Л.В., Тараненко В.В., Дмитриева И.Г. Изучение рострегулирующих свойств производных пиридин-2-сульфанилацетанилидов на растениях сои // Агрохимия. 2020. № 5. С. 12–16.
5. Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А., Дядюченко Л.В. Антидотная активность производных 2-алкилтионикотинитрилов // Политемат. сетев. электр. научн. журн. КубГАУ. 2017. № 132. С. 435–441.
6. Дмитриева И.Г., Дядюченко Л.В., Стрелков В.Д., Доценко С.П., Кайгородова Е.А. Синтез новых 2-алкилтионикотинитрилов и 3-ами-нотиено-[2,3-*b*]пиридинов на их основе и скрининг потенциальных антидотов и регуляторов роста растений // Тр. КубГАУ. 2006. № 3. С. 129–134.
7. Gonzalez N., Margues M., Nadal M., Domingo J.L. Occurrence of environmental pollutants in foodstuffs // Food & Chem. Tox. 2019. V. 125. P. 370–375.
8. Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А. Физиологическая активность биостимуляторов и эффективность их применения // Агрохимия. 2016. № 6. С. 72–94.
9. Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А. Современные представления о биостимуляторах // Агрохимия. 2014. № 7. С. 85–90.
10. Калюта Е.В., Мальцев М.И., Шепелева О.В., Исаева Е.В. Экстракты тополя бальзамического как регуляторы роста яровой мягкой пшеницы // Химия раст. сырья. 2017. № 4. С. 203–209.
11. Чукичева И.Ю., Хуришайнен Т.В., Кучин А.В. Природные регуляторы роста из хвойного сырья //

- Инноватика и экспертиза: научн. тр. 2018. № 3. С. 93–99.
12. Шибеева Т.Г., Шерудило Е.Г., Титов А.Ф. Экстракты морских водорослей как биостимуляторы растений // Тр. Карел. НЦ РАН. 2021. № 3. С. 36–67.
 13. Дмитриевская И.И., Белопухов С.А., Багнавец Н.А., Григорьева М.В. Применение стимулятора роста растительного происхождения Ратифур для выращивания льна // Агрохим. вестн. 2020. № 3. С. 53–56.
 14. Руководство проведения регистрационных испытаний регуляторов роста растений, дефолиантов и десикантов в сельском хозяйстве // М.: Минсельхоз РФ, 2018. 223 с.
 15. Lichtentaller H.K., Wellburn A.R. Determinations of total extracts in different solvents // Biochem. Soc. Transact. 1983. V. 11. № 5. P. 591–592.
 16. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по требованию, 2012. 352 с.

Star Anise Extract as a Plant Growth Regulator

V. V. Taranenko^{a,#}, I. G. Dmitrieva^b, and V. S. Muravyov^b

^a*Federal Research Center of Biological Plant Protection
Krasnodar 39 350039, Russia*

^b*I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University
ul. Kalinina 13, Krasnodar 350044, Russia*

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

Currently, much attention is being paid to reducing the use of chemical plant protection products and increasing the use of natural growth stimulators. Plant extracts are an inexhaustible source for the search for new biologically active substances (BAS). Extracts have ecological purity, in the production of which liquid carbon dioxide – CO₂-extracts are used as a solvent. The purpose of the study was to study the growth-regulating properties of the CO₂-extract of star anise. In the three-year period 2020–2022 field small-scale experiments were carried out on plants of winter wheat of the Bezostaya 100 variety, corn of the Krasnodar 191 AMV variety, soybeans of the Arlet variety and rice of the Favorit variety. The use of CO₂-extract of star anise contributed to obtaining a reliable and significant increase in the yield of all these crops. The yield of winter wheat increased by 10.4, corn – by 9.8, soybeans – by 16.8, rice – by 7.4% (average data for 3 years). The positive effect of the extract of the bucket on the formation and development of plant organs that determined the structure of the crop yield was noted, the quality of grain increased. On the example of winter wheat plants, an increase in photosynthetic activity under the influence of a growth regulator has been established.

Keywords: plant growth regulator, CO₂-extract of star anise, winter wheat, corn, soy, rice, yield.

УДК 633.31/.37:632.954:632.95.028

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ГЕРБИЦИДОВ ИЗ КЛАССА СУЛЬФОНИЛМОЧЕВИН НА РАЗВИТИЕ ВСХОДОВ ЛЮПИНА БЕЛОГО И МАША ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ¹

© 2023 г. С. В. Железова¹, В. Н. Колупаева¹, Е. В. Степанова^{1,*}, А. В. Мельников², М. А. Воронов³, А. Э. Степанова¹, В. Е. Веллер^{1,3}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Москва Россия

²Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”
143013 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Новоивановское, ул. Калинина, 1, Москва Россия

³Российская государственная аграрная академия—Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева
127550 Москва, ул. Тимирязевская 49, Москва Россия

*E-mail: jacky-st@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В серии последовательных вегетационных экспериментов по биотестированию на образцах дерново-подзолистой окультуренной почвы после ее обработки гербицидами из класса сульфонилмочевин: Магнум, ВДГ, метсульфурон-метил 600 г/кг, производство компании Август и Алистер Гранд, МД, дифлюфеникан 180 г/л + мезосульфуронметил 6.0 г/л, йодосульфурон-метил-натрий 4.5 г/л + + мефенпирдиэтил 27 г/л (антидот), производство компании Bayer. Была изучена остаточная фитотоксичность данных препаратов для проростков чувствительных культур люпина белого (*Lupinus albus*) и маша (*Vigna radiata*). Исходные почвенные образцы были отобраны в поле на 5-е сут после внесения гербицидов в полевых условиях в посевах озимой пшеницы при применении 2-х разных технологий обработки почвы: традиционной на основе отвальной вспашки и нулевой обработки. По результатам биотестирования образцов при температуре +20° и влажности на уровне 60% ПВ показано, что период полураспада гербицидов (DT_{50}) был достигнут через 40 ± 3 сут инкубирования, а детоксикация до уровня 70–80% наступила через 200–240 сут после внесения гербицидов в почву. Независимо от способа обработки почвы и примененного гербицида спустя 2 года после применения гербицидов было выявлено угнетение тест-культур на уровне >10% от контроля. Люпин белый и маш обладают высокой чувствительностью к воздействию микроколичеств гербицидов группы сульфонилмочевин, поэтому рекомендовано использовать эти тест-культуры для определения остаточной фитотоксичности почвы. Показано проявление последствия сульфонилмочевин на бобовых культурах, что важно даже в специализированных севооборотах, разработанных для нулевой обработки почвы.

Ключевые слова: сульфонилмочевины, остаточная фитотоксичность, последствие гербицидов, люпин белый (*Lupinus albus*), маш (*Vigna radiata*).

DOI: 10.31857/S0002188123110169, EDN: PWRENV

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время зарегистрировано около 30 действующих веществ класса сульфонилмочевин, которые используют более чем в 80 странах мира [1–3]. В России гербициды этого класса стали активно применять в растениеводстве с начала 1990-х гг. [3, 4], к настоящему времени они заняли лидирующее положение по объему примене-

ния, и масштабы их использования неуклонно растут [3, 5, 6]. В качестве действующего вещества в этих гербицидах применяют хлорсульфурон, метсульфурон-метил, триасульфурон, римсульфурон, просульфурон, никосульфурон, сульфометурон-метил и другие соединения этого класса. Их использование требует особой осторожности, т.к. высокая фитотоксичность в почве сохраняется длительное время, и оказывая угнетающее действие на чувствительные культуры в севообороте через год и более после их применения [4–12]. Особенно ярко проявления фитотоксичности

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания НИОКТР при государственном бюджетном финансировании, проект FGGU-2022-0012.

спустя длительное время после внесения отмечают в степных регионах Поволжья, на черноземных и каштановых почвах, где негативное влияние от использования этих гербицидов выявлено в течение полутора–двух вегетационных сезонов, а в отдельных случаях — до 5 лет, например для культуры нута [5]. Согласно ранее опубликованным данным и действующему регламенту применения пестицидов [3, 4, 8–11], наиболее чувствительны к остаточным количествам сульфонилмочевин бобовые культуры, подсолнечник, крестоцветные масличные (горчица, рапс), капуста, свекла, картофель, овощи семейства тыквенные (огурец, кабачок, арбуз), соя, гречиха. Отмечено, что применение сульфонилмочевин в зерноовощных севооборотах приводит к значительному снижению биомассы картофеля в следующем сезоне после применения гербицида [13]. Риск последствия сульфонилмочевин снижается при кислой реакции почв и их высокой влагонасыщенности в течение вегетационного сезона. В подобных условиях химическое разложение гербицидов проходит быстрее, особенно таких соединений как хлорсульфурон, триасульфурон, метсульфурон-метил, которые довольно быстро разлагаются в условиях кислой среды [14, 15].

“Скрытое проявление отрицательного действия остатков гербицидов выражается 3–30%-ным снижением урожая сельскохозяйственных культур” — отмечено в [5]. При этом нет явных заметных изменений внешнего вида чувствительных растений. Скрытые изменения роста и развития растений можно обнаружить только при сравнении со здоровыми растениями, выращенными на чистой почве без остаточного содержания гербицидов. Как правило, в производственных условиях не оставляют контрольных полос без обработки гербицидами для сравнения. В таких случаях для оценки остаточной фитотоксичности можно воспользоваться методами биотестирования в лабораторных условиях [16, 17]. Биотестирование основано на проявлении реакции тест-культур на экзогенное воздействие, что отражается в снижении их тест-параметров: энергии прорастания, всхожести семян, длине корня, длине побега и др. Биотестирование может быть проведено в том числе методом экспресс-биотеста продолжительностью 72 ч (оценка угнетения прорастания семян) или методом вегетационного эксперимента сроком 2–4 нед с выращиванием тест-культур в вегетационных сосудах и оценкой их тест-отклика. Высокая чувствительность данного метода позволяет определять концентрации остаточных количеств на уровне 0.08–0.10 мкг/кг почвы, что в 20–30 раз превышает чувствительность метода

высокоэффективной жидкостной хроматографии [5] для определения сульфонилмочевин. В связи со специфической реакцией отдельных видов тест-культур на различные загрязнители и стрессовые факторы [16, 18], а также с особенностями поступления веществ и их метаболизма в растениях, выбор растений-индикаторов является важной методической задачей. Зернобобовые культуры широко возделывают во многих областях Черноземной зоны [19, 20], и они имеют большой потенциал для возделывания в Нечерноземной зоне [21, 22]. Некоторые виды бобовых могут быть использованы в качестве высокочувствительных тест-культур.

Цель работы — методами биотестирования на проростках 2-х видов бобовых культур оценить проявление фитотоксичности дерново-подзолистой почвы в течение 2-х лет после применения гербицидов класса сульфонилмочевин Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования была фитотоксичность почвы, оцениваемая по развитию проростков семян люпина белого (*Lupinus albus*) и маша (*Vigna radiata*). Всходы данных культур были выращены в вегетационных экспериментах в лабораторных условиях на образцах дерново-подзолистой почвы, содержащих гербициды группы сульфонилмочевин Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД, после их применения в полевых условиях согласно действующему регламенту [23].

Почвенные образцы были отобраны однократно, на 5-е сут после применения гербицидов. План данного вегетационного эксперимента включал последовательные сетки биотестирования с разными тест-культурами в течение 2.5 лет при переменном инкубировании почвы во влажном и сухом состоянии. В данной работе представлены результаты 3-х сетов биотестирования только на бобовых культурах маша и люпина, начало сетов — на 5-, 330- и 730-е сут после внесения гербицида. Биотестирование проводили согласно ГОСТ [24, 25].

Почвенные образцы. Образцы были отобраны в полевых условиях на поле № 1 Центра точного земледелия Полевой опытной станции РГАУ—МСХА им. К.А. Тимирязева (N 55.8369°; E 37.5636°) [26]. Почва участка — агродерново-подзолистая, легкосуглинистая, кислая (рН от 4.5 до 5.5 ед.), обеспеченность легкодоступным фосфором — высокая (180–250 мг/кг почвы), легкодоступным калием — средняя и высокая (70–150 мг/кг почвы), что достигнуто путем внесения минеральных

удобрений в рекомендуемых дозах под каждую культуру севооборота.

Отбор почвенных образцов для биотестирования проводили осенью 2020 г. на 5-е сут после обработки посевов озимой пшеницы одним из гербицидов класса сульфонилмочевин. В исследовании сравнивали 2 гербицида: 1 — Магнум, ВДГ, метсульфурон-метил 600 г/кг, производство компании Август; 2 — Алистер Гранд, МД, дифлюфеникан 180 г/л + мезосульфуронметил 6.0 г/л, йодосульфурон-метил-натрий 4.5 г/л + мефенпирдиэтил 27 г/л (антидот), производство компании Bayer. Внесение гербицидов в баковой смеси с фунгицидом осуществляли с помощью опрыскивателя UF 901 AMAZONE. Нормы внесения гербицидов были выбраны согласно Каталогу пестицидов и агрохимикатов [23] на объем рабочей жидкости 250 л: Магнум 10 г/га, Алистер Гранд 0.6 л/га. Таким образом, внесение гербицида проводили по стандартной методике осеннего применения, апробированной и рекомендованной для условий Нечерноземья [14]. Согласно схеме многолетнего опыта [26], на поле поддерживают стационарные делянки с 2-мя видами обработки почвы в двукратной повторности: традиционной и минимальной. Под пшеницу используют: вариант 1 — традиционная обработка на основе вспашки с оборотом пласта (далее отвальная вспашка), вариант 2 — ресурсосберегающая нулевая обработка (далее нулевая обработка). Полевой опыт по внесению гербицидов при разных обработках почвы заложен методом расщепленных делянок: полосы обработки гербицидами Магнум и Алистер Гранд были заложены на поле вдоль рядков посевов и чередовались в пространстве так, чтобы на каждый способ обработки почвы приходилась обработка одним из двух гербицидов. Таким образом, в эксперименте на определение остаточной фитотоксичности почвы после применения сульфонилмочевин сравнивали 4 варианта обработка почвы + гербицид, заложенные в поле в двукратной повторности.

Суммарная площадь каждого варианта опыта составляла 0.2 га. В каждом из этих вариантов было отобрано по 12 индивидуальных почвенных образцов из поверхностного слоя почвы (0–5 см). Помимо этого, в непосредственной близости от опытного поля на залежном участке была отобрана чистая почва без гербицидов в качестве контроля.

Все почвенные образцы до начала биотестирования хранили в морозильной камере при -23° в плотной полиэтиленовой упаковке без доступа воздуха. Перед началом биотестирования образцы размораживали в упаковке в комнатных условиях в течение 4–5 ч. После размораживания и

первого биотестирования использованные образцы повторно не замораживали, а последовательно использовали в последующих биотестах в течение 2-х лет. Тест-культуры и даты последовательных 6-ти серий биотестирования: люпин (ноябрь 2020 г.), картофель (март 2021 г.), горчица (май 2021 г.), люпин (сентябрь 2021 г.), горчица (октябрь 2021 г.), маш (ноябрь 2022 г.). В 2023 г. эксперимент продолжают с картофелем. В данной работе описаны только результаты 3-х серий биотестирования на бобовых культурах (дважды с люпином, однократно с машем).

Методика биотестирования. В данном эксперименте в качестве тест-культур были использованы люпин белый (*Lupinus albus* L.) сорта Детер 1 (масса 1000 зерен — 308 г, урожай 2020 г.) и маш (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) сорта Салтан (масса 1000 зерен — 38 г, урожай 2021 г.).

Биотестирование было проведено двумя методами: 1 — экспресс-биотестирование на проростках люпина на почве в чашках Петри при инкубировании в течение 72 ч в термостате при 20°C без освещения. Проведено на свежих размороженных полевых образцах почвы с целью определения стартовых условий фитотоксичности почвы полевых образцов; 2 — биотестирование вегетационным методом на всходах люпина и маша на почве в вегетационных сосудах в течение 3 (4)-х нед в контролируемых условиях температуры и освещенности в лаборатории искусственного климата с необходимым поливом вегетационных сосудов с целью определения остаточной фитотоксичности почвы.

В обоих методах биотестирования в течение всего эксперимента влажность почвы поддерживали на уровне 60% ПВ, что было оптимальным условием для развития всходов. Во всех экспериментах биотестирования использованы контрольные образцы почвы без гербицида, а также на чистой почве дополнительно были созданы эталонные шкалы 2-х изученных гербицидов в разных концентрациях в почве: 0 (контроль без гербицида), 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 мг/кг почвы. Данная шкала охватывала широкий диапазон концентраций, включая рекомендуемые по регламенту дозы применения гербицида (табл. 1). Сопоставление доз гербицида в лабораторных опытах и полевых условиях проведено при принятии условий, что объемная масса почвы составляет 1.3 г/см^3 и в расчете учитывают поверхностный слой почвы мощностью 5 см. Согласно описанию гербицидов почвенного действия, после внесения они формируют так называемый “экран” эффективной концентрации в поверхностном (до 5 см) слое почвы.

Таблица 1. Шкала концентраций гербицидов Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД для проведения биотестирования на проростках чувствительных культур и сопоставление с полевыми концентрациями гербицидов, применяемых по регламенту

Доза гербицида в биотестах, мг/кг почвы	0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0
Концентрация	0	5×10^{-5}	1×10^{-7}	2×10^{-7}	5×10^{-7}	1×10^{-6}	2×10^{-6}	2×10^{-6}
Соответствие дозе Магнум, рекомендуемой по регламенту	Контроль без гербицида	Доза 0.007–0.01 кг/га, в соответствии с регламентом		Дозы в 2–5 раз выше регламента		Дозы в 10–20 раз выше регламента		Доза в 50 раз выше регламента
Соответствие дозе Алистер Гранд рекомендуемой по регламенту		Остаточные количества	Дозы в 4–10 раз выше регламента		Доза 0.6–1 л/га, в соответствии с регламентом		Дозы в 2–5 раз выше регламента	

Таблица 2. Время и условия проведения биотестирования на проростках бобовых культур

Время после внесения, сут	Количество сетов инкубирования (и биотестирования) предшествовало, их продолжительность	Тест-культура	Метод, длительность теста
5	— (свежие образцы, без предварительного инкубирования)	Люпин	ЭТП на почве, 72 ч
330	2 сета: инкубация 30 и 21 сут при увлажнении 60% ПВ (высушивание по окончании)	Люпин	ВЭС, 21 сут
730	4 сета: инкубация 30, 21, 28 и 28 сут при увлажнении 60% ПВ (высушивание по окончании)	Маш	ВЭС, 28 сут

Примечание. ЭТП — экспресс-тест в чашках Петри, ВЭС — вегетационный эксперимент в сосудах.

Люпин и маш являются быстро растущими культурами, и их можно использовать как в экспресс-тестах в чашках Петри (ЭТП), так и в условиях вегетационного эксперимента в сосудах (ВЭС). В первом случае измеряют длину проростков и корней тест-культуры после 72 ч проращивания в условиях термостата без освещения. Во втором случае измеряют высоту и биомассу тест-культуры, выращиваемой в течение 3–4-х нед в контролируемых условиях освещения, полива и температуры в вегетационной камере.

На бобовых культурах было проведено 3 сета биотестирования в разные сроки после даты внесения гербицида и после проведения инкубирования почвы попеременно во влажном и сухом состоянии (табл. 2).

Последовательность подготовки и проведения биотестирования:

1. Подготовка почвы для шкалы концентраций гербицидов: использована воздушно-сухая дерново-подзолистая почва из поверхностного слоя 0–20 см (чистая, без гербицида), просеянная через сито 2 мм, смешанный образец. Навески почвы: по 70 г для экспресс-биотестов в чашках Петри, по 400 г для биотестирования в лабораторных сосудах, объем сосудов 0.4 л. Навески почвы для

приготовления шкалы концентраций были взяты в картонные стаканы с тонким полиэтиленовым покрытием стенок;

2. Подготовка стандартной шкалы гербицидов в почве. Рабочие водные растворы для достижения необходимой концентрации гербицидов (табл. 1) приготовлены непосредственно перед внесением в почву путем последовательного разбавления маточного раствора от высоких концентраций к малым. Внесение аналитической пипеткой с дозатором в воздушно-сухую почву по 1 мл рабочих растворов гербицидов в приготовленных концентрациях согласно шкале, в контрольном варианте — внесение в почву по 1 мл дистиллированной воды. Незамедлительное тщательное размешивание почвы в стакане сухим металлическим шпателем после внесения растворов в почву. Ожидание перед дальнейшим увлажнением почвы в течение 1 ч для установления равновесной сорбции гербицида;

3. Увлажнение почвы до оптимального показателя 60% ПВ:

— для экспресс-биотестирования в чашках Петри (биотест 1) после окончания периода ожидания (1 ч) перенос почвы в чашки Петри и увлажнение небольшими порциями воды (сум-



Рис. 1. Биотестирование тест-культуры люпина белого: (а) — предварительно пророщенные семена в чашках Петри с почвой, (б) — проростки люпина спустя 72 ч инкубирования в термостате при 20°C.

марно по 13 мл воды на навеску почвы 70 г). Установка закрытых чашек Петри вертикально на ребро, свободное легкое встряхивание почвы внутри чашек под крышкой, так, чтобы нижняя половина чашки была заполнена увлажненной почвой, а верхняя половина — воздухом. При необходимости проводили перемешивание почвы для более равномерного увлажнения. Ожидание равномерного увлажнения почвы в чашках Петри под крышками — 1 ч. После установления равномерного увлажнения осуществлен посев в чашки с подготовленной к посеву почвой (рис. 1);

— для биотестирования в вегетационных сосудах (биотесты 2 и 3) использованы картонные стаканы с полиэтиленовым покрытием стенок. После окончания периода ожидания (1 ч) также проводили увлажнение почвы в сосудах небольшими порциями воды, тщательно перемешивая после каждого добавления воды в почву (суммарно по 74 мл воды на навеску почвы 400 г). Ожидание равномерного увлажнения почвы в вегетационных сосудах под крышкой из полиэтиленовой пленки — 1 ч. После установления равномерного увлажнения сосуды с почвой были готовы к посеву;

— полевые свежие образцы почвы с гербицидом имели разную остаточную влажность (от 40 до 80% ПВ), которая была выравнена во всех вариантах опыта до 60% ПВ путем добавления необходимого количества воды (1–5 мл) или подсушивания в комнатных условиях в течение 1.0–1.5 ч. Необходимость выравнивания влажности образцов возникла только при подготовке биотеста в чашках Петри, т.к. этот эксперимент проводили на свежесобраных полевых образцах, имевших разную влажность. Биотесты в вегетационных сосудах были заложены на почве после ее использо-

вания в предыдущих сетах биотестирования и полного высушивания, следовательно, не было необходимости выравнивать влажность в разных образцах;

4. Посев осуществляли на поверхность почвы заранее замоченными в воде семенами люпина или маша. Замачивание семян проводили в плоском сосуде на фильтровальной бумаге 48 ч при +20°C под укрытием из полиэтиленовой пленки. Для посева выбирали равномерно набухшие семена с одинаковым размером зародышевого корня (2–3 мм). В чашки Петри сажали по 7 семян люпина (биотест 1), в вегетационные сосуды — по 7 семян люпина (биотест 2) и по 3 семени маша (биотест 3);

5. Учеты проводили для биотеста 1 через 72 ч (измерение длины проростков и корней), для биотестов 2 и 3 — через 28 и 21 сут соответственно (измерение высоты и биомассы надземной части растений).

Статистическая обработка результатов. Во всех экспериментах каждая концентрация по стандартной шкале гербицида была заложена в трехкратной повторности, контроль без гербицида — в шестикратной. Полевые образцы были представлены в шестикратной повторности для каждого из 4-х вариантов опыта (способ обработки почвы + гербицид). По результатам биотестирования с достаточной повторностью в каждом эксперименте было проведено сравнение отклика тест-культуры по оценке средних с применением доверительного интервала средних с уровнем значимости $p < 0.05$. Расчеты проведены с использованием стандартных алгоритмов в пакетах программ Microsoft Excel и STATISTICA.

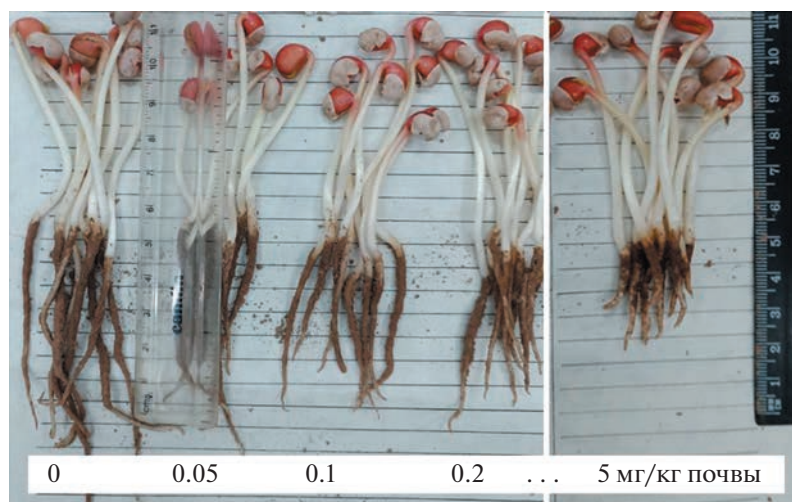


Рис. 2. Проростки люпина белого после 72 ч проращивания в термостате при 20°C на почве с разными концентрациями стандартной шкалы гербицида Магнум, ВДГ.

Три срока проведения биотестирования на 5-, 330- и 730-е сут после внесения гербицидов позволили судить о фитотоксичности почвы сразу после применения гербицидов, а также спустя 11 и 23 мес. По отклику тест-культур можно было оценить во времени процесс детоксикации изученных гербицидов в дерново-подзолистой почве.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биотест 1. После 72 ч биотестирования в термостате на почве, содержащей гербициды после их внесения в поле или при создании стандартной шкалы концентраций, измеряли длину корня, гипокотили и общую длину проростков люпина белого (рис. 2). Для всех образцов с гербицидами было показано, что, во-первых, очень высока вариабельность длины проростков в каждой чашке (особенно для гербицида Магнум), во-вторых, корни и надземная часть проростка (гипокотиль) по-разному реагировали на присутствие гербицида в почве. Так как повторность опыта была высокой, то благодаря этому удалось выявить статистически достоверную разницу длины проростков в целом и длины корней между вариантами (рис. 3). Корни люпина проявили высокую чувствительность и в присутствии гербицидов в разных концентрациях были угнетены, в то время как на гипокотилих было выявлено компенсационное развитие без признаков угнетения и в некоторых случаях даже со стимуляцией роста.

Длина корней проростков люпина под воздействием гербицида Алистер Гранд снижалась по сравнению с контролем без гербицида на 30% в варианте вспашки и на 25% в варианте с нулевой

обработкой. Гербицид Магнум способствовал снижению длины корней люпина на 30% в обоих вариантах обработки почвы (рис. 3).

При сравнении одинаковых шкал концентраций 2-х гербицидов было выявлено, что угнетающее действие гербицида Алистер Гранд на проростки люпина возрастало с ростом концентрации гербицида в почве (рис. 3а), для гербицида Магнум такой зависимости выявлено не было (рис. 3б). Сопоставление результатов угнетения роста люпина в полевых условиях и в опыте со шкалой гербицидов позволило предположить, что концентрация гербицида в полевых условиях была меньше, чем 0.05 мг/кг почвы для гербицида Алистер Гранд, и примерно 0.05 мг/кг почвы — для гербицида Магнум. Эти концентрации можно считать “стартовыми условиями” для дальнейших биотестов на этих же образцах почвы.

Биотест 2. Вегетационный эксперимент продолжительностью 21 сут был проведен на тест-культуре люпина с теми же образцами почвы спустя 11 мес. после внесения гербицидов. За этот период времени между первым экспериментом на проростках и данным экспериментом было проведено еще 2 полноценных вегетационных экспериментов (с картофелем 30 сут и горчицей 21 сут) с поддержанием влажности почвы на уровне 60% ППВ. В промежутках между данными экспериментами почвенные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния. Следовательно, почва подвергалась переменному инкубированию, что способствовало разложению гербицидов. Интерес представляла остаточная фитотоксичность почвы через 11 мес. после внесения гербицидов. Принципиальное отличие биотеста 1 и биотестов

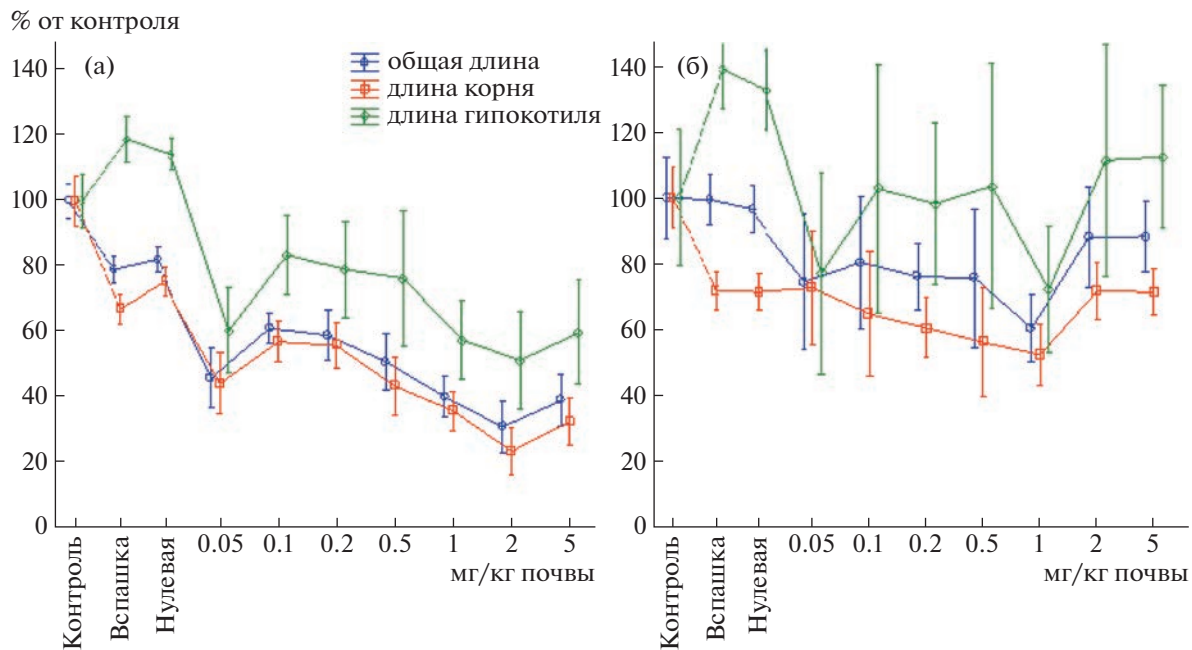


Рис. 3. Результаты прорастивания (длина проростков, корней и гипокотилей люпина белого при биотестировании (72 ч, 20°C), % от контроля) на полевых образцах дерново-подзолистой почвы при ее разной обработке (вспашке, нулевой) через 5 сут после внесения гербицидов Алистер Гранд (а) и Магнум (б) в сравнении со шкалой концентраций данных гербицидов в почве. Планками погрешностей показаны границы доверительных интервалов при $p < 0.05$. То же на рис. 4, 5.

2 и 3 было в том, что в первом случае фитотоксичность почвы оценивали по длине корней, во втором и третьем — по длине (высоте) надземной части растений и их биомассе. В данном случае корни не учитывали, т.к. их было трудно извлечь из вегетационных сосудов без повреждения.

Под воздействием остаточных количеств гербицида в почве всходы люпина в течение всего эксперимента значительно отставали в росте от контрольного варианта без гербицидов (рис. 4а). Через 5 сут после посева различия между вариантами были еще не достоверными, но, начиная со 2-й нед, угнетающий эффект присутствия гербицида в почве был явным. Всходы люпина хуже всего развивались в варианте нулевой обработки + Магнум, где высота растений, начиная с 10-х сут наблюдения была на 30–40% меньше, чем в контрольном варианте (рисунок 4б), в то время, как в других вариантах опыта с гербицидами снижение роста составляло 20–30% по сравнению с контролем.

Биотест 2 был начат через 330 сут после внесения гербицидов в полевых условиях и завершен через 351 сут. По результатам биотеста 2 можно сделать вывод, что спустя почти год после внесения гербицидов Магнум и Алистер Гранд, их остаточные количества в почве все еще оказывали фитотоксическое действие на рост растений люпина белого. В этом эксперименте наиболь-

шую фитотоксичность наблюдали в варианте нулевой обработки + Магнум.

Биотест 3. Спустя еще 12 мес. после вегетационного эксперимента с люпином и после проведения еще 2-х серий попеременного инкубирования тех же самых почвенных образцов во влажном и сухом состоянии был заложен следующий вегетационный эксперимент на тест-культуре маша. Данный сет биотестирования в вегетационных сосудах был начат через 730 сут после внесения гербицидов в полевых условиях и закончен через 758 сут. Таким образом, с момента применения гербицидов прошло около 2-х лет, и до посева семян маша были проведены суммарно 4 серии биотестов с использованием различных тест-культур. Тем не менее, по истечении этого срока почва все еще обладала остаточной фитотоксичностью по отношению к тест-культуре маша.

Так же, как и всходы люпина в биотесте 2, всходы маша под воздействием остаточных количеств гербицида в почве в течение всего эксперимента значительно отставали в росте (рис. 5а). Контрольные растения на почве без гербицида опережали в росте тест-культуру на загрязненной почве в начале эксперимента на 40%, к концу эксперимента — на 20% (рис. 5б). Различные варианты примененного гербицида и обработки почвы в данном эксперименте по отклику тест-растений различались между собой незначимо. Это свиде-

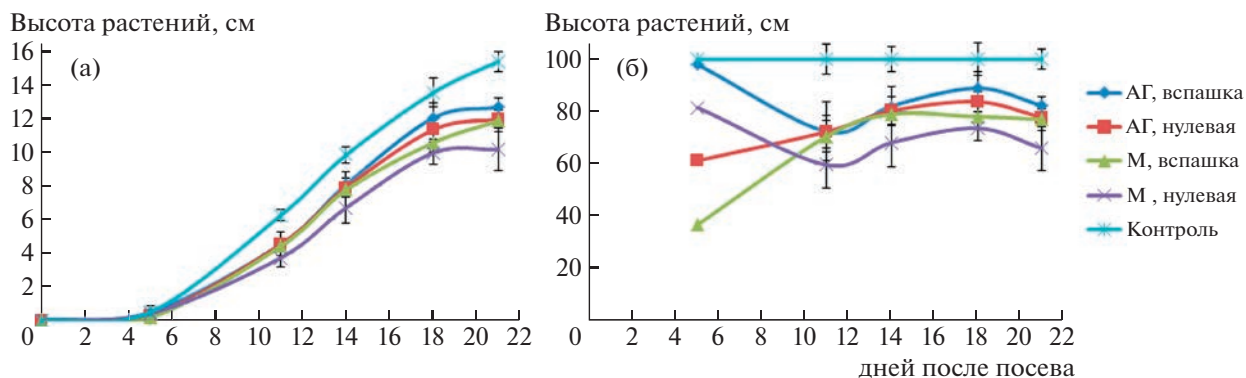


Рис. 4. Прирост тест-культуры люпина в высоту в присутствии остаточных количеств гербицидов Алистер Гранд (АГ) и Магнум (М) в почве через 330 сут после внесения гербицидов в сравнении с контролем без гербицида при биотестировании полевых образцов почвы в лабораторных условиях: (а) – высота растений, см, (б) – сопоставление высоты тестовых растений, % от контроля.

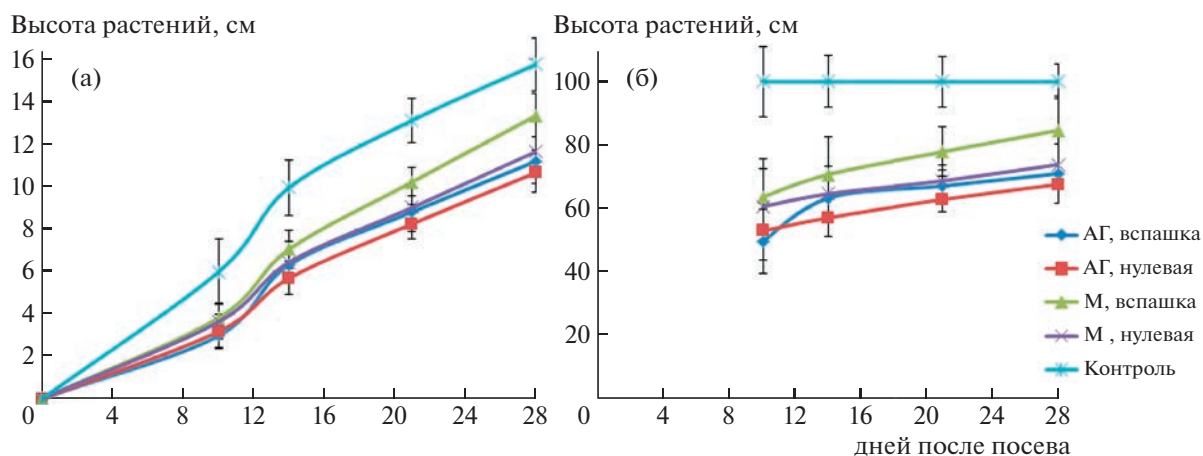


Рис. 5. Прирост тест-культуры маша в высоту в присутствии остаточных количеств гербицидов Алистер Гранд (АГ) и Магнум (М) в почве через 730 сут после внесения гербицидов в сравнении с контролем без гербицида при биотестировании полевых образцов почвы в лабораторных условиях: (а) – высота растений, см, (б) – сопоставление высоты тестовых растений, % от контроля.

тельство о том, что остаточная фитотоксичность стабилизировалась на примерно совпадающем уровне во всех вариантах, вызывая отставание в росте тест-культуры в среднем на 20–30%.

Помимо оценки высоты растений после завершения биотестов 2 и 3 был произведен учет биомассы и вычислено относительное содержание влаги в растениях (табл. 3). Сырая биомасса тест-растений и содержание влаги в них также были на 20–30% меньше при воздействии остаточных количеств гербицидов (табл. 1) по сравнению с тест-растениями на чистой почве без гербицидов. Судя по снижению биомассы, тест-культура маша была более чувствительной по отношению к остаточным количествам гербицидов, чем тест-культура люпина белого.

Двухлетнее попеременное инкубирование почвы во влажном и сухом состоянии в лабора-

торных условиях с выращиванием тест-культур лишь отчасти отражало естественные почвенные условия в поле, хотя и служило имитацией смены культур и условий в севообороте. Результаты представленного эксперимента дали возможность сделать выводы о процессах детоксикации почвы после применения гербицидов класса сульфонилмочевин и о возможных последствиях их применения в севообороте. В полевых условиях гербициды этой группы также проявляли достаточно высокую персистентность, что требует дополнительного изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам 3-х сетов биотестирования почвы на бобовых культурах (люпина белого и маша) методом проростков (инкубирование 72 ч)

Таблица 3. Сырая биомасса тест-растений (% от контроля) и содержание в них влаги (%) в конце эксперимента при воздействии остаточных количеств гербицидов Алистер Гранд (АГ) и Магнум (М) в дерново-подзолистой почве

Вариант	Биомасса сырая, % от контроля		Содержание влаги в растениях, %	
	люпин (биотест 2)	маш (биотест 3)	люпин (биотест 2)	маш (биотест 3)
Контроль без обработки	100 ± 7 ^{а*}	100 ± 8 ^а	88.5 ± 1.1 ^а	90.0 ± 0.9 ^а
АГ, вспашка	81.3 ± 7.1 ^б	57.7 ± 13 ^б	77.5 ± 3.3 ^б	82.1 ± 2.6 ^б
АГ, нулевая	76.0 ± 5.7 ^б	53.9 ± 7.7 ^б	73.8 ± 4.7 ^б	80.0 ± 2.5 ^б
М, вспашка	77.7 ± 5.8 ^б	55.7 ± 16.0 ^б	76.3 ± 4.4 ^б	82.9 ± 5.4 ^б
М, нулевая	71.3 ± 9.0 ^с	58.3 ± 25.0 ^б	69.5 ± 7.3 ^б	74.2 ± 6.1 ^б

*Для каждого столбца таблицы варианты опыта, отличающиеся друг от друга достоверно (при $p < 0.05$), помечены разными буквами.

и методом вегетационного эксперимента (длительность 3–4 нед) было показано, что при применении гербицидов класса сульфонилмочевин Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД в рекомендованных дозах остаточная фитотоксичность слабокислой легкосуглинистой агродерново-подзолистой почвы может сохраняться до 2-х лет после применения указанных препаратов. Это проявлялось в угнетении роста использованных тест-культур на 20–30% по сравнению с контрольной группой растений, выращенной по той же технологии и на той же почве без применения гербицидов. Способ обработки почвы (вспашка или нулевая обработка) не оказывал значимого влияния на скорость детоксикации гербицидов в почвенных образцах, определенную методами биотестирования в лабораторных условиях, и через 2 года после применения гербицидов отклик тест-растений на остаточную токсичность почвы был одинаковым.

Авторы выражают благодарность коллегам из РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева за поддержку и сотрудничество научных коллективов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожкина Л.А., Поддымкина Л.М. Применение гербицидов и регуляторов роста в защите растений: учеб. пособ. М.: МЭСХ, 2021. 206 с.
2. Маханькова Т.А., Долженко В.И. Современный ассортимент гербицидов для защиты зерновых культур // Защита и карантин раст. 2013. № 10. С. 46–50.
3. Куликова Н.А., Лебедева Г.Ф. Гербициды и экологические аспекты их применения: учеб. пособ. М.: Кн. дом “ЛИБРОКОМ”, 2010. 152 с.
4. Спиридонов Ю.Я., Ларина Г.Е. Последствие гербицидов на основе сульфурон-метила // Защита и карантин раст. 2003. № 3. С. 30–31.
5. Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Сайфуллина Л.Б., Ленович Д.Р., Султанов А.С. Последствие гербицидов и динамика их разложения в различных агроландшафтах // Аграр. научн. журн. 2019. № 4. С. 27–31.
6. Чкаников Н.Д., Спиридонов Ю.Я., Халиков С.С., Музафаров А.М. Пути снижения фитотоксичности остатков сульфонилмочевин в почве с помощью антидотов // Агрохимия. 2020. № 5. С. 86–96.
7. Лебедев В.Б., Стрижков Н.И. Последствие гербицидов в севообороте // Агро XXI. 2007. № 4–6. С. 43–44.
8. Чернуха В.Г., Долженко В.И. Действие гербицидов на основе сульфонилмочевин на сорные и нецелевые растения // Изв. СПбГАУ. 2009. № 14. С. 10–15.
9. Милевская И.А. Эффективность применения препаратов на посевах пшеницы и их последствие на культуры зернопропашного севооборота // Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн. 2013. № 1. С. 121.
10. Березко М.Н. Последствие сульфонил-мочевинных гербицидов на последующие культуры севооборота // Пробл. механиз. Агрохим. обслуживания сел. хоз-ва. 2014. № 6. С. 113–117.
11. Дворянkin Е.А. Последствие гербицидов, применяемых на предшественнике, на растениях сахарной свеклы // Сахар. свекла. 2018. № 6. С. 27–31.
12. Стецов Г.Я. Последствие гербицидов в Западной Сибири // Защита и карантин раст. 2015. № 3. С. 17–19.
13. Филиппов А.В., Спиридонов Ю.Я. Гербицидные токсикозы картофеля // Защита и карантин раст. 2014. № 3. С. 44–46.
14. Спиридонов Ю.Я., Никитин Н.В., Протасова Л.Д., Абуликеров В.А., Спиридонова Г.С., Калимуллин А.Т., Спиридонова И.Ю., Босак Г.С. Итоги многолетнего изучения осеннего применения гербицидов в посевах озимой пшеницы в условиях центрального Нечерноземья РФ // Агрохимия. 2017. № 8. С. 53–67.
15. PPDB: Pesticide Properties DataBase <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/>
16. Шадрин Е.Г., Солдатова В.Ю., Макаров В.С. Биомониторинг: оценка качества среды. Новосибирск: Наука, 2017. 240 с.

17. Труфанов А.М., Шукин С.В., Воронин А.Н. Оценка влияния агротехнических приемов на состояние почвы методом биотестирования // Вестн. АПК Верхневолжья. 2022. № 2 (58). С. 5–11.
18. Al-Zahrani H.S., Alharby H.F., Hakeem K.R., Rehman R.U. Exogenous application of zinc to mitigate the salt stress in *Vigna radiata* (L.) Wilczek – evaluation of physiological and biochemical processes // Plants. 2021. V. 10. 1005. <https://doi.org/10.3390/plants10051005>
19. Дубинкина Е.А., Беляев Н.Н. Люпин белый и люпин узколистный в условиях Тамбовской области // Зернобоб. и круп. культуры. 2018. № 1 (25). С. 103–106.
20. Блинник А.С., Демидова А.Г., Лукашевич М.И., Артемова О.Ю., Наумкин В.Н., Наумкина Л.А. Сравнительное испытание сортов и образцов люпина белого селекции ВНИИ люпина в Центральном черноземном регионе // Зернобоб. и круп. культуры. 2022. № 3 (43). С. 41–49.
21. Яговенко Г.Л., Захарова М.В., Лукашевич М.И. Потенциал зерновой продуктивности люпина белого и его реализация в условиях Центральной нечерноземной зоны России // Зернобоб. и круп. культуры. 2020. № 2 (34). С. 35–40.
22. Конончук В.В., Никиточкин Д.Н., Тимошенко С.М., Назарова Т.О., Штырхунов В.Д., Шуркин А.Ю., Колотилина З.М. Зерновая продуктивность и азотфиксирующая способность люпина узколистного в зависимости от норм высева, удобрений и применения гербицидов при разных погодных условиях в центре Нечерноземной зоны России // Зернобоб. и круп. культуры. 2021. № 2 (38). С. 104–114.
23. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации в 2020 г. ГОСТ 32627-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения. Испытание на фитотоксичность (OECD, Test № 227: 2006, IDT). 2015. 20 с. ГОСТ 33061-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения: тест на всхожесть семян и развитие проростков (OECD, Test № 208: 2006, IDT).
24. Мельников А.В., Железова С.В. Традиционная вспашка или нулевая технология – что выгоднее для производства озимой пшеницы в Нечерноземной зоне России? // Теор. и прикл. пробл. АПК. 2019. № 1. С. 35–40. <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1-35-40>

Effect of Sulfonylureas Residues on the Lupine and Vigna Seedlings Development during Biotesting Research on Sod-Podzolic Soil

S. V. Zhelezova^a, V. N. Kolupaeva^a, E. V. Stepanova^{a, #}, A. V. Melnikov^b,
M. A. Voronov^c, A. E. Stepanova^a, and V. E. Veller^{a, c}

^aAll-Russian Scientific-Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, pos. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Moscow Russia

^bFederal Research Center “Nemchinovka”
ul. Kalinina 1, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Novoivanovskoye 143013, Moscow Russia

^cRussian State Agrarian Academy – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127550, Russia

[#]E-mail: jacky-st@yandex.ru

In a series of consecutive vegetation experiments on biotesting on samples of sod-podzolic cultivated soil after its treatment with herbicides from the class of sulfonylureas: Magnum, VDG, metsulfuron-methyl 600 g/kg, manufactured by August and Alistair Grand, MD, diflufenican 180 g/l + mesosulfuronmethyl 6.0 g/l, iodosulfuron-methyl-sodium 4.5 g/l + mephenpyrdiethyl 27 g/l (antidote), manufactured by Bayer. The residual phytotoxicity of these preparations for seedlings of sensitive cultures of white lupin (*Lupinus albus*) and masha (*Vigna radiata*) was studied. The initial soil samples were taken in the field on the 5th day after herbicides were applied in the field in winter wheat crops using 2 different tillage technologies: traditional on the basis of dump plowing and zero tillage. According to the results of biotesting samples at a temperature of 20°C and humidity at the level of 60% soil moisture capacity, it was shown that the half-life of herbicides (DT_{50}) was reached after 40 ± 3 days of incubation, and detoxification to the level of 70–80% occurred 200–240 days after the introduction of herbicides into the soil. Regardless of the method of tillage and the applied herbicide, 2 years after the application of herbicides, the suppression of test crops at the level of $>10\%$ of the control was detected. White lupin and mash are highly sensitive to the effects of micro-quantities of herbicides of the sulfonylurea group, therefore it is recommended to use these test cultures to determine the residual phytotoxicity of the soil. The manifestation of the aftereffect of sulfonylureas on legumes is shown, which is important even in specialized crop rotations designed for zero tillage.

Keywords: sulfonylureas, residual phytotoxicity, herbicide aftereffect, white lupin (*Lupinus albus*), mash (*Vigna radiata*).

УДК 632.95:633.854.78

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕСТИЦИДОВ В ЗАЩИТЕ ПОДСОЛНЕЧНИКА ОТ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

© 2023 г. А. Б. Лаптев^{1,2,*}, В. К. Мальцев^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

²ООО “Инновационный центр защиты растений”
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, ул. Пушкинская, 20, литера А, помещ. 7-Н, Россия

*E-mail: laptiev@icrzr.ru

Поступила в редакцию 07.06.2023 г.

После доработки 22.07.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Представлен анализ современного состояния и тенденций к развитию ассортимента пестицидов, разрешенных к применению в посевах подсолнечника. Исходя из результатов проведенных в 3-х почвенно-климатических зонах страны исследований, аргументированы возможности и определены приоритеты совершенствования ассортимента препаратов для защиты данной культуры от основных вредных организмов, главные из которых — это увеличение доли комбинированных и отечественных препаратов. При этом конкретизирована биологическая эффективность мероприятий по защите в отношении отдельных видов вредителей, основных болезней и сорной растительности, а также представлена характеристика последних разработок методов контроля остаточных количеств ряда действующих веществ пестицидов, применяемых в защите подсолнечника. По итогам проведенных полевых опытов установлено, что в настоящее время уровень биологической эффективности при защите главной масличной культуры от вредителей характеризуется в большинстве своем показателями близкими к 80%, от болезней — изменяется в интервале 60–75% и от сорняков — достигает 90% в сочетании со снижением их сырой массы до 95%.

Ключевые слова: пестициды, подсолнечник, вредные организмы, ассортимент препаратов, регламенты применения, биологическая эффективность, остаточные количества пестицидов.

DOI: 10.31857/S0002188123110078, **EDN:** PPFCCK

ВВЕДЕНИЕ

Объемы применения средств защиты в посевах подсолнечника в последнее время имеют тенденцию к постоянному росту. Это связано не только с расширением площади, которая, по данным Росстата, может превышать 8 млн га занимаемой этой экономически выгодной культурой, но и с активизацией деятельности или расширением ареала обитания ряда вредителей и распространения возбудителей болезней. Усложнению ситуаций в посевах в дополнение к этому способствуют нарушения научно обоснованных схем севооборотов и, как следствие, размещение культуры после сложных предшественников; использование не районированных и экологически не адаптированных сортов и гибридов, а также тождественность состава комплекса (многоядные вредители, некоторые болезни, как двудольные, так и злаковые сорняки) вредных организмов с посевами других культур. Сюда следует добавить еще и ак-

тивно идущее сокращение количества и параметров механических обработок почвы перед посевом и в самих посевах на фоне предпочтения сельхозпроизводителями комбинаций, состоящих из гербицидов на основе трибенурон-метила или имидозелинонов и устойчивых к ним гибридов подсолнечника.

Содержание современного ассортимента средств защиты растений, разрешенных к применению на подсолнечнике в РФ, располагает при этом наличием регистрации средств для защиты его посевов от комплекса вредителей, основных болезней и практически от всего набора сорных растений. Кроме того, подсолнечник выступает одним из основных потребителей десикантов, поскольку регионы его возделывания постепенно расширяются в северном, вплоть до Московской обл., направлении и на северо-восток.

Исходя из содержания ассортимента пестицидов, чисто биологический блок в этом случае

ограничен инсектицидами в составе Лепидоцида в 3-х (П, СК и Ж) препаративных формах, Инсептима Ж (титр не менее 2×10^9 КОЕ/см³), Биослипа БТ, П (титр не менее 1×10^{10} КОЕ/г), Дефилигнума СК (титр не менее 10^{10} КОЕ/мл) и трехкомпонентного Биостопы Ж (БА-2000 ЕА/мл, титр не менее $10^9 + 10^8 + 10^8$ КОЕ/мл), созданными главным образом с использованием штаммов *Bacillus thuringiensis* и предназначенных только для защиты подсолнечника от гусениц младших возрастов лугового мотылька и/или хлопковой совки; и 4-мя фунгицидами, содержащими в своей основе определенные штаммы бактерий *Bacillus subtilis* или *Trichoderma harzianum*. При этом Баксис Ж (титр не менее 10^9 КОЕ/мл) в рамках регламентации можно использовать путем обработки семенного материала в защите от серой и белой гнилей, плесневения семян, альтернариоза, Стернифаг СП (титр не менее 10^{10} КОЕ/г) – против белой, серой, фузариозной корневой и гнилей всходов через внесение в почву перед посевом, Алирин-Б Ж (титр не менее 10^9 КОЕ/мл) – в борьбе с белой и серой гнилями способом опрыскивания вегетирующих растений [1].

В результате в наборах средств для защиты подсолнечника во всех (инсектициды, фунгициды и гербициды) группах преобладают химические средства (ХСЗР). Обобщенный объем их расхода на культуре при средней нагрузке в 2022 г., соответствующей, по данным МСХ РФ, 1.34 кг препарата/га [2], может составлять от 10 до 12 тыс. т.

Применение такого объема химических средств усложняет оценку безопасности получаемой продукции, и особенно это касается урожая после обработок посевов несколькими или комбинированными препаратами и проведения десикации. Отсюда существует необходимость в разработке и внедрении в практику новых методов, позволяющих анализировать остаточные количества сразу 2-х и более действующих веществ (д.в.) и основанных на современной приборной базе [3]. Цель работы – изучение эффективности и безопасности пестицидов в защите подсолнечника от вредных организмов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы в исследовании были представлены препаратами, уже прошедшими регистрацию или находящимися на этапе изучения в плане использования в защите подсолнечника, из всех 3-х групп средств борьбы с вредными организмами и десикантами. Эксперименты, по результатам которых проведена на культуре оценка био-

логической, хозяйственной эффективности и безопасности целого ряда современных пестицидов, проведены в нескольких регионах страны с охватом 3-х почвенно-климатических зон. В соответствии с положениями утвержденных методических указаний по регистрационным испытаниям пестицидов [4–6] полевые опыты проводили на базе делянок площадью 25–50 м². Действие каждого препарата на вредные объекты изучали в течение не менее 2-х лет в посевах сортов и гибридов, адаптированных к конкретным условиям региона. В процессе контроля за распространением и развитием отдельных видов вредителей и основных болезней использовали также рекомендации ВНИИЗР [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В целом современное состояние ассортимента пестицидов для защиты основной масличной культуры базируется на наличии в регистрации >300 препаратов (табл. 1), из которых в производстве чаще других все же востребованы средства борьбы с болезнями и сорной растительностью [8, 9]. Такое положение выступает последствием того, что культура практически во всех регионах возделывания засорена и двудольными, и злаковыми сорняками, а также в течение вегетации ежегодно подвержена воздействию со стороны минимум 2-х способных создать угрозу урожаю видов вредителей и развитию на опасном (снижение урожайности >7%) уровне до 3-х болезней [8, 9]. При этом в сочетании с сорной растительностью и плесневением семян на подсолнечнике чаще всего возникает потребность бороться с многоядными (проволочниками, долгоносиками, луговым мотылком) вредителями, а из болезней – с ложной мучнистой росой, альтернариозом, фомопсисом, белой и серой гнилями.

В современных условиях элементы защиты в технологиях возделывания подсолнечника развиваются довольно активно. Наиболее радикальными моментами следует считать внедрение гибридов, позволяющих безопасно для культуры на начальных этапах ее вегетации использовать гербициды на основе сульфонилмочевин (трибенурон-метил, этаметсульфурон-метил) и имидазолинонов (имазамокс, имазапир, имазетапир) [10–12], а также расширение в целом линейки и использования комбинированных препаратов прежде всего для обработки семян и особенно таких как Модесто Плюс КС (клотианидин 300 г/л + флуопиколид 120 г/л + флуоксастробин 90 г/л), которые обладают одновременно инсектицидным и фунгицидным действиями, обеспечивая защиту от

Таблица 1. Количественное содержание ассортимента пестицидов для защиты посевов подсолнечника (Государственный каталог пестицидов, май 2023 г.)

Препарат	Инсектициды	Фунгициды	Гербициды	Десиканты	Регуляторы роста
Всего, в том числе	55	62	181	34	31
комбинированных	12	46	34	на основе диквата – 29	для обработки семян – 20
	биорациональных – 6 для обработки семян – 28	биорациональных – 3 для обработки семян – 24	для борьбы с двудольными – 26, злаковыми – 56, двудольными и злаковыми – 98		вегетирующих растений – 21

проволочников, плесневения семян, ложной мучнистой росы, белой и серой гнилей.

На данный момент, о чем свидетельствует содержание ассортимента пестицидов, разрешенных к применению на территории РФ [1], подсолнечник практически полностью обеспечен химическими средствами защиты. На этом фоне важным остается повышение и стабилизация по некоторым позициям показателей эффективности защитных мероприятий, а также обеспечение и контроль их безопасности для самой культуры и окружающей среды.

Возвращаясь к ассортименту, следует отметить, что в арсенале культуры ведущее место по главным (набору, спектру действия, эффективности) показателям явно занимают средства борьбы с сорной растительностью. В их составе только комплект разрешенных к использованию в схеме “гербицид + устойчивый к нему гибрид” содержит 30 препаратов, содержащих имазамокс и/или имазапир и 14 наименований – трибенурон-метил. Пять лет назад, т.е. в каталоге 2017 г. таковых в регистрации было только 19 наименований. Далее 69 препаратов (без учета глифосатов) гербицидов предназначены для предпосевной и довсходовой обработок почвы и 51 – имеют чисто противозлаковое назначение. Соответственно этому делению по химическому составу преобладают препараты (24 и 7 единиц) на основе д.в. из химического класса хлорацетамидов (С-метолахлор и пропизохлор), среди которых в последнее время на культуре изучены и уже зарегистрированы отечественные разработки, в частности, препараты Грасс КС, Ирвин СЭ, Ацетал Про КЭ и Питон КЭ. Эту группу для опрыскивания почвы до посева, одновременно с посевом или до всходов культуры гербицидов дополняют 18 препаратов (в том числе российские Гамбит СК, Сармат КС и Бриг КС) на основе прометрина. Средства в

количестве 23 наименований (прежде всего отечественные Легион Комби КЭ, Цензор Макс МКЭ, Граминион КЭ, Макси Злак КЭ) на основе клетодима и 7-ми препаратов (из них Таргет Супер КЭ, Форвард МКЭ и Миура КЭ – также отечественные) с действующим веществом хизалофоп-П-этил предназначены для воздействия на нежелательную злаковую растительность. В дополнение к ним уже есть комбинированные (клетодим + хизалофоп-П-этил) противозлаковые гербициды Лигат КЭ (150 + 65 г/л) и Эволюшн КЭ (140 + 70 г/л), а также Квикстеп МКЭ (130 + 80 г/л) и Акцент КЭ (150 + 75 г/л), сочетающие тот же клетодим и галоксифоп-Р-метил.

Результативность гербицидных обработок, исходя из данных опытов, проведенных в 3-х почвенно-климатических зонах страны, подтверждена как биологическими, так и хозяйственными показателями (табл. 2).

Обобщенные материалы указывали прежде всего на наличие в посевах культуры >100 шт. сорняков/м² с преобладанием однолетних видов растений. На этом фоне эффективность гербицидов, примененных до всходов культуры, соответствовала в основном 80%. Причем прием оставался востребованным, и линейка препаратов на основе и прометрина, и С-метолахлора постоянно поддерживается как за счет новых гербицидов, так и по результатам перерегистрации уже известных. Более же высокие (стабильно превышают 90%) результаты в борьбе с большинством видов малолетних (особенно злаковых) сорняков обеспечивают обработки по вегетирующим растениям. В сочетании с этим в экспериментах уменьшение массы растений в обеих биологических группах соответствовало интервалу 90–95%. Позитивные последствия применения гербицидов выразились еще и в объемах сохраненного урожая. Однозначно и стабильно хозяйственный эф-

Таблица 2. Эффективность гербицидов и десикантов в посевах подсолнечника

Гербициды на основе д.в.	Вредные организмы	Плотность сорняков, экз./м ²	Биологическая эффективность	Хозяйственная эффективность
			%	
Обработки до всходов культуры				
Прометрина	Однолетние двудольные и злаковые	132 ± 22	74.9 ± 4.8	11.3 ± 1.6
Пропизохлора	Однолетние двудольные и злаковые	123 ± 16	80.5 ± 3.8	12.9 ± 1.3
С-Метолахлора	Однолетние двудольные и злаковые	131 ± 18	73.4 ± 3.5	19.2 ± 5.4
С-Метолахлора + тербутилазина	Однолетние двудольные и злаковые	107 ± 10	83.7 ± 2.6	16.3 ± 2.8
Обработки посевов				
Трибенурон-метила	Однолетние и многолетние двудольные	80 ± 7	83.5 ± 3.0	17.3 ± 3.6
Этаметсульфурон-метила	Однолетние и многолетние двудольные	56 ± 5	75.6 ± 2.5	20.2 ± 3.1
Имазамокса + имазапира	Однолетние двудольные и злаковые	148 ± 33	91.8 ± 2.6	24.2 ± 5.0
Галоксифоп-Р-метила	Однолетние и многолетние злаковые	117 ± 40	93.1 ± 4.0	27.9 ± 8.0
Клетодима	Однолетние и многолетние злаковые	139 ± 41	92.7 ± 3.3	30.9 ± 11.1
Десикация посевов (снижение влажности)				
Диквата (дибромида)	—	—	31.4 ± 3.6	−1.8 ± 0.7
Глюфосината аммония	—	—	24.9 ± 4.8	−3.1 ± 1.1

фект превышал 10%-ный уровень и довольно существенно (до 3-х раз) возрастал в условиях преобладания злаковых сорняков.

Достаточно широко на подсолнечнике распространён и такой приём как десикация посевов. Основопологающим фактором мероприятия выступает снижение влажности прежде всего семян на момент уборки и проводят его на подсолнечнике на этапе начала побурения корзинок. Приём предполагает также воздействие в направлении приостановки развития на корзинках белой и серой гнилей [13]. В этом случае основная масса препаратов создана с использованием диквата (дибромида), из которых >1/3 (10 из 27) приходится на отечественных регистрантов. Это прежде всего препараты Голден Ринг ВР, Суховой ВР, Дикошанс ВР и Тонгара ВР, содержащие дикват 150 г/л. В проведенных с ними опытах показатели по снижению влажности урожая культуры в относительных величинах достигали 30% (табл. 2) в отсутствие существенных (снижение в среднем 2–3%) изменений урожайности и гарантирован-

ной минимализации потерь при уборке во влажных условиях.

Среди средств для ограничения развития и распространения болезней в посевах подсолнечника однозначно (75%) преобладают комбинированные препараты, из которых 7 уже содержат по 3 д.в. В рамках модернизации набора в последние годы были представлены разработки регламентов применения на культуре таких отечественных фунгицидов, как Титул Трио ККР (160 + 80 + 80 г/л) – 0.4–0.6 л/га, Стробитек Мульти КС (150 + 125 г/л) – 0.8–1.0 л/га и Мистерия МЭ (80 + 80 + 40 г/л) – 1.0–1.25 л/га. Спектр воздействия данных препаратов охватывает альтернариоз, белую и серую гнили, фомоз и ржавчину. На более широкий набор болезней, дополненный плесневением семян, фузариозной корневой гнилью, ложной мучнистой росой и фомопсисом, возможно влиять за счёт препаратов, предназначенных для обработки семян. По итогам проведенных опытов, обновление линейки препаратов в этом случае произошло прежде всего в результа-

Таблица 3. Эффективность мероприятий по защите подсолнечника от основных болезней

Вредный организм	Развитие или распространение болезни	Биологическая эффективность	Хозяйственная эффективность
		%	
Обработка семян			
Ложная мучнистая роса	8.2 ± 1.8	56.4 ± 4.1	10.5 ± 1.7
Белая гниль	7.9 ± 1.3	48.3 ± 5.0	
Обработка вегетирующих растений			
Ржавчина	17.0 ± 3.5	69.7 ± 2.5	8.6 ± 0.8
Альтернариоз	20.3 ± 2.1	77.6 ± 2.2	
Фомоз	18.7 ± 1.9	66.6 ± 2.2	
Фомопсис	12.3 ± 1.4	79.0 ± 2.8	
Серая гниль	12.5 ± 1.6	46.2 ± 5.2	
Белая гниль	13.6 ± 1.8	51.4 ± 3.0	

Таблица 4. Биологическая эффективность мероприятий по защите подсолнечника от вредителей

Вредные организмы		Количественные показатели присутствия вредителей	Снижение показателей, %
Проволочники		4.9 ± 0.6 экз./м ²	79.4 ± 2.7
Подгрызающие совки	обработка семян	$2.9 \pm 0.8\%$ повреждения растений	80.3 ± 1.3
	обработка по всходам	$4.9 \pm 0.6\%$ повреждения растений	77.6 ± 1.2
Долгоносики		$3.8 \pm 0.2\%$ повреждения растений	73.5 ± 2.1
Луговой мотылек		20.7 ± 0.4 гусениц/м ²	82.9 ± 1.2
Хлопковая совка		17.3 ± 4.6 гусениц /10 растений	82.1 ± 1.3
Тли		93.9 ± 23.8 экз./10 листьев	84.7 ± 1.9
Клопы		12.6 ± 1.7 экз./растение	83.9 ± 2.0
Подсолнечниковая огневка		56.9 ± 12.9 повреждения семян/на корзинку	78.0 ± 12.9

те регистрации протравителей Тирада СК (400 + 30 г/л), Брандер КС (200 + 160 г/л), Мессер МЭ (25 + 210 г/л) и Гераклион КС (400 + 25 + 15 г/л) опять же российских производителей.

Уровни биологической эффективности фунгицидов в отношении практически всех основных болезней подсолнечника сосредоточены главным образом в интервале 60–75% (табл. 3). При этом в среднем самые низкие показатели относятся к воздействию на распространение серой гнили и обеих (стеблевой и корзиночной) форм белой гнили. Чаще всего результативность в этом случае равна 50–60%. Как следует из вышеизложенного, действие препаратов непременно охватывает сразу несколько болезней и в итоге это позволяет сохранять только от ограничения развития патогенов в пределах 10% урожайности подсолнечника.

В отличие от фунгицидов, где практикуют обработку семян и применение в период вегетации, у инсектицидов в отдельный прием выделено еще и опрыскивание всходов [8]. Это связано с более четким распределением присутствия отдельных видов насекомых в течение вегетации культуры. Соответственно в защите ее посевов от вредителей совмещения могут касаться воздействия на проволочников (*Agriotes sputator* L., *Athous lineatus* L. и др.), подгрызающих совков (*Scotia* spp.) и долгоносиков (*Tanymecus* spp.) через обработку семян или последних 2-х объектов путем применения инсектицидов по всходам. Против других, обозначенных в табл. 4 вредителей, обработки возможно проводить в рамках единовременного воздействия не более чем на 2 вида.

По результатам исследований, проведенных сразу в нескольких (Алтайский и Краснодарский края, Волгоградская, Ростовская, Саратовская,

Белгородская и Орловская обл.) регионах страны, определены количественные показатели присутствия основных видов вредителей и эффективность защитных мероприятий в отношении каждого из них. Обращает внимание тот факт, что в агроценозе культуры основательно (в среднем >2 гусениц/растение) и сразу в 2-х почвенно-климатических зонах страны разместились хлопковая совка (*Helicoverpa armigera* Hbn.) и заметно (>50 поврежденных семян/на корзинку) возросло количество повреждений, наносимых подсолнечниковой огневкой (*Homoeosoma nebulosa* Hb.). Эта реальность послужила причиной активизации в этом направлении процесса регистрации инсектицидов для защиты подсолнечника.

По итогам сравнительных тестирований и изучения эффектов уже выделен набор препаратов для борьбы с хлопковой совкой, в который включены такие инсектициды, как Сэмпай КЭ (50 г/л), Амплиго МКС (50 + 100 г/л), Эсперо КС (200 + 120 г/л), Кинфос КЭ (300 + 40 г/л) и Стиллет МД (100 + 40 г/л). Два последних препарата наряду с Готикой КС (106 + 141 г/л) и Авантом КЭ (150 г/л) зарегистрированы в том числе для опрыскивания всходов подсолнечника в борьбе с долгоносиками и подгрызающими совками. В экспериментах 2-х последних лет, наряду с уже зарегистрированными препаратами Кораген КС (200 г/л) и Ланнат СП (250 г/кг), разработаны регламенты применения в борьбе с подсолнечниковой огневкой новых (Фосорган Дуо КЭ и Радиант КС) инсектицидов, которые обеспечивали снижение численности вредителя в интервале от 78 до 93%. Наряду с этим, на что однозначно указывали данные табл. 4, в результате обработок в период вегетации культуры, направленных на ограничение присутствия других вредителей, в опытах присутствовали близкие эффекты.

Обработка семян в целом как способ использования пестицидов способствует стабилизации уровня защиты и обладает наличием инновационного ресурса в сравнении с опрыскиванием посевов. Поэтому основная масса (26 препаратов или 50% ассортимента) инсектицидов, разрешенных к применению на подсолнечнике, определена для обработки семян. Прием гарантированно позволяет защитить растения на ранних этапах развития от всех почвообитающих вредителей и подгрызающих совков. По результатам изучения эффектов от применения в разных почвенно-климатических условиях целого ряда, в том числе современных комбинированных препаратов Модесто Плюс КС (300 + 120 + 90 г/л), Табу Супер СК (400 + 100 г/л) и нового Фортенза КС (600 г/л), инсектицидов определено их фактиче-

ское действие, которое в общем соответствует снижению численности вредных насекомых или поврежденности растений на уровнях, близких к 80%. В дополнение к этому размещение инсектицидов на семенах обеспечивает снижение экологических рисков [14], например, исходя из регламентов для комбинированных препаратов на 1 га посева, их попадает от 0.03 до 0.075 л и от 0.15 л — при обработках вегетирующих растений, и практически полностью исключается влияние на природных энтомофагов и опылителей, постоянно в массе присутствующих в травостое подсолнечника. В хозяйственном плане эффекты от применения инсектицидов на культуре обособить, как и вредоносность насекомых [8], сложно, но даже элементарное сохранение изначальной густоты растений в посеве обеспечивает уменьшение рисков снижения ее урожайности.

Еще один важный момент в производстве подсолнечника связан с безопасностью не только самого урожая культуры, но и получаемого из него масла. В первую очередь проблема сохранения остатков пестицидов в продукции касается поздних обработок и, соответственно, применения десикантов. Важным этапом на пути ее решения должно считать разработанную ВИЗР совместно с ООО «ИЦЗР» методику в области высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с применением масс-спектрометрического детектирования для определения диквата, в том числе в семенах подсолнечника и растительных маслах [15]. Наряду с этим уже прошли метрологическую экспертизу методы для определения остаточных количеств в семенах и масле подсолнечника путем ВЭЖХ гербицидного действующего вещества аклонифен и инсектицидного — дифлубензурана, а также методом капиллярной газожидкостной хроматографии фунгицидного — флуазинама. Результаты проведенных тестирований с использованием данных методик и современной приборной базы показали, что применение на подсолнечнике, в том числе и десикации препаратами на основе диквата, каждого из пестицидов, содержащих обозначенные выше д.в., при соблюдении регламентов не сопровождалось дополнительными рисками в любом из регионов возделывания культуры.

Дополнительно следует указать, что в результате проведенных исследований разработана оригинальная методика контроля остатков ранее обозначенного в тексте комбинированного инсектицида Фосорган Дуо КЭ. Она позволяет совместно определять остаточные количества даже 3-х (хлорпирифоса, бифентрина и циперметрина) действующих веществ. Использование в этом

случае для экстракции метода пробоподготовки QuEChERS и подбор оптимальных хроматографических условий обеспечили полноту извлечения д.в. на уровнях >77%. Метод успешно апробирован на пробах (зеленая масса, семена и масло) ярового рапса и однозначно будет валидирован применительно к урожаю подсолнечника.

Риски безопасности при защите подсолнечника многократно возрастают в условиях распространения гербицидустойчивых растений [9, 14], т.к. большинство производителей средств защиты чисто теоретически или точнее на основе уже имеющихся на рынке компонентов регистрируют свои продукты в привязке к распространенным гибридам. В результате есть конкретные примеры грубых ошибок вплоть до обработки препаратами на основе трибенурон-метила посевов, представленных устойчивыми к имидазолинонам и наоборот чувствительными сортами растений. Итогом при этом может быть полная потеря посева и, соответственно, урожая.

ВЫВОДЫ

Таким образом, подсолнечник в настоящее время является защищенной от всех опасных и особо опасных вредных организмов культурой, т.к. имеет в регистрации полную (инсектициды, фунгициды, гербициды и десиканты) линейку пестицидов. Естественно, что приоритеты в этом случае формируются с учетом не только биологических, но и, как у любой экономически выгодной культуры, хозяйственных эффектов, и дополняется все это контролем безопасности последствий применения препаратов. В рамках последнего аспекта, наряду с разработкой новых аналитических методов, широко используют возможности валидации (верификации) в отношении семян и масла культуры уже утвержденных в Роспотребнадзоре методик мониторинга остаточных количеств пестицидов.

В целом продолжается, а по некоторым позициям — даже активизируется, совершенствование ассортимента препаратов для защиты посевов подсолнечника от всех (вредителей, болезней и сорняков) групп вредных организмов. Можно сказать, что базовый подбор препаратов составляют уже проверенные на других культурах или в отношении других вредителей, т.е. преобладает расширение сферы применения пестицидов преимущественно за счет комбинированных препаратов.

Получение желаемого эффекта может быть достигнуто только при условии четкого соответствия состава вредных организмов спектру дей-

ствия применяемых препаратов. Для выполнения данного требования реально наличествует достаточно большой набор средств воздействия и на вредителей, и на патогенные начала, и на сорняки, объединяющий на сегодняшний день уже более 300 пестицидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. М., 2022. 881 с.
2. *Говоров Д.Н., Живых А.В., Шабельникова А.А.* Применение пестицидов. Год 2021-й // Защита и карантин раст. 2022. № 6. С. 3—4.
3. *Петрова М.О., Черменская Т.Д.* Поиск остаточных веществ пестицидов в сельскохозяйственной продукции — путь к безопасному продовольствию // Биосфера. 2019. Т. 11. № 1. С. 40—47.
4. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 324 с.
5. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 380 с.
6. Методические указания по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2013. 280 с.
7. *Бухонова Ю.В., Михина Н.Г., Алехин В.Т.* Методические указания по мониторингу вредителей и болезней подсолнечника. Воронеж: Роза ветров, 2019. 104 с.
8. *Семынина Т.В., Разумейко И.Н., Наумов М.М.* Технология защиты подсолнечника от вредных организмов в условиях ЦЧР. Воронеж, 2015. 134 с.
9. *Артохин К.С., Игнатова П.К.* Защита подсолнечника от вредителей, болезней и сорняков // Определитель, справ. и метод. пособ.: 3-е изд., перераб. и дополн. Ростов н/Д.: Foundation, 2022. 364 с.
10. *Лантчиев А.Б., Нужная Н.А.* Современные составляющие эффективной защиты посевов подсолнечника от сорной растительности // Состояние и перспективы защиты растений: Мат-лы Междунаро. научн.-практ. конф. (Минск—Прилуки, 17—19 мая 2016 г.). Минск: Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2016. С. 160—163.
11. *Маханькова Т.А., Голубев А.С.* Гербициды для подсолнечника // Защита и карантин раст. 2019. № 2. С. 37—36.
12. *Laptiev A.B., Dolzhenko V.I.* Scientific considerations on the improvement of the range of herbicides for the protection of sunflower crops // J. Fund. Appl. Sci. 2017). V. 9. № 2S. P. 1551—1561.
13. *Дряхлов А.И., Головин А.В.* Предуборочная десикация подсолнечника — важнейшее средство против белой и серой гнилей // Научн.-техн. бюл. ВНИИ масл. культур. Краснодар, 2013. Вып. 1. С. 153—154.
14. *Лантчиев А.Б.* Элементы снижения экологических рисков в защите растений // Защита растений в условиях перехода к точному земледелию = Plant

- protection in the transition to precision farming: Мат-лы Международ. научн. конф. (Прилуки, 27–29 июля 2021 г.). Минск: Колорград, 2021. С. 196–199.
15. Волосатова Н.С., Человечкова В.В., Петрова М.О. Определение остаточных количеств диквата в масличных культурах после обработки десикантом // Селекция, семеноводство и технология возделывания сел.-хоз. культур: Докл. Международ. научн.-практ. конф. Тирасполь: Есо-TIRAS, 2020. С. 234–237.

Effectiveness and Safety of Pesticides in Protecting Sunflowers from Pests

A. B. Laptiev^{a,b,#} and V. K. Maltsev^{a,b}

^a*All-Russian Research Institute of Plant Protection
Shosse Podbel'skogo 3, St. Petersburg—Pushkin 196608, Russia*

^b*LLC “Innovative Plant Protection Center”
ul. Pushkinskaya 20, lett. A, room 7-H, St. Petersburg—Pushkin 196608, Russia*

[#]*E-mail: laptiev@icpr.ru*

The analysis of the current state and trends in the development of the range of pesticides allowed for use in sunflower crops is presented. Based on the results of studies conducted in 3 soil-climatic zones of the country, the possibilities are reasoned and priorities are determined for improving the range of drugs to protect this crop from the main harmful organisms, the main of which is an increase in the share of combined and domestic drugs. At the same time, the biological effectiveness of protection measures against certain types of pests, major diseases and weeds is specified, and the characteristics of the latest developments in methods for controlling residual amounts of a number of active substances of pesticides used in the protection of sunflower are presented. Based on the results of field experiments, it was found that at present the level of biological efficiency in protecting the main oilseed crop from pests is characterized in most cases by indicators close to 80%, from diseases — varies in the range of 60–75% and from weeds — reaches 90% in combination with a decrease in their raw mass to 95%.

Keywords: pesticides, sunflower, harmful organisms, assortment of drugs, application regulations, biological efficiency, residual amounts of pesticides.

УДК 632.937:632.98

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

© 2023 г. А. К. Лысов^{1,*}, Т. В. Корнилов¹, И. Л. Краснобаева¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: lysov4949@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.04.2023 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Рассмотрены вопросы повышения качества нанесения грибных и бактериальных биопрепаратов при применении норм расхода рабочей жидкости до 20 л/га. Наряду с традиционной методикой оценки качества нанесения рабочей жидкости биопрепаратов на обрабатываемую поверхность, был использован также и новый метод оценки эффективности нанесения биопрепаратов, который заключался в отборе через 1 сут после обработки определенной площади листовой поверхности картофеля по ярусам растений для определения жизнеспособности грибных и бактериальных препаратов при технологиях малообъемного (МО) и ультрамалообъемного (УМО) опрыскивания. Показано, что при применении технологии УМО до 10 л/га, несмотря на высокую плотность покрытия, клетки микроорганизмов попадают на листовую поверхность с недостаточным количеством жидкости для активного их размножения на обработанной поверхности. Кроме того, при низкой влажности, связанной с быстрым испарением капель с поверхности обработанных листьев, микроорганизмы не размножаются и при высыхании уносятся ветром. Проведенными исследовательскими испытаниями применения грибного биопрепарата Трихоцин при норме расхода 20 л/га на тест-объектах (растениях картофеля сортов Галла и Ривьера) с использованием в качестве антииспарителей особо чистого глицерина и влагоудерживающей пищевой добавки сорбит показано, что их использование обеспечивало за счет сохранения влаги жизнеспособность клеток биопрепарата и высокую скорость их размножения на обработанной поверхности.

Ключевые слова: картофель, технологии МО и УМО, биопрепарат, антииспаритель, глицерин, сорбит, плотность покрытия.

DOI: 10.31857/S0002188123110091, **EDN:** VGRUWO

ВВЕДЕНИЕ

Основой для экологически безопасного производства продуктов питания и ограничения использования химических средств защиты растений является применение в интегрированных системах защиты биопрепаратов [1]. В ведущих странах мира и в нашей стране в настоящее время наблюдают растущий спрос потребителей на продукты питания, произведенные с использованием экологически безопасных биологических средств защиты от вредных организмов [2, 3].

Биопрепараты — живые организмы или естественные биологически высокоактивные химические соединения, синтезируемые живыми организмами [4]. Их основными преимуществами по сравнению с химическими средствами защиты растений является экологическая безопасность в отношении полезных насекомых, животных, человека и возможность использования весь период

вегетации растений, даже во время цветения и плодоношения.

Современные интегрированные системы защиты основных сельскохозяйственных культур обязательно включают применение биологических препаратов, особо — при получении продуктов питания с улучшенными характеристиками. Применение биопрепаратов позволит снизить пестицидную нагрузку на агроценозы и улучшить качество и безопасность продуктов питания.

Для обеспечения высокой эффективности применения биопрепаратов необходимо их вносить при оптимальных для их действия условиях: температуре, влажности воздуха, скорости ветра и размера капель диспергируемой рабочей жидкости. Если первые 3 параметра определяются природой, то такой технологический параметр как размер капель диспергируемой жидкости может изменяться в зависимости от используемых

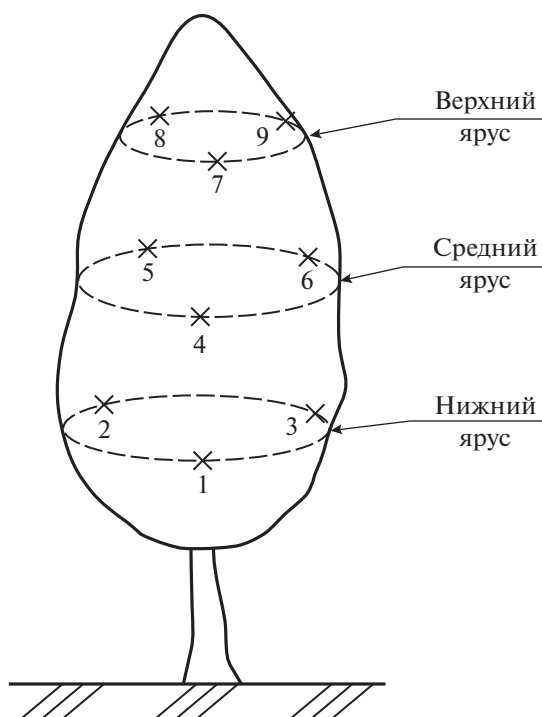


Рис. 1. Схема размещения карточек по ярусам растенья картофеля.

распылителей и режима их работы. Для внесения биопрепаратов используют гидравлические распылители с нормами расхода рабочей жидкости от 200 до 400 л/га. Для обработок против болезней лучше всего использовать двухфакельные инжекторные распылители, которые обеспечивают лучшее распределение рабочей жидкости препаратов на обрабатываемой поверхности, а капли диспергируемой рабочей жидкости менее подвержены сносу из зоны обработки [5]. При использовании больших норм расхода рабочей жидкости возрастают энергетические затраты на технологический процесс опрыскивания из-за вспомогательных операций, связанных с подвозом воды и необходимости использования 2-го энергетического средства. В связи с этим была поставлена задача определить возможность использования вращающихся дисковых распылителей, сетчатых или перфорированных барабанов с принудительным осаждением капель для внесения биопрепаратов при более низких нормах расхода рабочей жидкости. При определении эффективности нанесения биопрепаратов при малых нормах расхода рабочей жидкости необходимо также учитывать их препаративную форму (грибная и бактериальная форма), т.к. клетки штаммов-продуцентов, особенно микромицетов, достаточно крупные, что значительно влияет на скорость испарения ка-

пель и их удерживаемость при экстремальных погодных условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

По оценке влияния дисперсности распыла и влияние метеоусловий на отложение биопрепаратов (грибная и бактериальная форма) при технологии малообъемного (МО) и ультрамалообъемного (УМО) опрыскивания закладку опытов проводили в соответствии с ГОСТ Р 53053-2008 "Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний" с использованием следующего оборудования: опрыскиватель Solo 456, опрыскиватель ультрамалообъемный с принудительным осаждением капель конструкции ВИЗР. Оценку дисперсности распыла проводили в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО 5682-1-1996 Оборудование для защиты растений. Ч. 1. "Методы испытаний гидравлических распылителей".

В качестве объекта для сравнения были выбраны 2 биологических фунгицида: Алирин Б ТАБ на основе штамма *Bacillus subtilis* ВКМ В-2604D (титр спор 10^{10} КОЕ/г) и Трихоцин СП на основе микромицета *Trichoderma harzianum* (титр конидий 10^{10} КОЕ/г).

Оценку эффективности отложения биопрепаратов при разных технологиях внесения проводили на картофеле в течение вегетации и в лабораторных условиях на выращенных растениях картофеля сортов Галла и Ривьера.

Опрыскивание растений картофеля на выбранных рандомизированных участках проводили в утренние часы. Обработку ранцевым опрыскивателем осуществляли с использованием двухфакельного щелевого инжекторного распылителя IDKT 120-05 с расходом рабочей жидкости 300 л/га.

Обработку ультрамалообъемным опрыскивателем с принудительным осаждением капель конструкции ВИЗР проводили с расходом рабочей жидкости 10 л/га и при норме расхода рабочей жидкости 20 л/га с добавлением антииспарительных композиций.

Для оценки качества отложения рабочей жидкости биопрепаратов на учетных растениях картофеля на 3-х ярусах — верхнем, среднем и нижнем размещали индикаторные водочувствительные карточки для подсчета размера и количества капель осажденной рабочей жидкости (рис. 1). Карточки после высыхания помещали в индивидуальные пакеты с zip-застежкой. Пакеты маркировали согласно схеме закладки опытов.

Обработку индикаторных водочувствительных карточек производили путем сканирования с

передачей полученного изображения для автоматического подсчета количества следов капель, их размеров и вычисления медианно-массового диаметра капель (ММД) с помощью специальной программы.

Наряду с принятой методикой оценки качества нанесения рабочей жидкости биопрепарата на обрабатываемую поверхность, была разработана методика оценки эффективности нанесения на основе определения жизнеспособности действующего вещества биологического препарата.

Для этого, через 1 сут после обработки, с помощью пробойника на листьях делали высечки, которые сразу же помещали в стерильные флаконы с 50 мл физиологического раствора для последующего определения жизнеспособности действующего вещества биологических препаратов. Опытные учетные делянки опрыскивали с учетом не менее 3-х проходов, чтобы исключить влияние сноса, огрехи и перекрытия при опрыскивании.

Опыты проводили на опытных делянках с линейным расположением. Между делянками, обработанными различными препаратами, были расположены контрольные участки.

Рабочую жидкость готовили непосредственно перед обработкой и в соответствии с нормами внесения, рекомендованными Государственным каталогом пестицидов и агрохимикатов, разрешенных для применения на территории Российской Федерации [6]. Для приготовления рабочей жидкости использовали следующее количество биопрепарата: Алирин Б ТАБ — 10 табл./10 л воды, Трихоцин СП — 70 г/га.

Через 1 сут после обработки с помощью пробойника из листьев делали высечки площадью 1 см², которые сразу же помещали в стерильные флаконы с 50 мл физиологического раствора (0.9% NaCl). Высечки отбирали в 2-х ярусах — верхнем и нижнем.

Метеоусловия на опытном поле ВИЗР при проведении опытов были следующие: температура воздуха 26°C, влажность воздуха 78%, скорость ветра 0.5–1.0 м/с.

Для уменьшения испарения капель при опрыскивании тестовых растений картофеля биопрепаратом Трихоцин СП с использованием вращающегося дискового распылителя в рабочую жидкость добавляли прилипатели — 0.01%-ный особо чистый глицерин и 0.01%-ная влагоудерживающая пищевая добавка сорбит, а также когда в рабочую жидкость добавляли смесь 0.01%-ного особо чистого глицерина и 0.01%-ную влагоудерживающую пищевую добавку сорбит.

Схема опыта предусматривала следующие варианты: 1 — Контроль (вода), 2 — Трихоцин СП + 0.01%-ный особо чистый глицерин, 3 — Трихоцин СП + 0.01%-ный сорбит (влагоудерживающая пищевая добавка), 4 — Трихоцин СП + 0.01%-ный особо чистый глицерин + 0.01%-ный сорбит.

Для выявления наличия жизнеспособных клеток штаммов-продуцентов биопрепаратов в средах из флаконов с отобранными пробами проводили высеивание на искусственные питательные среды (агаризованную среду Чапека для микромицета *T. harzianum* Г 30 ВИЗР и сухой питательный агар (СПА) для *B. subtilis* ВКМ В-2604Д).

Для этого в предварительно разлитые чашки Петри с питательной средой вносили по 0.1 мл суспензии из флакона, растирали шпателем и помещали в термостатируемые условия при 28°C. Чашки просматривали ежедневно, начиная с 3-х сут. Выросшие колонии бактерий микроскопировали на 5-е сут. Для определения количества колониеобразующих единиц в биопрепаратах предварительно провели титрование использованных препаративных форм. Исходный титр штаммов-продуцентов составил: *T. harzianum* Г 30 ВИЗР — 1.0×10^{10} КОЕ/г, *B. subtilis* ВКМ В-2604Д — 1.3×10^{10} КОЕ/г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При традиционной методике оценки качества нанесения рабочей жидкости биопрепаратов на обрабатываемую поверхность установлено, что наибольшая плотность покрытия водочувствительных индикаторных карточек составила 146 капель/см² при внесении препарата Алирин Б ТАБ с помощью УМО-опрыскивателя с принудительным осаждением капель, а наименьшая плотность покрытия составила 51 капля/см² — при внесении Трихоцина СП технологией МО-опрыскивания с помощью ранцевого опрыскивателя с двухфакельным щелевым инжекторным распылителем ИДКТ 120-05 (рис. 2, 3).

Полученные данные плотности покрытия и медианно-массовый диаметр капель в различных вариантах внесения биопрепаратов на картофеле представлены в табл. 1.

На основании полученных результатов дисперсности распыла рабочих жидкостей биопрепаратов при технологиях МО и УМО произведен расчет времени испарения капель при размерах 70 мкм, 140 мкм, 350 мкм и 700 мкм.

Расчет производили по формуле для расчета времени испарения диспергированных капель



Рис. 2. Плотность покрытия при МО с инъекцией воздуха.



Рис. 3. Плотность покрытия при УМО с принудительным осаждением.

жидкости, расположенных на твердой поверхности (листьях или стебле) [7]:

$$t = \frac{RT\rho_{\text{ж}}^2 r_0^3 (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)}{24DM\sigma\rho_{\text{в}}f},$$

где: M — молярная масса жидкости 18.01528 г/моль, T — термодинамическая температура в К — 299.15,

r_0 — начальный радиус капли, м, R — газовая постоянная 461 Дж/кг К, σ — поверхностное натяжение воды при температуре 25°C — 71.72×10^{-3} н/м, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность воды — 1000 кг/м³, θ — контактный угол с поверхностью 180°, $\rho_{\text{в}}$ — плотность насыщенного пара 0.017 кг/м³, f — относительная влажность воздуха в долях — 0.78.

Таблица 1. Величины плотности покрытия и медианно-массовый диаметр капель (ММД) в различных вариантах внесения биопрепаратов

Название препарата/параметр	Алирин Б ТАБ					Трихоцин СП				
	Варианты									
	МО			УМО		МО		УМО		
	Ярусы растений картофеля									
	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3
Плотность покрытия, шт./см²	63	65	57	146	117	52	51	81	127	106
ММД, мкм	338	340	323	129	129	314	331	117	136	89.8

Таблица 2. Расчетное время испарения капли в зависимости от ее диаметра*

Диаметр капли, м	0.00007	0.00014	0.00035	0.0007
Время жизни капли, с	10.1	80.8	1262	10097

*При расчете не учитывали угол наклона листовой поверхности.

Таблица 3. Морфологические особенности бактерий, выявленных после обработки биопрепаратом Алирин Б ТАБ (микроскопическое исследование)

Листовой ярус	УМО с принудительным осаждением капель	МО с инжектором
Верхний	Мелкие короткие клетки палочковидной формы в группах или одиночные Дрожжеподобные клетки, округлые, собраны в группы	Клетки палочковидной формы среднего размера Крупные клетки палочковидной формы
Средний	Мелкие и средние клетки палочковидной формы, в группах или одиночные	Крупные округлые клетки; крупные и средние клетки палочковидной формы в группах или одиночные
Нижний	Средние и круглые палочки, округлые клетки лимонovidной формы	Дрожжеподобные клетки, палочковидные средние клетки

Расчетное время жизни капли на листовой поверхности в зависимости от ее диаметра представлено в табл. 2. Полученные данные показали, что при технологии УМО 50% жидкости при медианно-массовом диаметре капель 140 мкм испаряется по времени до 80 с, а при технологии МО при медианно-массовом диаметре капель 350 мкм время жизни капли увеличивалось в 15 раз и составляло >20 мин (1260 с).

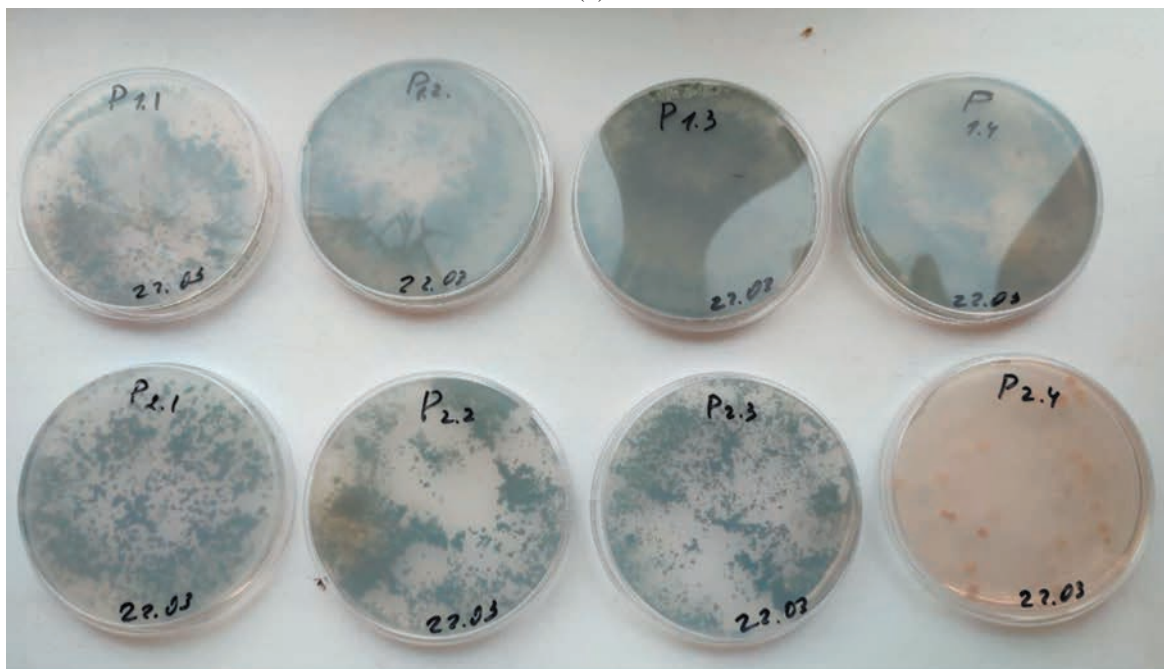
При посеве смывов с листьев после МО и УМО биопрепаратом Трихоцин СП на агаризованной питательной среде Чапека во всех вариантах отмечен рост микромицетов и бактерий, представляющих естественную микрофлору растений, а клетки штамма-продуцента не выявлены. При посеве смывов с высечек листьев всех ярусов после обработки биопрепаратом Алирин Б ТАБ выявили бактерии разных видов.

Микроскопические исследования выросших колоний показали, что в смывах присутствовали в

основном 4 вида, отличавшихся по размерам и форме клеток (табл. 3).

Клетки, морфологически схожие с клетками штамма-продуцента *B. subtilis* ВКМ В-2604D, были выявлены только в рассеве смыва с пробы, отобранной со среднего листового яруса растений картофеля в варианте с применением малообъемного опрыскивания. Анализ полученных данных показал, что при технологии УМО при использовании малых объемов рабочей жидкости, наблюдали увеличение плотности покрытия при значительном уменьшении размера капель. Однако клетки штаммов-продуцентов имели крупные размеры, особенно *T. harzianum* (2.5–4.0 × 2.0–3.5 мкм), и чуть меньшее — *B. subtilis* (2.0–2.4 × 1.0–1.2 мкм), а капли воды при применении УМО были мелкие и быстро испарялись. Из-за этого клетки микроорганизмов попадали на поверхность листьев с недостаточным количеством жидкости, необходимым для их активного

(a)



(б)

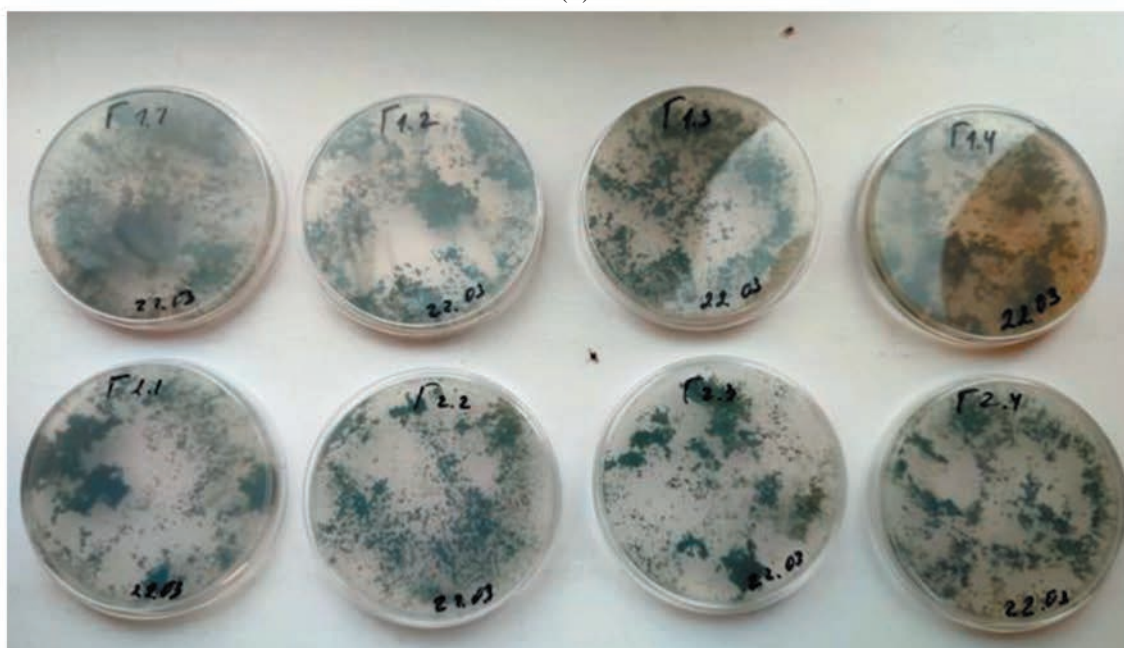


Рис. 4. Жизнеспособность биопрепарата Трихоцин (УМО с антииспарителями) в зависимости от яруса листьев растений картофеля сортов Ривьера (а) и Галла (б).

размножения на обработанной поверхности. Кроме того, низкая влажность, связанная с быстрым испарением капель с поверхности обработанных листьев, также оказывала неблагоприятное воздействие на развитие штаммов-продуцентов.

Для оптимизации метода внесения биопрепарата были проведены модельные вегетационные опыты. Растения картофеля опрыскивали с ис-

пользованием вращающегося дискового распылителя с принудительным осаждением капель биопрепаратом Трихоцин СП при норме расхода рабочей жидкости 20 л/га и использованием антииспарителя в виде особо чистого глицирина и влагоудерживающей пищевой добавки сорбита. Полученные результаты оценки жизнеспособности клеток биопрепарата Трихоцин СП представ-

лены на рис. 4 в зависимости от яруса растений картофеля сортов Ривьера и Галла. Показано, что при использовании антииспарителей в виде особо чистого глицерина или влагоудерживающей пищевой добавки сорбита при их концентрации 0.01% в рабочей жидкости биопрепарата Трихоцин СП при УМО на картофеле наблюдали активный рост клеток грибов и их высокую жизнеспособность через 1 сут и на 5-е сут после обработки.

Таким образом, для повышения эффективности биопрепаратов и их жизнеспособности на обработанной поверхности при малых нормах расхода рабочей жидкости необходимо использовать указанные антииспарители. Установлено, что антииспарители при добавлении в рабочую жидкость биопрепарата не оказывали фитотоксичного действия на растения картофеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, опытные обработки посадок картофеля биологическими препаратами Алирин Б ТАБ. и Трихоцин СП при технологиях МО и УМО показало, что при малых нормах расхода рабочей жидкости 10 л/га клетки микроорганизмов попадают на поверхность листьев с недостаточным количеством жидкости для активного их размножения на обрабатываемой поверхности, несмотря на высокую плотность покрытия.

Добавка в рабочую жидкость грибного биопрепарата Трихоцин СП 0.01%-ных особо чистого глицерина или влагоудерживающей пищевой добавки сорбита обеспечивала активный рост клеток гриба и их высокую жизнеспособность через 1 сут после обработки тестируемых растений сортов картофеля Галла и Ривьера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафроновская Г.М. Биопестициды — перспективный сегмент рынка средств защиты растений // Газета Глагроном. 25.11.2021.
2. Лысов А.К., Хютти А.В., Корнилов Т.В. Интегрированная защита при выращивании семенного картофеля // Защита и карантин раст. 2020. № 9. С. 32–37.
3. Новикова И.И. Полифункциональные биопрепараты на основе микробов-антагонистов — основа экологически безопасной системы защиты растений от болезней // Информ. бюл. ВПРС МОББ. 2007. № 38. С. 173–175.
4. ГОСТ 21507-2013 Защита растений. Термины и определения. М.: Госстандарт РФ, 2015.
5. Лысов А.К. Современные технологии и средства механизации для систем интегрированной защиты растений. СПб.—Пушкин, 2019. 164 с.
6. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных для применения на территории РФ. М., 2022.
7. Дохов М.П. Влияние кривизны на испарение малых капель жидкостей // Фундамент. исслед-я. 2006. № 5. С. 83–84. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=5062>

Improvement of the Technology of Application of Biological Preparations for Plant Protection

A. K. Lysov^{a,*}, T. V. Kornilov^a, and I. L. Krasnobaeva^a

^aAll-Russian Research Institute of Plant Protection
shosse Podbelskogo 3, St.- Petersburg—Pushkin 196608, Russia

*E-mail: lysov4949@yandex.ru

The issues of improving the quality of application of fungal and bacterial biological products when applying the flow rates of working fluid up to 20 l/ha are considered. Along with the traditional methodology for assessing the quality of applying the working fluid of biological products to the treated surface, a new method for evaluating the effectiveness of applying biological products was also used, which consisted in selecting a certain area of the potato leaf surface by plant tiers 1 day after processing to determine the viability of fungal and bacterial preparations with low-volume (LV) and ultra-low-volume (ULV) technologies spraying. It is shown that when applying the technology of spraying up to 10 l/ha, despite the high coating density, the cells of microorganisms fall on the leaf surface with an insufficient amount of liquid for their active reproduction on the treated surface. In addition, at low humidity, due to the rapid evaporation of droplets from the surface of the treated leaves, microorganisms do not multiply and are carried away by the wind when drying. The conducted research tests of the use of the mushroom biological preparation Trichocin at a consumption rate of 20 l/ha on test objects (potato plants of the Galla and Riviera varieties) using especially pure glycerin and the moisture-retaining food additive sorbitol as antiparators showed that their use ensured the viability of the cells of the biological product and the high rate of their reproduction on the treated surface due to moisture retention.

Keywords: potato, LV- and ULV-spraying technologies, biological preparation, anti-vaporizer, glycerin, sorbitol, coating density.

УДК 631.416.7:631.445.24:633.85.494:631.821

ТРАНСЛОКАЦИЯ КАЛЬЦИЯ В РАСТЕНИЯ ЯРОВОГО РАПСА ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ, МЕЛИОРИРОВАННОЙ КОНВЕРСИОННЫМ МЕЛОМ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ДОЗ. СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

© 2023 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург—Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.04.2023 г.

После доработки 14.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В 24-вариантном вегетационном прецизионном опыте, заложенном на кислой дерново-подзолистой супесчаной почве, мелиорированной конверсионным мелом (КМ) в широком интервале доз, установлено влияние известкования на содержание доступного для растений кальция в почве и его транслокацию в ткани рапса. Результаты свидетельствовали, что рапс является экологически пластичным видом растений. Возрастание количества внесенного мела от 0.1 до 3-х полных доз, рассчитанных по гидролитической кислотности, привело к увеличению концентрации Са в рапсе в год известкования от 0.81 до 3.14%. Разработаны эмпирические зависимости концентрации кальция в почве и растениях от дозы применения мела. Рассмотрены 3 подхода к анализу экспериментальных данных, описывающие взаимосвязь содержания кальция в почве с его накоплением в тканях растений. Показано, что искусственное усреднение данных содержания кальция в почве при одинаковой дозе применения мелиоранта в отдельных повторностях приводило к потере информации, что отражалось в статистических характеристиках построенных эмпирических моделей.

Ключевые слова: дерново-подзолистая супесчаная почва, известкование, конверсионный мел, яровой рапс, эмпирические зависимости, транслокация кальция в растения из почвы.

DOI: 10.31857/S000218812311008X, **EDN:** PPDBNM

ВВЕДЕНИЕ

Рапс относится к ценным пищевым и кормовым культурам [1]. Посевные площади ярового рапса в Ленинградской обл. неуклонно увеличиваются: с 2017 по 2022 г. они возросли в 4.2 раза (с 1.3 до 5.5 тыс. га). Потенциальные возможности регионов, по данным ФНЦ “ВИК им. В.Р. Вильямса”, позволяют расширить посевы культуры до 2.0–2.5 млн га [2].

Считается общепризнанным, что баланс минеральных элементов в рационах сельскохозяйственных животных не менее важен, чем баланс других питательных веществ, а формирование пищевой ценности рапса с помощью удобрений и

мелиорантов является перспективным агрохимическим приемом [3, 4].

В лаборатории мелиорации почв АФИ (г. Санкт-Петербург) изучают влияние удобрений и мелиорантов на формирование химического состава рапса. Например, в работе [5] проведено сравнительное изучение удобрительной ценности различных видов фосфорных удобрений (суперфосфата, преципитата, фосфоритной муки и фосфатного шлама) на продуктивность и химический состав ярового рапса, выращенного на кислой дерново-подзолистой почве. Проведенное исследование показало, что применение фосфорных удобрений является эффективным приемом регулирования баланса макро- и микроэле-

ментов в растениях рапса, позволяя существенным образом изменять его химический состав.

В серии вегетационных опытов [6] изучен химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произведенных гажой, феррохромовым шлаком, конверсионным мелом и доломитовой мукой. Установлено, что на формирование элементного состава ярового рапса влияют сложные процессы антагонизма и синергизма при поглощении корнями растений отдельных элементов. В работах [7, 8] показано, насколько различна насыщенность ярового рапса марганцем, цинком, железом, медью, стронцием и кальцием в год применения мелиоранта и после его полного разложения в почве спустя 5 лет после применения.

Эти и другие исследования, проведенные специалистами лаборатории [9–12], позволили заключить, что яровой рапс является экологически пластичным видом, а на формирование его элементного состава влияет химическая обстановка в почве. Цель работы – в контролируемых условиях вегетационного прецизионного опыта, проведенного на кислой дерново-подзолистой почве, мелиорированной КМ в широком интервале доз, установить концентрацию доступных для растений соединений кальция, выявить содержание кальция в тканях ярового рапса спустя 1 год после известкования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели был заложен 24-вариантный прецизионный опыт, охватывающий количество мелиоранта (конверсионного мела – КМ) от 0.1 до 3-х доз, рассчитанных по гидролитической кислотности (0.8–24 т СаСО₃/га) с шагом различий 800 кг/га. Схема опыта приведена в табл. 1.

Опыт закладывали следующим образом. Варианты опыта 1, 2, 4, 7, 8, 10, 17, 23 заложены в трехкратной повторности. Во всех остальных вариантах опыта использовали однократную повторность. Это позволило изучить возможно большее количество ситуаций, встречающихся в полевых условиях при известковании [13–15].

При построении моделей, описывающих взаимосвязь содержания подвижного кальция в почве и его транслокацию в растения, использовали несколько подходов. Первый подход заключался в использовании 40 независимых наблюдений без усреднения данных, полученных в 8-ми вариантах проведенного эксперимента. Второй подход предусматривал использование для построения моделей материалов опыта с предварительным

усреднением экспериментальных данных 8-ми вариантов опыта, заложенных в трехкратной повторности. Количество определений, используемых для построения моделей, равно 24. При третьем подходе для построения моделей использовали данные 8-вариантного вегетационного опыта, заложенного в трехкратной повторности. Применяли традиционный подход к обработке данных эксперимента, когда опытные данные в отдельных вариантах опыта усредняли по повторениям. Количество данных при построении моделей равно 8.

Таким образом, при построении моделей усредняли наблюдения с различным содержанием кальция в почве при одинаковом количестве кальция, внесенного в составе мелиоранта, т.е. происходило искусственное сглаживание данных эксперимента.

Количество сосудов, используемых в опыте – 40 шт. Сосуды вмещали 5 кг почвы. Физико-химическая характеристика почвы: рН_{KCl} 4.1, H_T – 5.4 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 3.02%, содержание частиц <0.01 мм – 18.6%.

Культура – яровой рапс сорта Оредеж-4. Растения убирали в фазе цветения. Извлечение доступного для растений кальция из почвы проводили после уборки растений, используя ацетатно-аммонийный буфер рН 4.8. Определение кальция в растениях осуществляли после озоления в муфеле при температуре, равной 550°C. Анализ почвы и растений проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре. Построение математических зависимостей осуществляли согласно [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные содержания кальция в почве и растениях при использовании возрастающих доз мела приведены в табл. 1. Показано, что минимальная концентрация кальция была характерна для контрольного варианта опыта без известкования (420 мг/кг массы почвы). Доза применения мела оказала решающее влияние на содержание подвижного кальция в почве. Несмотря на некоторую (и неизбежную) вариабельность данных, установлено постепенное увеличение концентрации подвижного кальция в почве известкованных сосудов. Размах изменений составил от 460 до 21800 мг/кг воздушно-сухой почвы.

Эмпирическая модель (1.1), описывающая взаимосвязь содержания доступных для растений соединений кальция в почве от дозы применения, имела следующий вид:

$$y_{1.1} = 858.33 + 0.031 \cdot x, \quad (1.1)$$

где, $y_{1.1}$ – содержание Са в почве, x – доза СаСО₃.

Таблица 1. Содержание кальция в почве и растениях при использовании возрастающих доз конверсионного мела (КМ)

Вариант	Сосуд, №	Содержание Са в почве	Содержание Са в почве (среднее)	Содержание СаО в растениях	Содержание Са в растениях (среднее)
		мг/кг		%	
1. Контроль без известкования	1	420	453	0.81	0.96
	2	460		1.16	
	3	480		0.9	
2. КМ по 0.1 H_T	4	620	655	1.22	1.20
	5	646		1.22	
	6	700		1.16	
3. КМ по 0.2 H_T	7	760	760	1.16	1.16
4. КМ по 0.3 H_T	8	880	880	1.75	1.94
	9	820		2.21	
	10	940		1.86	
5. КМ по 0.4 H_T	11	1060	1060	1.92	1.92
6. КМ по 0.5 H_T	12	1140	1140	1.92	1.92
7. КМ по 0.6 H_T	13	1060	1140	2.15	2.06
	14	1120		1.98	
	15	1240		2.04	
8. КМ по 0.7 H_T	16	1180	1290	2.18	2.16
	17	1460		2.21	
	18	1240		2.1	
9. КМ по 0.8 H_T	19	1200	1200	2.44	2.44
10. КМ по 0.9 H_T	20	1320	1490	2.39	2.33
	21	1620		2.27	
	22	1540		2.33	
11. КМ по 1.0 H_T	23	1600	1600	1.8	1.80
12. КМ по 1.1 H_T	24	1700	1700	2.21	2.21
13. КМ по 1.2 H_T	25	1720	1720	1.98	1.98
14. КМ по 1.3 H_T	26	1920	1920	2.27	2.27
15. КМ по 1.4 H_T	27	1760	1760	2.47	2.47
16. КМ по 1.5 H_T	28	2040	2040	2.21	2.21
17. КМ по 1.6 H_T	29	2060	2090	2.04	2.12
	30	2140		2.27	
	31	2060		2.04	
18. КМ по 1.7 H_T	32	2040	2040	2.39	2.39
19. КМ по 1.8 H_T	33	2220	2220	2.56	2.56
20. КМ по 1.9 H_T	34	1560	1560	2.47	2.47
21. КМ по 2.0 H_T	35	1540	1540	2.62	2.62
22. КМ по 2.2 H_T	36	2120	2120	3.32	3.32
23. КМ по 2.5 H_T	37	2120	2130	2.85	2.97
	38	2180		3.14	
	39	2100		2.91	
24. КМ по 3.0 H_T	40	1940	1940	2.33	2.33

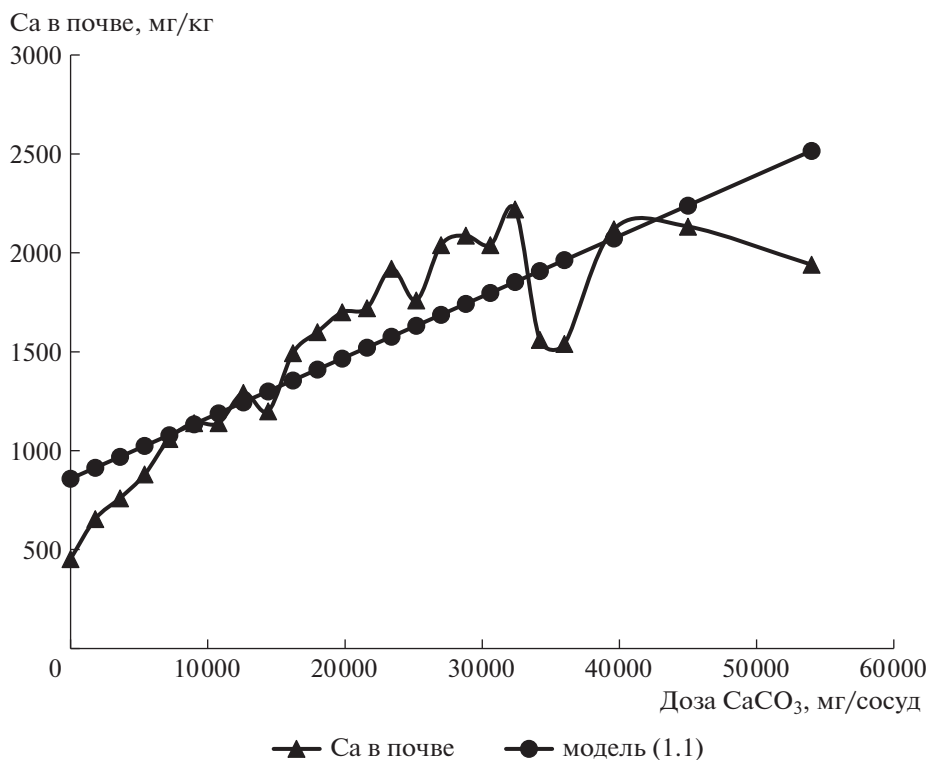


Рис. 1. Влияние дозы применения КМ на содержание подвижного кальция в почве.

Для модели (1.1) $p = 1.33E - 07$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.724$. Модель (1.1) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.1) представлен на рис. 1. Во всем промежутке изучения доз имелась сильная связь между дозой CaCO_3 и содержанием Са в почве.

Изменение содержания доступных для растений соединений кальция в почве непосредственно сказалось на накоплении этого элемента в тканях рапса. Минимальная концентрация кальция в зеленой массе рапса установлена в контрольном варианте опыта. Добавление в почву возрастающих доз конверсионного мела привело к росту концентрации кальция в рапсе. Размах изменений его содержания в опыте составил от 0.81 до 3.14%, т.е. изменялся в 3.88 раза. Таким образом, экологическая ситуация, складывавшаяся в отдельных сосудах опыта при известковании возрастающими дозами мела, была определяющим фактором, влияющим на концентрацию Са в растениях рапса.

Эмпирическая модель (1.2) влияния дозы применения мелиоранта на концентрацию кальция в зеленой массе рапса описывается уравнением:

$$y_{1.2} = 1.53 + 0.000029 \cdot x, \quad (1.2)$$

где $y_{1.2}$ — содержание Са в растениях; x — доза CaCO_3 .

Для модели (1.2) $p = 6.93E - 06$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.608$. Модель (1.2) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.2) представлен на рис. 2. Во всем промежутке изучения доз имелась сильная связь между дозой CaCO_3 и содержанием Са в растениях.

Таким образом, результаты изучения свидетельствовали, что использование возрастающих доз КМ приводило к обогащению почвы доступными для растений соединениями кальция и его накоплению в тканях ярового рапса уже в год известкования.

Одной из задач настоящего исследования являлась оценка статистической значимости моделей, описывающей взаимосвязь содержания кальция в почве и его транслокацией в растения при использовании различных подходов к анализу экспериментальных данных.

Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (40 наблюдений без усреднения). Эмпирическая модель для $y_{1.3}$ — Са (рапс, без усреднения) имела следующий вид:

$$y_{1.3} = 0.906 + 0.00083 \cdot x, \quad (1.3)$$

где x — содержание Са в почве.

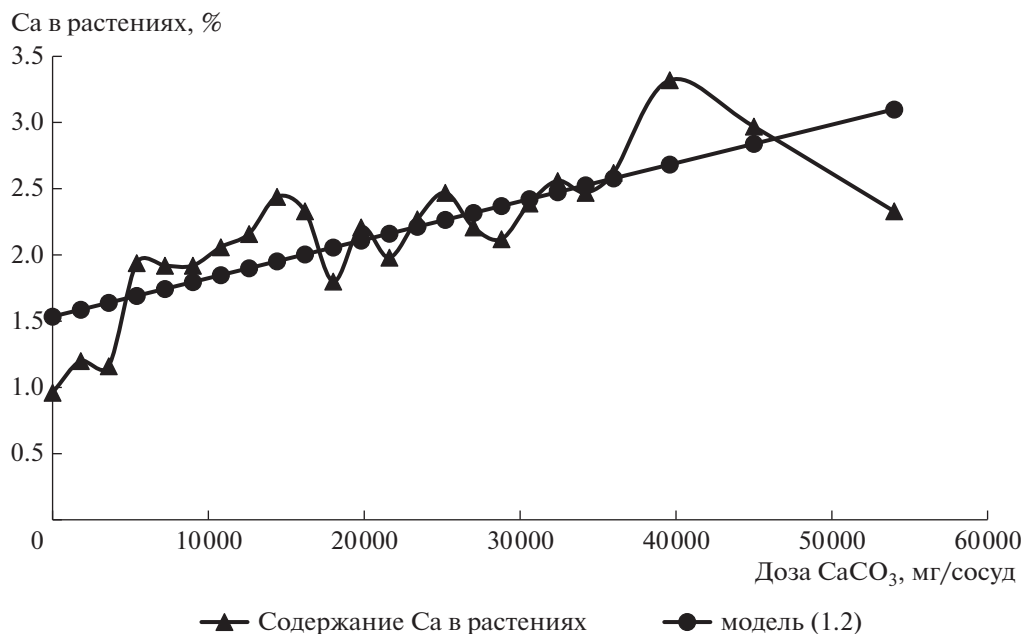


Рис. 2. Зависимость содержания кальция в растениях рапса от дозы КМ.

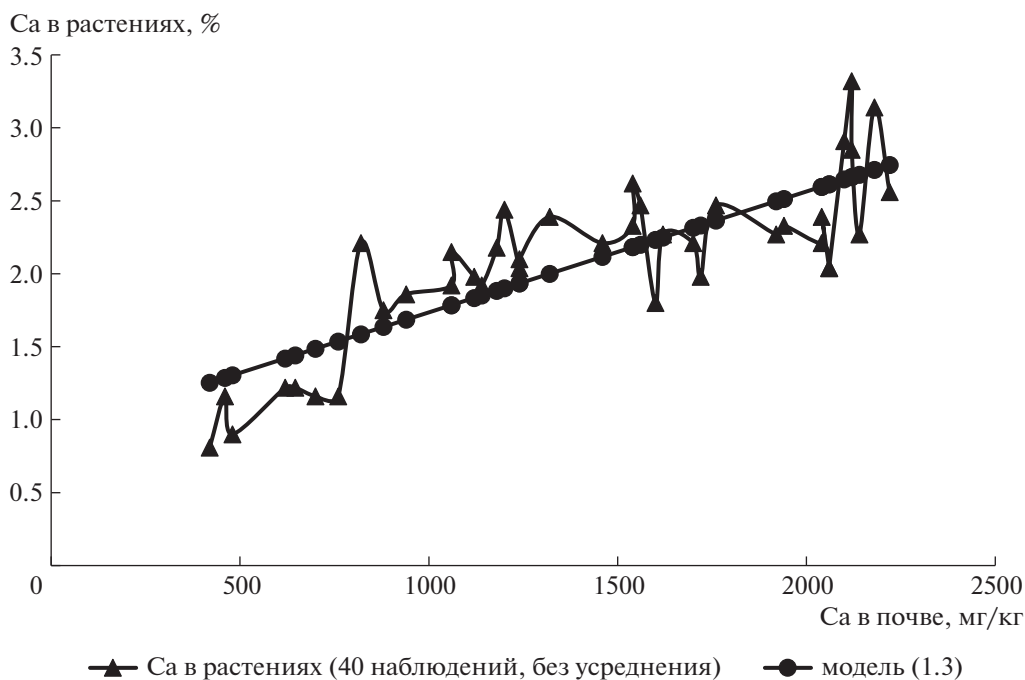


Рис. 3. Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (40 наблюдений без усреднения).

Для модели (1.3) $p = 2.41E - 10$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.656$. Модель (1.3) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.3) представлен на рис. 3.

Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (усредненные данные

24-х определений). Эмпирическая модель для $y_{1.4}$ – Са (рапс, усредненные данные) имела следующий вид:

$$y_{1.4} = 0.934 + 0.00081 \cdot x, \quad (1.4)$$

где x – содержание Са в почве. Для модели (1.4) $p = 6.5E - 06$ (p -value по F -критерию), коэффи-

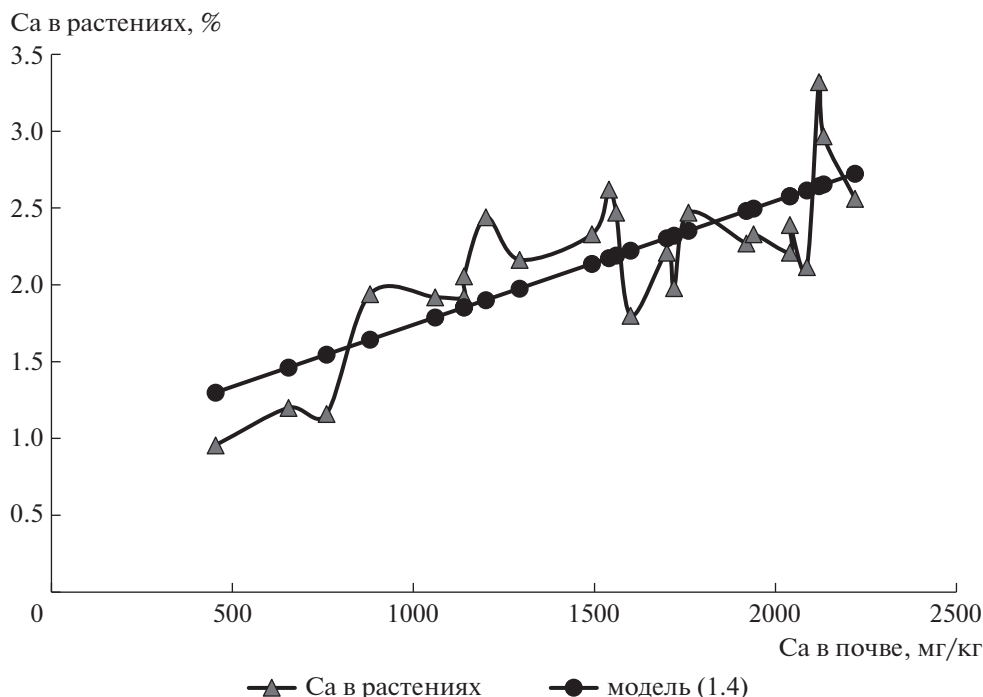


Рис. 4. Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (24 наблюдения с усреднением).

коэффициент детерминации $R^2 = 0.61$. Модель (1.4) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.4) представлен на рис. 4.

Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (8 наблюдений с усреднением). Эмпирическая модель для $y_{1.5}$ – Са (рапс, 8 наблюдений) имела следующий вид:

$$y_{1.5} = 0.846 + 0.00088 \cdot x, \quad (1.5)$$

где x – содержание Са в почве. Для модели (1.5) $p = 0.0058$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.74$. Модель (1.5) статистически значима на высоком уровне значимости. График модели (1.5) представлен на рис. 5.

Таким образом, рассмотрены 3 подхода к анализу данных взаимосвязи содержания Са в почве (объясняющая переменная) и содержания Са в растении рапса (результатирующий показатель, отклик). Первый подход заключался в построении эмпирической модели (1.3) по результатам 40 независимых наблюдений, в которых варьировалось содержание Са в почве (количественная переменная), при этом варьировалось количество Са в мелиоранте (количественная и качественная переменная). Содержание Са в почве складывалось из фонового содержания Са в почве до внесения мелиоранта и Са, внесенного с мелиорантом.

Второй подход заключался в предварительном усреднении наблюдений с одним и тем же содержанием Са в мелиоранте. В результате каждому внесенному количеству Са с мелиорантом соответствовало только одно наблюдение. Количество наблюдений уменьшилось до 24 наблюдений (24 варианта опыта с разным содержанием Са в мелиоранте). По результатам 24 наблюдений была построена эмпирическая модель (1.4). Второй подход искусственно агрегировал различные наблюдения с одним и тем же содержанием мелиоранта, но разным окончательным содержанием Са в почве в одно наблюдение с помощью усреднения наблюдений.

Сравнивая построенные эмпирические модели (1.3) и (1.4) необходимо отметить, что, как следует из сравнения величин p -value по F -критерию, статистическая значимость модели (1.3) существенно выше статистической значимости модели (1.4), коэффициент детерминации для модели (1.3) также больше, чем коэффициент детерминации для модели (1.4). Следовательно, эмпирическая модель (1.3) обладает очевидными преимуществами по сравнению с эмпирической моделью (1.4).

Более высокое качество модели (1.3) по сравнению с моделью (1.4) становится особенно заметным при сравнении графиков на рис. 3 и 4. График модели (1.3) на рис. 3 лучше соответствует наблюдениям по сравнению с графиком модели (1.4) на рис. 4.

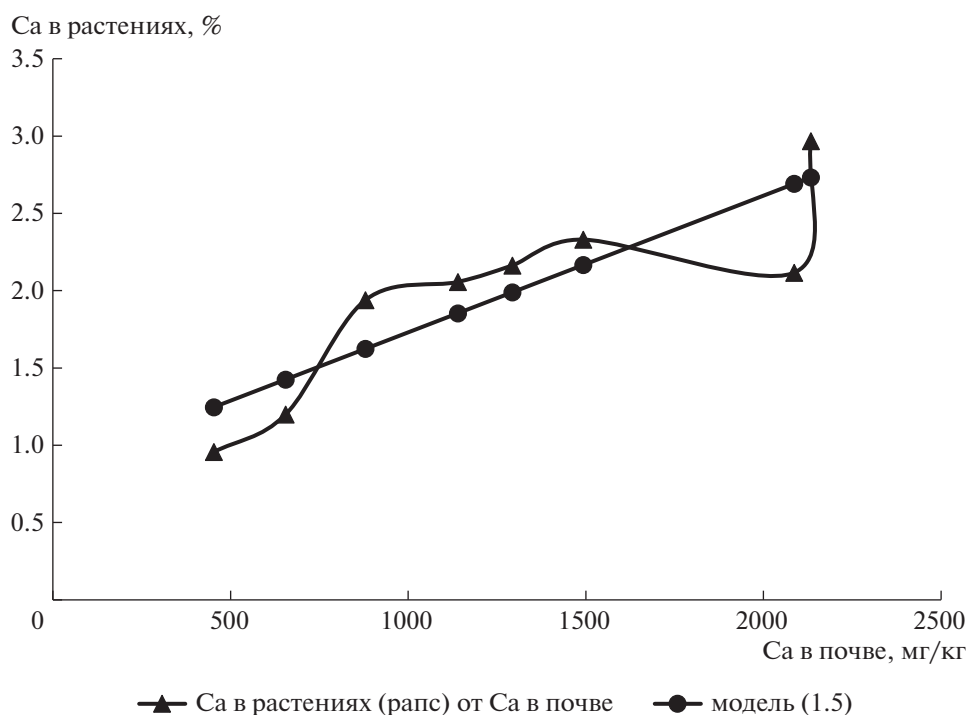


Рис. 5. Концентрация Са в растениях в зависимости от содержания Са в почве.

В опыте на рис. 4 присутствует искусственное сглаживание данных, вызванное усреднением наблюдений. Усредняются наблюдения с разным содержанием кальция в почве при внесении одинакового количества кальция вместе с мелиорантом. Такое усреднение приводит к потере информативности наблюдений, снижает качество собранной статистической информации.

Эмпирическая модель (1.5) построена по 8-ми усредненным наблюдениям (третий подход). Статистическая значимость модели (1.5) существенно меньше, чем моделей (1.3) и (1.4). График на рис. 5 очевидно содержит сглаженные данные, которые определяют искусственную взаимозависимость по сравнению с рис. 3 и 4.

Коэффициент детерминации модели (1.5) несколько больше, чем в моделях 1.3 и 1.4, что связано со сглаживанием данных, по которым строили модель (1.5). Коэффициент детерминации не определяет качество построенных моделей в полной мере. Сглаживание вносит в данные искусственную зависимость, которой на самом деле нет. Именно поэтому коэффициент детерминации не может служить главным критерием при оценке качества эмпирической модели.

Величина p -value по F -критерию показывает действительное качество построенных эмпирических моделей (1.3), (1.4) и (1.5). Очевидно, что модель (1.5) проигрывает моделям (1.3) и (1.4).

Из 3-х моделей наиболее достоверной является модель (1.3), т.к. она построена на основе независимых наблюдений. Данные не содержали искусственно внесенных в результате сглаживания (усреднения) зависимостей, характеристика p -value по F -критерию была минимальной по отношению к 2-м другим моделям.

ВЫВОДЫ

1. Рапс является экологически пластичным видом растений. На формирование его химического состава существенным образом влияет химический состав почвы. Рост количества внесенного в почву мела с 0.1 до 3 полных доз, рассчитанных по величине H_r , способствовал увеличению концентрации Са в рапсе с 0.81 до 3.14%.

2. Разработаны эмпирические модели, описывающие связь между дозой применения мелиоранта, концентрацией подвижного кальция в почве и его содержанием в растениях.

3. Рассмотрены 3 подхода к анализу экспериментальных данных, описывающих взаимосвязь содержания кальция в почве и его транслокации в растения. Показано, что искусственное усреднение данных содержания кальция в почве при одинаковой дозе применения мелиоранта приводило к потере информации, что отразилось в статистических характеристиках построенных эмпирических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьев И.В.* Перспективы использования рапса в кормопроизводстве России // Кормопроизводство России. М., 1997. С. 74–82.
2. Перспективы развития рапсосоения в Северо-Западном регионе РФ // Постановление научного координационного совета по земледелию, мелиорации и растениеводству Северо-Западного научно-методического центра РАСХН от 26 июня 2007 г. СПб. – Пушкин, 2007. 35 с.
3. *Микхеев А.И.* Минеральный состав кормов. Петрозаводск: Карелия, 1974. 144 с.
4. *Оль Ю.К.* Минеральное питание животных в различных природоохозяйственных условиях. Л.: Колос, 1967. 215 с.
5. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Волкова Е.Н.* Влияние различных видов фосфорных удобрений и фосфатного шлама на химический состав зеленой массы ярового рапса на кислой дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2006. № 3. С. 34–39.
6. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Алексеев Ю.В., Огелудин А.С.* Химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произвесткованных промышленными отходами // Агрохимия. 2008. № 7. С. 50–55.
7. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Нейбауэр А.О.* Поступление стронция в растения рапса в процессе растворения отходного мела, используемого для мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2012. № 3. С. 77–84.
8. *Литвинович А.В., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О.* Исследование микроэлементного состава ярового рапса на разных стадиях растворения химических мелиорантов // Агрохимия. 2014. № 5. С. 66–73.
9. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В.* Накопление стабильного стронция сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистых почв конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 9. С. 80–88.
10. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // Агрохимия. 2002. № 4. С. 81–87.
11. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В.* О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // Агрохимия. 2001. № 2. С. 74–78.
12. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Влияние фосфатного шлама на урожай и качество растениеводческой продукции // Удобрения и химические мелиоранты в агроэкосистемах. Мат-лы 5-й науч.-практ. конф. СПб., 1998. С. 149–153.
13. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // Агрохимия. 2010. № 10. С. 3–10.
14. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф.* Пространственная неоднородность кислотности почв // Агрохим. вестн. 2006. № 6. С. 10–12.
15. *Литвинович А.В.* Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
16. *Буре В.М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб., 2007. 141 с.

Translocation of Calcium into Spring Rape Plants from Sod-Podzolic Sandy Loam Soil Reclaimed with Conversion Chalk in a Wide Range of Doses. Comparison of Data Preparation Techniques for Building Empirical Models

A. V. Litvinovich^{a,b,#}, A.V. Lavrishchev^b, and V. M. Bure^{a,c}

^aAgrophysical Research Institute
Grazhdansky ave. 14, St. Petersburg–Pushkin 195220, Russia

^bSankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia

^cSankt-St. Petersburg State University
Universitetskaya nab., 7–9, St. Petersburg 199034, Russia

[#]E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

In a 24-year vegetation precision experiment based on acidic sod-podzolic sandy loam soil reclaimed with conversion chalk (CC) in a wide dose range, the effect of liming on the content of calcium available to plants in the soil and its translocation into rapeseed tissue was established. The results showed that rapeseed is an ecologically plastic plant species. An increase in the amount of chalk introduced from 0.1 to 3 full doses calculated by hydrolytic acidity led to an increase in the Ca concentration in rapeseed in the liming year from 0.81 to 3.14%. Empirical dependences of calcium concentration in soil and plants on the dose of chalk application have been developed. 3 approaches to the analysis of experimental data describing the relationship of calcium content in the soil with its accumulation in plant tissues are considered. It is shown that artificial averaging of the data on the calcium content in the soil with the same dose of meliorant in individual repetitions led to loss of information, which was reflected in the statistical characteristics of the constructed empirical models.

Keywords: sod-podzolic sandy loam soil, liming, conversion chalk, spring rape, empirical dependencies, translocation of calcium into plants from soil.

УДК 631.452:632.12:631.589

ПЛОДОРОДИЕ И ФИТОСАНИТАРНЫЕ КАЧЕСТВА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СЫРЬЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВЕННЫХ СМЕСЕЙ¹

© 2023 г. Л. Л. Свиридова^{1,*}, М. А. Севостьянов¹, Е. В. Гришина¹,
А. А. Свиридов¹, Д. Д. Поляков¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
ул. Институт, влад. 5, р.п. Большие Вяземы, Одинцовский р-н, Московская обл. 143050, Россия

*E-mail: larina67@bk.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 12.04.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Использование искусственных почвенных смесей, программируемых под каждый определенный вид растений и условия сельскохозяйственного производственного процесса, позволит существенно повысить урожайность выращиваемых в тепличных комбинатах сельскохозяйственных культур. В работе изучены варианты сформированных искусственных почвенных смесей, проверено их соответствие оптимальному набору плодородных компонентов. В перспективе исследованные почвенные смеси способны восполнить дефицит плодородного почвенного ресурса, особенно в условиях закрытого грунта.

Ключевые слова: искусственные почвенные смеси, агрохимические показатели, плодородные компоненты.

DOI: 10.31857/S0002188123110121, **EDN:** QGXKNS

ВВЕДЕНИЕ

В современном сегменте сельскохозяйственного производства показатели плодородия почвы, оказывающие благоприятное воздействие на количество и качество производимой продукции, находятся в минимуме, т.к. интенсификация производства в земледелии не позволяет сохранять уровень плодородия почв без дополнительного использования значительного количества органических и минеральных удобрений, а также агротехнических приемов, обеспечивающих поступление в почву дополнительных объемов сидератов и растительных остатков. В российском сельском хозяйстве отмечено тесное взаимодействие с научными структурами для поиска решения проблем производства. Полученные результаты составляют основу технологических прие-

мов, которые способствуют решению проблемы сохранения уровня почвенного плодородия.

Для получения качественных показателей истинного состояния плодородия пахотных почв используют элементы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения по следующим критериям оценки: морфологические описания исследованных почв, их агрохимические характеристики, ландшафтно-экологические условия. Одним из способов оценки плодородия почв является метод биоиндикации, который подразумевает исследование почвенной биоты, как показателя почвенного плодородия, а в качестве индикатора рассматривают дождевых червей посредством учета их численности и биомассы [1, 2]. Проанализированные результаты используют в ходе разработки мероприятий по повышению плодородия почв, например, за счет выравнивания пестроты почвенного покрова и доведения содержания питательных элементов в почве до оптимального уровня. Мелиорационные работы по структуризации почвенного покрова проводят в соответствии с предложенными методическими рекомендациями [3]. Такие работы предусмотрены для территорий со сложной структурой почвенного

¹ Работа выполнена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренного постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 по теме “Высокотехнологичное производство грунтов методами инновационной переработки отходов” (Контракт № 075-11-2021-059 от 24 июня 2021 г., идентификатор государственного контракта 000000S407521QL90002).

покрова. Например, деградация почв Нижнего Поволжья наносит огромный ущерб плодородию земельных ресурсов данного региона. Ученые наравне с производителями сельскохозяйственной продукции проводят исследовательский поиск решения данной проблемы. Применяют системы основной обработки почвы в севообороте с короткой ротацией, что способствует не только повышению производительности труда, но и улучшению фитосанитарного состояния почвы, а также сохранению эффективного плодородия [4].

Исследования проводят на протяжении многолетних наблюдений в стационарных опытах, с их помощью выявляют негативные процессы, оказывающие отрицательный эффект на показатели плодородия. Ученые Республики Татарстан за более 50-летний период наблюдений проанализировали данные с площадей, насыщенных кислыми почвами. По итогам проведенных исследований, предложен ряд мероприятий по повышению продуктивности пашни, которого можно достичь за счет выращивания сидератов и систематического известкования [5, 6]. Рекомендованные технологические приемы по улучшению плодородия почвы используют с широким применением различных предшественников озимой пшеницы, запашки зеленой массы сидеральной культуры. Проведенные мероприятия оценивают результатами экологической экспертизы [7].

На слитых выщелоченных черноземах для повышения содержания органического вещества используют технологические приемы с внесением органических или пожнивных остатков в виде соломы, данные технологические операции способствуют увеличению продуктивности полевых севооборотов [6]. Для увеличения плодородия также применяют смешанные посевы с нетрадиционным набором культур [7] и используют технологии прямого посева (no-till) [8, 9].

Плодотворная работа по стабилизации показателей плодородия почв часто осуществляется за счет внесения минеральных (в основу которых входят N, P, K) и органических удобрений. Данные технологические приемы в сочетании с технологическими операциями по соблюдению севооборотов с возделыванием кормовых культур необходимо проводить в соответствии с составленными агрохимическими картограммами [10].

Меры по стабилизации агрохимических показателей почвенных ресурсов становятся более доступными и осуществимыми за счет применения информационно-аналитических веб-систем. Каждая из разработанных программ включает в себя базу данных, подсистему авторизации пользователей,

облачное хранилище данных и подсистему резервного копирования, где главное меню состоит из специализированных пунктов, а ключевыми словами являются: почвы, тип деградации, воздействие, вид загрязнения, объект, категория, рекомендуемые технологии и подэтапы [11].

Создаваемые веб-ресурсы формируют за счет результатов, полученных в опытах, а данные исследований получают за счет новых методических рекомендаций. Например, одним из вариантов по улучшению методики выделения зон потенциального плодородия почвенного покрова является версия, когда применяют функции площадной интерполяции. Данные измерений формируют в методическом комплексе геостатистического анализа, при котором учитывают площадь входных объектов [12].

Другим способом повышения выхода сельскохозяйственной продукции с единицы площади является применение добавок к почве или грунтам на ее основе. В настоящее время активно исследуется возможность использования в этом качестве различных субстанций естественного и искусственного происхождения. В научной литературе есть упоминания о примерах использования осадков сточных вод [13], пыли электрофильтров с производств [14], речного ила [15, 19], бурого угля [19]. При добавлении этих и других подобных им субстанций в грунты можно не только решать проблему утилизации этих субстанций, но и менять механические свойства и химический состав грунта, более точно подстраивая его характеристики под выращиваемую культуру. Но такое внесение в почву сторонних субстанций кроме очевидных преимуществ также несет ряд рисков. К таким рискам относится вероятность нахождения во вносимых субстанциях солей тяжелых металлов, а также посторонней микробиоты, не характерной для почвы. Последняя может быть непосредственно патогенной для растений или менять состав почвенного микробиома, что в свою очередь может вести к нарушению почвенных процессов.

Коллектив научных сотрудников Всероссийского научно-исследовательского института фитопатологии проводит испытательные изыскания по выявлению качественных показателей плодородия искусственных и естественных компонентов почвенных смесей для увеличения урожайности выращиваемых на них культур и снижения их себестоимости. Цель работы – исследование перспективных сырьевых образцов (представленных в работе под буквенными обозначениями), их плодородных и фитосанитарных качеств. Искусственные почвенные смеси на данном этапе со-



Рис. 1. Подготовленные образцы почвенных смесей (а), проростки тест-культуры (б) на примере одного из образцов.

временного развития сельскохозяйственного производства играют важную роль в повышении экономической эффективности тепличных комбинатов. Ориентация на данную направленность исследований является стратегическим ходом, при котором возможно использование в качестве сырьевой основы отходов переработки сельскохозяйственного производства и прочих побочных продуктов и субстанций.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье приведены результаты исследования показателей плодородия сырьевых образцов, таких как содержание основных элементов питания, органического вещества и тяжелых металлов, влияние на рост и развитие тестовой культуры, а также состав почвенного микробиома. За контроль принят образец с наполнителем из песка без каких-либо добавок, как исходного материала при формировании почвенного плодородия материнской породы (рис. 1). Все остальные образцы находятся на стадии изучения, имеют статус испытуемых и представлены в статье под буквенными обозначениями.

Анализ исследованных образцов на содержание элементов питания и тяжелых металлов (для контроля качества почвенных смесей) проводили методами оптико-эмиссионной спектроскопии по стандартным протоколам [16, 17], с использованием прибора PlasmaQuant 9100. Анализировали содержание калия, фосфора, кадмия, никеля, свинца и стронция. Содержание азота в почве не

приводили, т.к. данный метод не позволяет его определять. Содержание органического вещества определяли по Тюрину [18].

Анализ почвенного микробиома проводили методом искусственных питательных сред. Для этого из каждого образца брали навеску 10 г воздушно-сухой почвы. После гомогенизации этих навесок порции субстрата по 0.1 г раскладывали пинцетом на питательную среду КГА в чашку Петри в количестве 5 шт. Исследование проводили в трехкратной повторности. Чашки Петри со средой инкубировали в течение 7 сут в темном термостате при температуре 24°C. Выросшие на среде микроорганизмы идентифицировали методами оптической микроскопии. Анализ большинства колоний проводили до рода, но при наличии отличительных признаков указывали и вид.

Тест-культурой в исследовании были растения огурца (*Cucumis sativus*) сорта Престиж (F1) с индетерминантным типом роста, не ограниченным в высоту, плети на кустах среднего размера, листья компактные, темно-зеленые, цветение женское. По биологическим показателям вегетационного цикла сорт считается ранним и достигает своей спелости на 42–45-е сут развития.

Для выявления оказанного влияния на ростовые особенности тест-культуры в подготовленные образцы почвы был произведен посев семян огурца. Опыт выполнен в четырехкратной повторности согласно разработанной схеме в Центре коллективного пользования “Лаборатория искусственного климата” ВНИИФ (температура воздуха 25°C, влажность почвенной среды

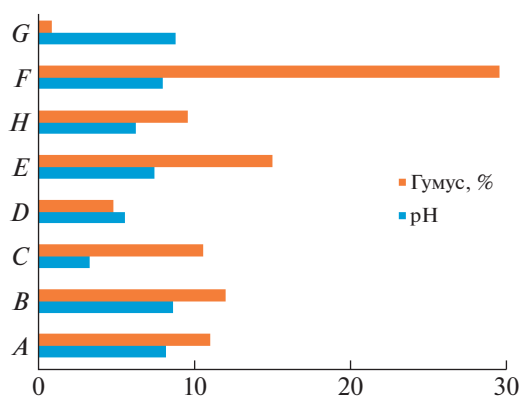


Рис. 2. Величина pH_{KCl} (ед.) и содержание гумуса (по Тюрину, %) почвы испытанных образцов.

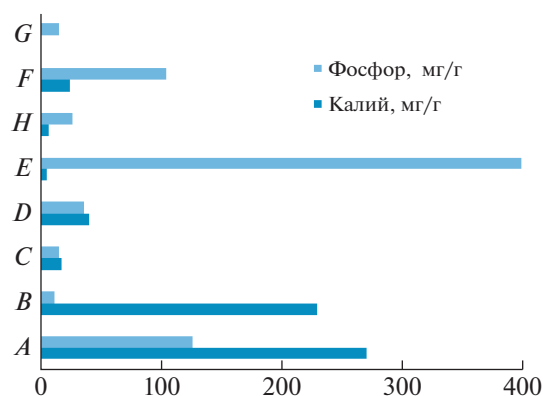


Рис. 3. Содержание доступных калия и фосфора в почве испытанных образцов.

75–80% НВ, световой режим — день—ночь). В ходе исследования проводили подсчет количества взошедших семян с фиксацией факта прорастания 20, 50 и 75% посеянных семян. Подсчет проводили каждые 12 ч. Исследование тест-растений проводили на 14-е сут после посева семян с фиксацией формирования первого настоящего листа (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного испытания в почвенных смесях определяли величину pH , содержание гумуса, элементов питания, поллютантов. Количество Cd, Ni, Pb, Sr было меньше пределов обнаружения прибора (1 мг металла/кг образца). Определение pH_{KCl} показало, что в группу добавок с $\text{pH} < 7.0$ вошли образцы A, D, H, с $\text{pH} > 7.0$ — B, C, E, F, G, почвенные образцы с нейтральной реакцией среды отсутствовали (рис. 2).

Таблица 1. Показатели прорастания растений тест-культуры огурца (14-е сут после посева)

Почвенный образец	Средняя всхожесть	Отклонение от заявленной всхожести, %
	%	
A	54.5	–37.5
B	60.9	–31.1
C	60.2	–31.8
D	52.0	–40.0
E	—	–92.0
H	44.0	–48.0
F	48.0	–44.0
G	61.1	–30.9

Содержание гумуса в образцах значительно различалось: максимальным оно было в образце F — 29.5, минимальным — в контроле G — 0.84% (рис. 3). По классификации содержания гумуса исследованные образцы характеризовались как:

- сильногумусовые, 9–10% — A, B, C, E, H, F;
- среднегумусовые, 5–9% — не выявлены;
- малогумусовые, 4–5% — D;
- слабогумусовые, <4% — G (контроль).

Содержание калия в доступной форме в образцах почвы было различным. Наибольшее количество калия выявлено в почве образцов A, B, а именно 270 и 229 мг/кг, наименьшее — в образце G (контроле). Содержание доступного фосфора также изменялось. Его максимальное количество выявлено в образце E (397 мг/кг), минимальное — в образце B (11.8 мг/кг).

Полученные результаты показали наличие необходимых для роста и развития растений компонентов плодородия в представленных образцах, при этом отмечена несбалансированность кислотно-щелочных реакций почвенной среды. Фенологические наблюдения за прорастанием семян тест-культуры показали, что испытанные почвенные образцы не обеспечили необходимые условия для первоначального этапа роста и развития растений. При заявленной 92%-ной всхожести семян огурца все почвенные образцы ингибировали прорастание семян и рост проростков. Наибольшие потери всходов выявлены для образца E (–92.0%), средние зафиксировали для образца H (–48.0%), минимальные — в контроле (образец G, 30.9%).

Немаловажным показателем плодородия почвенной смеси является наличие в ее составе мик-

роорганизмов. В образцах было выявлено присутствие следующих микроорганизмов:

A — *Trichoderma* (дополнительно идентифицированы *Penicillium waksmanii*, *Penicillium implicifum*, *Aspergillum nidulans*);

B — *Trichoderma*, *Fusarium*, *Penicillium*;

C — *Trichoderma*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* (дополнительно идентифицированы *Fusarium solani*);

D — *Trichoderma*, *Fusarium*, *Clonostachys*, *Pythium*, *Mucor* (дополнительно идентифицированы *Fusarium solani*, *Mucor moelleri*, стерильный мицелий);

E — *Artholofoy*, *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Homicola*, *Artrobdrys* (дополнительно идентифицированы *Aspergillum nidulans*);

H — *Clonostachys*, *Scopulanopsis*, *Acremonium*, *Botryotrichum*;

F — *Trichoderma*, *Fusarium solani*, *Penicillium*, *Clonostachys*, *Scopulanopsis*, *Coniothyrium*, *Mucor*;

G (контроль) — *Phoma*, *Alternaria*, *Mucor*.

В образцах *B*, *C*, *E* и *G* параллельно с грибами на искусственной питательной среде наблюдали развитие колоний бактерий.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что представленные образцы почвенных смесей по показателям плодородия не пригодны для возделывания тест-культуры огурца. Ни один образец не обладал сбалансированной кислотно-щелочной реакцией (pH 6.5–7.0). Варьирование величины pH происходило в широком диапазоне: от 3.2 до 8.8 ед.

2. Содержание элементов питания также было различным в образцах: наибольшее содержание калия обнаружено в образцах *A* и *B*, наименьшее — в образце *G* (контроле). Содержание подвижного фосфора было максимальным в образце *E*, минимальным — в образце *B*.

3. Всхожесть семян и рост проростков тест-растений огурца различались в зависимости от показателей плодородия образца, но все исследованные образцы негативно влияли на прорастание семян. Показано, что образец *E* — совершенно не пригодная почвенная среда для проращивания семян тест-культуры, т.к. всхожесть семян уменьшилась на 92.0%. Образец *H* снизил всхожесть на 48.0%, наименьшее негативное влияние на всхожесть показал образец *G* (контроль) — снижение на 30.9% (по сравнению с заявленной).

4. Все образцы протестированы на наличие микроорганизмов, полученные результаты сви-

детельствовали о наличии патогенной биоты, что необходимо учитывать при составлении почвенных смесей из предложенных почвенных ресурсов.

5. Итогом проведенного исследования следует считать анализ исследованных образцов как компонентов почвенных смесей, которые представляют определенную ценность — их использование можно рекомендовать в определенных соотношениях, ограниченных по количеству, совместно с базовыми почвенными смесями с учетом корректирующих факторов и других добавок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыбалов В.С., Денисов Ю.Н. Оценка основных показателей почвенного плодородия Челябинской области // Научн. ежегодник Центра анализа и прогнозирования. 2018. № 1 (2). С. 244–248.
2. Шабанов В.В., Солошенко А.Д. Количественные методы оценки плодородия для целей точного мелиоративного регулирования // Природообустройство. 2020. № 4. С. 13–22. <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2020-4-13-22>
3. Алманова Ж.С., Кенжегулова С.О., Калакова М.Е. Современное состояние почвенного плодородия пахотных почв Федоровского района Костанайской области // Вестн. Курск. ГСХА. 2021. № 9. С. 81–86.
4. Курдюков Ю.Ф., Азизов З.М., Архипов В.В., Степанченко Д.А. Технологии основной обработки почвы, повышающие эффективное плодородие и биологическую активность почвы // Аграрн. вестн. Юго-Востока. 2018. № 3 (20). С. 37–41.
5. Сулейманов С.Р., Низамов Р.М., Сафиоллин Ф.Н., Логинов Н.А. Мониторинг и приемы повышения плодородия почв Республики Татарстан // Плодородие. 2020. № 3 (114). С. 23–26. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.114.07>
6. Адибекаев Р.Э. Принципы формирования почвенного плодородия и пути его повышения // Студ. наука: взгляд молодых. Мат-лы студ. научн.-практ. конф., Майкоп, 22–26 апреля 2019 г. Майкоп: Майкоп. ГТУ, 2019. С. 44–47.
7. Дробышев А.П., Пугач Д.А., Пугач Е.Д. Поливидовые посевы и промежуточные культуры в кормовых севооборотах как биологический прием регулирования плодородия почвы // От биопродуктов к биоэкономике: Мат-лы III межрегион. научн.-практ. конф. (с международным участием), Барнаул, 07–08 ноября 2019 г. / Под ред. А.Н. Лукьянова. Барнаул: Алтай. ГУ, 2019. С. 25–28.
8. Медведева А.М., Бирюкова О.А. Плодородие чернозема обыкновенного при внедрении системы no-till // Энтузиасты аграрной науки: Сб. ст. по мат-лам Всерос. научн.-практ. конф., посвящ. 100-летию кафедры почвоведения Кубан. ГАУ им. И.Т. Трубилина и 80-летию чл.-кор. РАН В.Н. Кудеярова, Краснодар, 05–06 сентября 2019 г. / Отв. за вып. А.Х. Шеуджен. Краснодар: Кубан. ГАУ им. И.Т. Трубилина, 2019. С. 51–53.

9. Осипов А.В., Суминский И.И., Хамитова М.И. Современное состояние плодородия луговых почв Западно-Дельтовой зоны Краснодарского края // Инновационные технологии отечественной селекции и семеноводства: Сб. тез. по мат-лам II науч.-практ. конф. молод. ученых Всерос. форума по селекции и семеноводству, Краснодар, 24–25 октября 2018 г. / Отв. за выпуск А.Г. Кошаев. Краснодар: Кубан. ГАУ им. И.Т. Трубилина, 2018. С. 22–24.
10. Сулейменов Б.У., Сапаров А.С., Сапаров Г.А. Агрохимическая оценка плодородия почв агропарка “Онтустик” // Почвовед. и агрохим. 2020. № 1. С. 50–61.
11. Матвеев А.В., Корженевский Б.И. Разработка информационно-аналитической веб-системы для восстановления плодородия почв и рекультивации деградированных агроландшафтов // Мелиорат. и водн. хоз-во. 2020. № 1. С. 5–9.
12. Клебанович Н.В., Киндеев А.Л., Кизеева В.С. Применение методов площадной интерполяции при определении зон потенциального плодородия почв сельскохозяйственных земель // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 4. С. 120–134. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-4-27-120-134>
13. Баронин Е.А. Возможность получения рекультиванта из осадка сточных вод городских очистных сооружений // Мат-лы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ., Киров, 24 ноября 2021 г. Киров: Вятск. гос. ун-т, 2021. С. 63–67.
14. Василенко Т.А., Мохаммед А.Х. Применение осадка механической и биологической очистки бытовых и производственных сточных вод в качестве удобрения // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 211–219. EDN VWZDRV.
15. Санаева Л.Г. Использование речного ила для повышения плодородия почвы // Экология речных ландшафтов: Сб. ст. по мат-лам IV Международ. научн. экол. конф., Краснодар, 03 декабря 2019 г. Краснодар: Кубан. ГАУ им. И.Т. Трубилина, 2020. С. 181–186.
16. Тихомиров Н.Е., Каплан М.А., Горбенко А.Д. Исследование компостов в разных фазах закладки на содержание тяжелых металлов // Форум молод. ученых государств-участников СНГ “Наука без границ”: Сб. мат-лов., Н. Новгород, 01–04 ноября 2022 г. Т. 1. М.: АНО СПИД “Центр научно-технических решений”, 2023. С. 178–179.
17. Шольц Я., Мурдаков В. Новый ИСП-ОЭС PlasmaQuant PQ 9000: возможности и преимущества // Аналитика. 2014. № 5 (18). С. 96–98.
18. Макаров В.И., Юскин А.А. Совершенствование методики определения содержания гумуса в почвах по методу Тюрина // Плодородие. 2008. № 6 (45). С. 19–21.
19. Sokolov G., Szajdak L., Simakina I. Changes in the structure of nitrogen-containing compounds of peat-, sapropel-, and brown coalbased organic fertilizers // Agron. Res. 2008. V. 6 (1). P. 149–160.

Fertility and Phytosanitary Qualities of Promising Raw Materials for the Formation of Artificial Soil Mixs

L. L. Sviridova^{a, #}, M. A. Sevostyanov^a, E. V. Grishina^a, A. A. Sviridov^a, and D. D. Polyakov^a

^aAll-Russian Research Institute of Phytopathology

Institute str., vlad. 5, r.p. Bolshye Vyazemy, Odintsovo district, Moscow region 143050, Russia

[#]E-mail: larina67@bk.ru

The use of artificial soil mixtures programmed for each specific type of plants and conditions of the agricultural production process will significantly increase the yield of crops grown in greenhouse plants. The variants of the formed artificial soil mixtures have been studied, their compliance with the optimal set of fertile components has been verified. In the future, the studied soil mixtures are able to fill the deficit of a fertile soil resource, especially in closed ground conditions.

Keywords: artificial soil mixtures, agrochemical indicators, fertile components.

УДК 628.36:631.416.1:631.445.41

ВЛИЯНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В СОЧЕТАНИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ДОБАВКАМИ НА АЗОТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО

© 2023 г. И. М. Габбасова¹, Т. Т. Гарипов¹, Е. С. Дорогая¹,
М. А. Комиссаров^{1,*}, Ф. И. Назырова¹, А. С. Нигматзянов²

¹Уфимский институт биологии УФИЦ РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

²Башкирский государственный аграрный университет
450001 Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, Россия

*E-mail: mkomissarov@list.ru

Поступила в редакцию 08.04.2023 г.

После доработки 13.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В 3-месячном модельном опыте изучено влияние внесения осадков сточных вод (*ОСВ*) в дозах 40 и 80 г/сосуд, что в пересчете на сухой вес соответствует 5 и 10 т/га в сочетании с соломой, кизельгуром и сапропелем на азотное состояние чернозема выщелоченного слабоэродированного. Показано, что добавление к *ОСВ* кизельгура и сапропеля, в отличие от соломы, способствовало улучшению показателей азотного состояния почвы. Повышение дозы *ОСВ* приводило к достоверному увеличению содержания щелочногидролизующего азота. При компостировании добавок с *ОСВ* обогащение почвы минеральным азотом можно расположить в следующий убывающий ряд: кизельгур суспендированный > кизельгур сухой > сапропель > *ОСВ* без добавок > солома. Воздействие двойной дозы *ОСВ* на содержание общего и минерального азота, гумусированность и pH почвы существенно не отличалось от одинарной дозы. Использование высоких доз *ОСВ* целесообразно с точки зрения утилизации отходов.

Ключевые слова: азотное состояние почвы, кизельгур, осадки сточных вод, сапропель, солома.

DOI: 10.31857/S0002188123110054, **EDN:** PPGLZR

ВВЕДЕНИЕ

Среди элементов питания растений особую роль играет азот. Наряду с использованием минеральных и органических удобрений его альтернативным источником могут быть азотсодержащие отходы, нуждающиеся в утилизации. Одними из постоянно увеличивающихся в объемах отходов мегаполисов являются осадки сточных вод (*ОСВ*). В РФ накапливается порядка 2.5 млн т в пересчете на сухое вещество ежегодно [1]. Содержание общего азота в составе *ОСВ* в зависимости от технологии обработки, сезона, климатической зоны, изменяется в диапазоне 1–5% [2–6]. Использование *ОСВ* в качестве удобрения регламентируется несколькими нормативными документами: СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”, ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 “Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений”, ГОСТ Р 54651-2011 “Удобре-

ния органические на основе осадков сточных вод” и ГОСТ Р 59748-2021 “Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования”. *ОСВ* можно использовать в качестве основы органических удобрений в зависимости от их методов обработки, состава и свойств. Прошедшие обработку — могут классифицироваться как “побочная продукция” и предназначаться для использования в качестве органических, органоминеральных и органо-известковых удобрений, почвогрунтов (растительных грунтов), рекультивантов, изолирующего материала, биотоплива и т.п. Многие авторы отмечают, что эффективность *ОСВ* сопоставима с навозом [7–9], а в некоторых случаях *ОСВ* результативнее традиционных удобрений, особенно на малогумусных почвах [2]. Помимо удобрительного эффекта, *ОСВ* способны сорбировать и удерживать воду, что актуально для территорий с аридным климатом [10]. Целесообразно добавлять к *ОСВ* материалы (листья, древесную кору, опилки, торф и др.), допол-

Таблица 1. Схема опыта

Вариант	Внесено в сосуд, г/кг почвы	Краткое название варианта
Контроль	—	К
<i>ОСВ</i> 5 т/га (в пересчете на сухой вес) — 1 доза	40 г <i>ОСВ</i>	<i>ОСВ</i> (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га (в пересчете на сухой вес) — 2 дозы	80 г <i>ОСВ</i>	<i>ОСВ</i> (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + солома 0.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 4 г соломы	<i>ОСВ</i> + сол (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + солома 1 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 8 г соломы	<i>ОСВ</i> + сол (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + сапропель 2.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 20 г сапропеля	<i>ОСВ</i> + сап (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + сапропель 5 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 40 г сапропеля	<i>ОСВ</i> + сап (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + кизельгур сухой 7.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 60 г кс	<i>ОСВ</i> + кс (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + кизельгур сухой 15 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 120 г кс	<i>ОСВ</i> + кс (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + кизельгур жидкий (суспендированный) 7.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 280 мл кж	<i>ОСВ</i> + кж (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + кизельгур жидкий 15 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 560 мл кж	<i>ОСВ</i> + кж (2)

Примечание. Обозначения вариантов те же в табл. 2.

нительно улучшающие как питательные, так и физические свойства полученного мелиоранта, что особенно актуально для почв, подверженных эрозии. Эффективность использования различных добавок для повышения плодородия и снижения эродированности черноземов в Южном Предуралье показана ранее [11–13]. Изучен состав *ОСВ* с очистных сооружений региона и предложена технология по снижению концентрации тяжелых металлов в них [14], но воздействие *ОСВ* на свойства почв Предуралья мало изучено. В связи с этим целью работы было изучение влияния внесения *ОСВ* в сочетании с различными добавками (соломой, кизельгуром и сапропелем) на азотное состояние чернозема выщелоченного слабоэродированного.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования был использован чернозем выщелоченный, легкоголистый, слабоэродированный Южной лесостепи Республики Башкортостан. Эта почва характеризуется средней мощностью гумусово-аккумулятивных горизонтов, средней гумусированностью, слабокислой реакцией среды. Для проведения модельного опыта использовали почву из пахотного горизонта (0–20 см). *ОСВ* были взяты с городских очистных сооружений после окончания технологического цикла их обработки. Добавками служили органические субстраты: измельченная пшеничная солома, кизельгур (отход пивного производства) в виде суспензии и порошка, сапропель из осушенного болота.

Аналитические исследования проводили в соответствии с общепринятыми методами [15]. Валовой

азот определяли по Кьельдалю, щелочногидролизуемый — по Корнфилду, нитратный — колориметрическим методом с дисульфифеноловой кислотой, аммонийный — колориметрическим методом с реактивом Несслера, содержание органического углерода — по Тюрину. Модельный опыт был заложен по схеме, представленной в табл. 1. 1 кг сухой почвы, просеянной через сито с диаметром отверстий 3 мм, помещали в пластиковые контейнеры емкостью 2 л. Наполнители также измельчали, просеивали и вносили в почву в сухом виде, тщательно перемешивали и затем периодически добавляли воду. Жидкий кизельгур вносили по объему с учетом его влажности. Опыт проводили в 3-кратной повторности в течение 12 нед при постоянной температуре (20°C) и влажности (~60% ПВ) субстрата. Отбор образцов для определения минеральных форм азота производили каждые 2 нед. Содержание гумуса, общего и щелочногидролизуемого азота, актуальную и обменную кислотность определяли по завершению опыта. Результаты обрабатывали методами математической статистики с помощью программы MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение в почву *ОСВ* совместно со всеми использованными добавками способствовало увеличению содержания минерального азота. В начале опыта самое высокое содержание N-NH₄ в почве было при внесении жидкого кизельгура (50.6 и 83.8 мг/кг почвы в зависимости от дозы), но в дальнейшем оно резко снизилось. Содержание аммония в остальных вариантах вначале было на порядок меньше (рис. 1) и последовательно

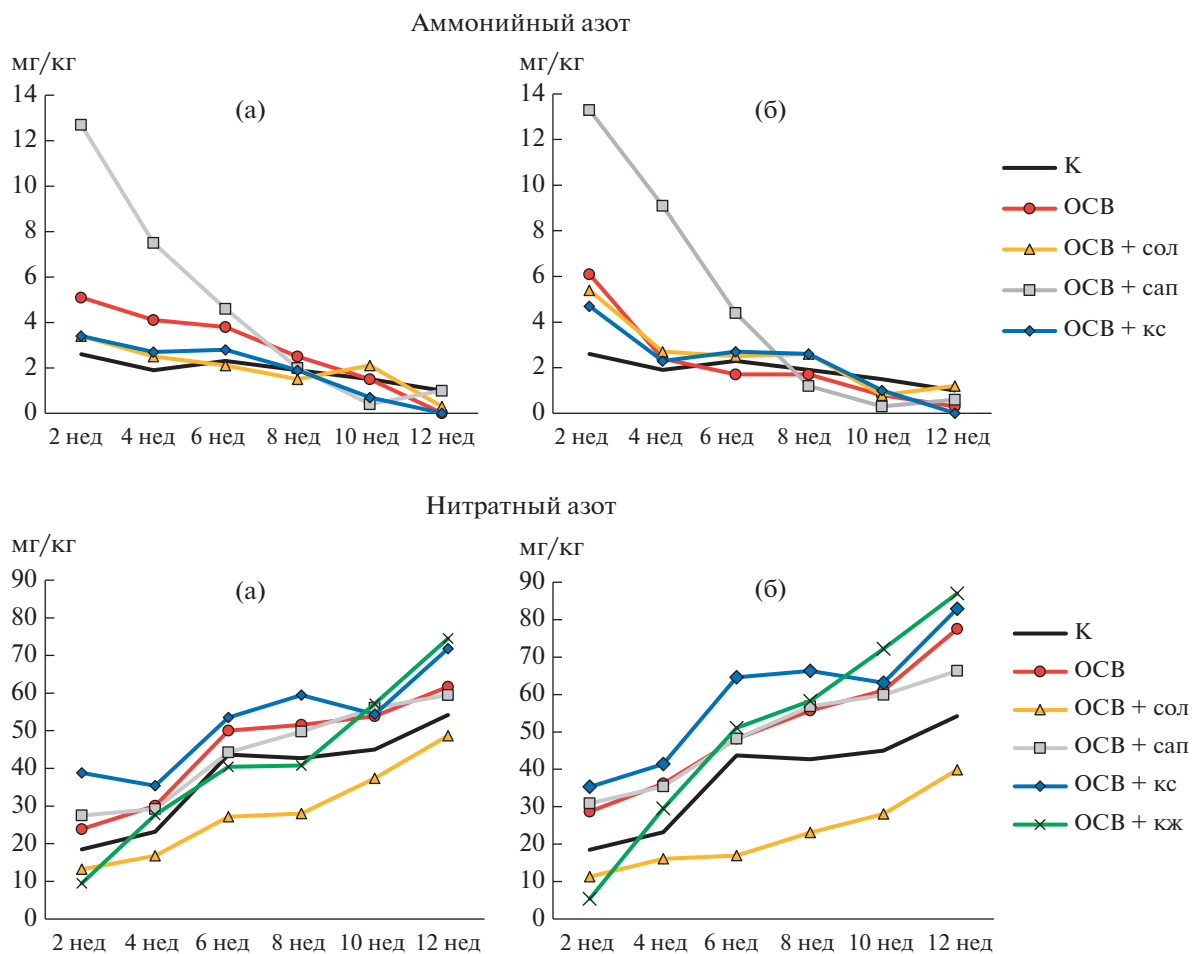


Рис. 1. Динамика содержания аммонийного и нитратного азота в почве: (а) — одинарная доза, (б) — двойная доза *OCB*.

снижалось в процессе компостирования. Вне зависимости от дозы *OCB* и вида добавок содержание $N-NH_4$ выравнивалось и приближалось к контрольному варианту через 6 нед. Очевидно, что наряду с газообразными потерями это было связано с развитием процесса нитрификации в окислительных условиях опыта.

Содержание нитратной формы азота в начале опыта было значительно больше аммонийной (кроме варианта с жидким кизельгуром). При этом необходимо отметить, что в этом варианте (*OCB* + кж), а также при добавлении соломы, содержание $N-NO_3$ было меньше, чем в контроле. В процессе компостирования оно постепенно возрастало. В целом динамика содержания минеральных форм азота соответствовала их изменению в полевых условиях при внесении помета с растительными остатками в слабоэродированный чернозем [16].

При внесении двойных доз в вариантах *OCB*, *OCB* + сап и *OCB* + кс содержание минерального

азота в почве было на 11–13% больше, чем при одинарных дозах. В варианте *OCB* + кж превышение составило 31%, в основном за счет высокого содержания $N-NH_4$ в первые 2 нед компостирования. Добавление соломы через 2.5 мес. опыта привело к снижению содержания минерального азота на 28% по сравнению с контролем, при двойной дозе оно было меньше, чем при одинарной дозе на 18%. Вероятно, это было обусловлено тем, что с соломой, обедненной азотом, особенно с ее двойной дозой, вносили много относительно труднорастворимых соединений (целлюлозы, клетчатки, лигнина и др.). Очевидно, для разложения и минерализации соломы срок компостирования, равный 12 нед, недостаточен, что видно по ее сохранившемуся анатомическому строению. Об этом свидетельствовало также самое низкое содержание общего азота и самое широкое соотношение $C : N$ в этих вариантах (табл. 2). При общей средней обогащенности азотом почва варианта *OCB* + сол (2) относится к категории “низкая”.

Таблица 2. Агрохимические свойства почвы при внесении *ОСВ* с разными добавками

Вариант	Гумус, %	pH _{KCl}	N _{общ} , %	N _{щел} , мг/кг	C : N
К	6.1 ± 0.1	5.5 ± 0.1	0.35 ± 0.03	152 ± 4	10.1
<i>ОСВ</i> (1)	6.4 ± 0.2	5.8 ± 0.1	0.37 ± 0.02	160 ± 3	10.0
<i>ОСВ</i> (2)	7.0 ± 0.3	6.0 ± 0.2	0.40 ± 0.03	169 ± 3	10.2
<i>ОСВ</i> + сол (1)	6.7 ± 0.1	5.9 ± 0.1	0.38 ± 0.01	155 ± 2	10.2
<i>ОСВ</i> + сол (2)	7.0 ± 0.2	6.1 ± 0.1	0.32 ± 0.02	158 ± 3	12.7
<i>ОСВ</i> + сап (1)	7.3 ± 0.2	6.6 ± 0.1	0.44 ± 0.02	175 ± 3	9.6
<i>ОСВ</i> + сап (2)	7.8 ± 0.3	6.7 ± 0.2	0.48 ± 0.02	184 ± 2	9.4
<i>ОСВ</i> + кс (1)	6.8 ± 0.2	5.7 ± 0.1	0.38 ± 0.01	168 ± 2	10.4
<i>ОСВ</i> + кс (2)	6.6 ± 0.2	5.9 ± 0.1	0.38 ± 0.01	174 ± 1	10.1
<i>ОСВ</i> + кж (1)	6.5 ± 0.2	5.2 ± 0.2	0.42 ± 0.03	181 ± 4	9.0
<i>ОСВ</i> + кж (2)	6.6 ± 0.1	5.3 ± 0.3	0.45 ± 0.02	186 ± 2	9.4

Примечание. ± — стандартная ошибка.

Основная масса почвенного азота входит в состав органических соединений гумуса. Внесение в чернозем выщелоченный *ОСВ* способствовало повышению его гумусированности через 12 нед компостирования. В полевом опыте на дерново-подзолистой почве содержание гумуса заметно возрастало лишь при внесении очень высоких доз *ОСВ* [17], и суммарное накопление минерального азота в почве изменялось пропорционально дозе *ОСВ* (180–1440 т/га) с превышением относительно контроля на 8.5–61.7% [18]. На фоне небольшого увеличения содержания гумуса при внесении *ОСВ* наиболее эффективным было добавление сапропеля, наименее — жидкого кизельгура. В почве этих же вариантов наблюдали максимальное изменение кислотности: ее нейтрализация в первом и подкисление во втором случае, что было связано с реакцией среды добавленных материалов (рН сапропеля — 7.0, кизельгура — 4.3 ед.). Внесение компостов на основе *ОСВ* в серую лесную почву также приводило к снижению всех видов кислотности [19].

Содержание щелочногидролизующего азота — ближайшего резерва азотного питания растений — при внесении *ОСВ* в дозе 5 т/га увеличилось в среднем на 16 мг/кг, в дозе 10 т/га — 22 мг/кг. Использование жидкого кизельгура и сапропеля привело к дополнительному увеличению содержания щелочногидролизующего азота до 26 и 33 мг/кг соответственно. При внесении двойной дозы удобрений содержание щелочногидролизующего азота, в отличие от валовых форм гумуса и азота, было достоверно больше, чем при внесении одинарной ($t_{st} = 3.2$ при $p < 0.05$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внесение осадков сточных вод (*ОСВ*) в чернозем выщелоченный слабоэродированный оказало заметное влияние на его азотное состояние. При этом увеличение дозы *ОСВ* с 5 до 10 т/га приводило к достоверному росту содержания щелочногидролизующего азота. Добавление к *ОСВ* кизельгура и сапропеля, в отличие от соломы, способствовало улучшению показателей азотного состояния почвы. По обогащенности почвы минеральным азотом варианты опыта можно расположить в следующий убывающий ряд: *ОСВ* + кизельгур жидкий > *ОСВ* + кизельгур сухой > *ОСВ* + сапропель > *ОСВ* > Контроль > > *ОСВ* + солома. Эффективность повышенной в 2 раза дозы *ОСВ* по влиянию на азотное состояние, гумусированность и кислотность почвы существенно не отличалась от одинарной дозы, но ее использование целесообразно с точки зрения утилизации отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламова Л.Д., Короленко И.Д. Нетрадиционные удобрительные материалы в растениеводческом комплексе России и Нижегородской области // Агрохим. вестн. 2017. № 2. С. 15–20.
2. Лучицкая О.А., Севостьянов С.М. Воздействие осадков сточных вод на почву и растения // Агрохимия. 2007. № 9. С. 80–84.
3. Пахненко Е.П., Ермаков А.В., Убугунов Л.Л. Влияние осадков сточных вод города Улан-Удэ на свойства почвы, продуктивность и качество картофеля // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 4. С. 33–39.
4. Васбиева М.Т. Влияние длительного применения осадков сточных вод в качестве удобрения на продуктивность зернотравяного севооборота и каче-

- ство сельскохозяйственных культур // *Агрохимия*. 2016. № 1. С. 44–51.
5. Жигарева Ю.В., Мерзлая Г.Е. Агроэкологическая оценка эффективности осадков сточных вод на дерново-подзолистых почвах Тверской области // *Плодородие*. 2018. № 2. С. 49–51.
 6. Плеханова И.О. Степень самоочищения агродерново-подзолистых супесчаных почв, удобренных осадком сточных вод // *Почвоведение*. 2017. № 4. С. 506–512.
<https://doi.org/10.1134/S1064229317040081>
 7. Иванов А.И., Иванов И.А., Иванова Ж.А., Цыганова Н.А., Моисеев Д.А. Азотный режим легких дерново-подзолистых почв и пути его улучшения в современных условиях // *Агрохимия*. № 9. 2008. С. 5–15.
 8. Юмашев Н.П. Использование осадков сточных вод в качестве удобрений на выщелоченных черноземах Тамбовской области // *Агрохимия*. 2008. № 2. С. 57–65.
 9. Никитин С.Н., Завалин А.А. Влияние удобрений и биопрепаратов на продуктивность зернопарового севооборота, потоки элементов питания и свойства чернозема выщелоченного в лесостепи Среднего Поволжья // *Агрохимия*. 2017. № 6. С. 12–29.
 10. Межевова А.С., Берестнева Ю.В. Исследование особенностей структуры и свойств илового осадка с целью применения в качестве почвенного мелиоранта в земледелии аридных регионов // *Аридные экосистемы*. 2023. Т. 29. № 1 (94). С. 113–119.
<https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-113-119>
 11. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Галимзянова Н.Ф., Сулейманов Р.Р., Комиссаров М.А., Сидорова Л.В., Гималетдинова Г.А. Использование удобрения на основе сплавнины для повышения плодородия эродированного чернозема типичного // *Агрохимия*. 2014. № 6. С. 35–42.
 12. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Гарипов Т.Т., Комиссаров М.А., Сидорова Л.В., Галимзянова Н.Ф., Liebelt P., Абакумов Е.В., Гималетдинова Г.А., Простякова З.Г. Использование местных удобрений, почвенного гриба *Trichoderma koningii* oudem и no-till обработки для улучшения агрочернозема в Южном Предуралье // *Сел.-хоз. биол.* 2018. Т. 53. № 5. С. 1004–1012.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.5.1004rus>
 13. Komissarov M., Gabbasova I., Garipov T., Suleymanov R., Sidorova L. The Effect of phosphogypsum and turkey litter application on the properties of eroded agro-chnozem in the South Ural region (Russia) // *Agronomy*. 2022. V. 12. № 11. P. 2594.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12112594>
 14. Гаврилов М.М., Пименов А.А., Красников П.Е. Снижение содержания тяжелых металлов в осадках сточных вод при биодеструкции с добавлением гипса // *Природообустройство*. 2018. № 2. С. 108–114.
<https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-2-109-114>
 15. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
 16. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Простякова З.Г., Сулейманов Р.Р., Комиссаров М.А. Азотное состояние агрочернозема при внесении высоких доз куриного помета // *Экобиотехнология*. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–5.
<https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-1-1-5>
 17. Касатиков В.А., Шабардина Н.П., Раскатов В.А. Последствие повышенных доз осадка городских сточных вод на азотный режим, биологические показатели и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // *Плодородие*. 2019. № 6. С. 45–48.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.111.1>
 18. Касатиков В.А. Влияние мелиоративных доз осадка городских сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвы и продуктивность зерновых культур. *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 64–68.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.111.1>
<https://doi.org/10.31857/S>
 19. Карякина С.Д., Карякин А.В., Касатиков В.А. Агроэкологическая эффективность аэробного компостирования осадков сточных вод при производстве органических удобрений // *Пробл. агрохим. и экол.* 2014. № 3. С. 14–18.

Impact of Sewage Sludges in Combination with Various Amendments on the Nitrogen State of Leached Chernozem

I. M. Gabbasova^a, T. T. Garipov^a, E. S. Dorogaya^a, M. A. Komissarov^{a, #},
F. I. Nazzyrova^a, and A. S. Nigmatzyanov^b

^aUfa Institute of Biology UFRS RAS, prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

^bBashkir State Agrarian University, ul. 50 Let Oktyabrya 34, Ufa 450001, Russia

[#]E-mail: mkomissarov@list.ru

In a 3 months model experiment, the effect of application of sewage sludge (SS) at doses of 40 and 80 g/vessel (in terms of dry mass corresponds to 5 and 10 t/ha) in combination with straw, kieselguhr and sapropel, on the nitrogen state of leached, slightly eroded chernozem, was studied. It is shown that the addition of kieselguhr and sapropel to SS, unlike of straw, improves the parameters of the soil nitrogen state. A raise of the SS dose leads to a significant increase of the alkaline hydrolysable nitrogen content. The ability of ameliorants with SS to enrich the soil by mineral nitrogen can be arranged in the following descending row: suspended kieselguhr > dry kieselguhr > sapropel > SS severally > straw. A double dose of SS does not differ significantly from a single dose in terms of its influence on the contents of total and mineral nitrogen, humification and soil acidity; the use of high doses of SS is rational for waste disposal.

Keywords: soil nitrogen status, kieselguhr, sewage sludge, sapropel, straw.