

Номер 10

ISSN 0002-1881

Октябрь 2023

АГРОХИМИЯ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 10, 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Влияние способов обработки лугово-черноземной почвы на содержание органического вещества и ее структурное состояние
Н. Ф. Балабанова, Н. А. Воронкова, Л. В. Юшкевич 3
- Урожайность и качество сельскохозяйственных культур в зависимости от плодородия дерново-подзолистой почвы
И. В. Лыскова, Т. В. Лыскова 9
- Динамика содержания элементов питания в агрочерноземе при возделывании рыжика посевного
Н. Л. Кураченко, О. А. Ульянова, О. А. Власенко, В. В. Казанов, Е. Ю. Казанова 20
-

Удобрения

- Удобрение однолетних трав на серых лесных почвах Владимирского ополья
В. В. Окорков, Л. А. Окоркова, А. Е. Лебедева 26
- Влияние зеленого и минеральных удобрений на агрохимические показатели почвы и урожайность льнопродукции в севооборотах с короткой ротацией
Т. П. Сухопалова 38
-

Пестициды

- Комбинированные триазольные протравители и их влияние на рост и развитие проростков яровой пшеницы
А. Ю. Кекало, С. С. Халиков, М. М. Ильин, Н. Д. Чкаников, Н. Ю. Заргарян 45
-

Агроэкология

- Эффективность применения биогумуса личинок мухи черная львинка (*Hermetia illucens*) при проращивании семян зернобобовых культур
К. А. Баштовенко, С. И. Лоскутов, Д. С. Рябухин 53
- Влияние аморфного кремнезема на продуктивность и качество томатов
Е. А. Бочарникова, А. А. Касацкий, В. В. Матыченков 61
- Применение водной суспензии пористых наночастиц SiO₂, содержащих 9,10-дифенилантрацен, в агрофотонике
Б. М. Гареев, Г. Л. Шарипов, О. В. Ласточкина 66
- Потери кальция из мелиорируемой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при разном уровне влагообеспеченности
А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, В. М. Буре, И. В. Салаев 75
-

ОБЗОРЫ

- Токсины почвенных микроскопических грибов: распространение, экологическая роль, биодegradация
Ю. М. Поляк, В. И. Сухаревич 87
-
-

Contents

No. 10, 2023

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Influence of Tillage Systems on the Content of Organic Matter and Its Structural State
N. F. Balabanova, N. A. Voronkova, L. V. Yushkevich 3
- Dependence of Crop Yield and Quality on Fertility of Sod-Podsolic Soil
I. V. Lyskova, T. V. Lyskova 9
- Dynamics of the Content of Nutrients in Agrochernozem during the Cultivation of Ginger Seed
N. L. Kurachenko, O. A. Ulyanova, O. A. Vlasenko, V. V. Kazanov, E. Yu. Kazanova 20
-

Fertilizers

- Fertilization of Annual Grasses on Gray Forest Soils of the Vladimir Opole
V. V. Okorkov, L. A. Okorkova, A. E. Lebedeva 26
- Influence of Green and Mineral Fertilizers on Agrochemical Indicators of the Soil and the Yield of Flax Products in Crop Rotations with Short Rotation
T. P. Sukhopalova 38
-

Pesticides

- Combined Triazole Disinfectants and Their Influence on the Growth and Development of Spring Wheat Seedlings
A. Yu. Kekalo, S. S. Khalikov, M. M. Ilyin, N. D. Chkanikov, N. Yu. Zargaryan 45
-

Agroecology

- Effectiveness of the Use of Vermicompost Larvae of the Black Lion Fly (*Hermetia illucens*) when Germinating Seeds of Leguminous Crops
K. A. Bashtovenko, S. I. Loskutov, D. S. Ryabukhin 53
- Effect of Amorphous Silicon Dioxide on Productivity and Quality of Tomato
E. A. Bocharnikova, A. A. Kasatskii, B. B. Matichenkov 61
- Aqueous Suspension of Porous SiO₂ Nanoparticles, Containing 9,10-Diphenylanthracene, in Agrophotonics
B. M. Gareev, G. L. Sharipov, O. V. Lastochkina 66
- Calcium Losses from Reclaimed Sod-Podzolic Light Loamy Soil at Different Levels of Moisture Availability
A. V. Litvinovich, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure, I. V. Salaev 75
-

REVIEWS

- Toxins Produced by Soil Fungi: Distribution, Ecological Role, Biodegradation
Yu. M. Polyak, V. I. Sukharevich 87
-
-

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ НА СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ЕЕ СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ

© 2023 г. Н. Ф. Балабанова^{1,*}, Н. А. Воронкова¹, Л. В. Юшкевич¹

¹Омский аграрный научный центр
644012 Омск, просп. Королева, 26, Россия

*E-mail: natascha.balabanowa@mail.ru

Поступила в редакцию 21.03.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

В длительном стационарном опыте на основе 4-польного плодосменного севооборота изучили влияние способов обработки с различным уровнем механического воздействия на почву: отвальной (вспашка на глубину 20–22 см), комбинированной (чередование вспашки, плоскорезной обработки (на глубину 10–12 см), без обработки) и плоскорезной обработки на содержание органического вещества и структурно-агрегатный состав лугово-черноземной почвы. Установлено, что снижение интенсивности и глубины обработки почвы при комбинированной и плоскорезной системе увеличивало содержание гумуса на 0.30 и 0.48% в слое 0–20 см в сравнении с отвальной обработкой. Система обработки почвы оказала существенное влияние на послочное распределение лабильного органического вещества в виде мортмассы. Наибольшие запасы мортмассы в пахотном слое были отмечены в варианте отвальной системы обработки почвы – 8.69 т/га. На ресурсосберегающих фонах выявлена тенденция к снижению запасов мортмассы в почве на 0.08–0.69 т/га. Вклад агрономически ценных структурных отдельностей размером 0.25–10 мм, послочно составлял 43.1–65.4, а выход крупных комков и пыли – 34.6–56.9% от массы почвы. Наилучшее структурное состояние почвы отмечено при применении отвальной системы обработки. Установлено наличие тесной корреляционной связи между запасами мортмассы в почвенном слое 0–20 см и содержанием структурно-агрегатных фракций размером 10–5 мм ($r = 0.72 \pm 0.11$) и 5–3 мм ($r = 0.68 \pm 0.10$).

Ключевые слова: лугово-черноземная почва, гумус, мортмасса, почвенные агрегаты.

DOI: 10.31857/S0002188123100034, **EDN:** WRPBPN

ВВЕДЕНИЕ

Структура верхних гумусовых горизонтов во многом определяет такие важнейшие свойства почвы, как устойчивость к действию неблагоприятных экологических факторов и уровень ее потенциального плодородия. К тому же содержание в почве структурных отдельностей различной формы и размеров выполняет протекторную функцию по отношению к почвенному органическому веществу, существенно снижая скорость его минерализации [1].

Изменение содержания почвенного органического вещества сопровождается преобразованием физического состояния почв [2]. При снижении его количества ухудшается структурно-агрегатный состав, увеличивается глыбистость, уменьшается содержание агрономически ценных агрегатов с размером от 0.25 до 10 мм. Дезагрегация, в свою очередь, приводит к потерям углерода орга-

нических соединений почвы. Это связано с различной защищенностью потенциально минерализуемых компонентов органического вещества, содержащихся в структурно-агрегатных отдельностях разного размера [3, 4]. Наименьшей устойчивостью к агрогенным воздействиям обладают макроагрегаты (размером >0.25 мм).

Отдельная роль в оструктуривании почвы и поддержание ее оптимального сложения принадлежит лабильному (легкоразлагаемому) органическому веществу (*ЛОВ*) [2, 5–7], образуемому при разложении и гумификации растительных и животных остатков, отмершей микробной биомассы, обладающему свойствами клеящей субстанции. Между тем свойство склеивания почвенных комков, по [8], проявляется лишь в том случае, когда содержание гумусовых кислот-структурообразователей достигает 0.5–1.0% массы почвы.

Материалы [9, 10] свидетельствуют о заметном снижении общих запасов гумуса в почвах в результате их распашки и интенсивного сельскохозяйственного использования без систематического применения оптимальных доз минеральных и органических удобрений. По мнению [11], снижение плодородия старопахотных черноземов объясняется тем, что в процессе длительной распашки они утрачивают главное свойство гумуса целинных черноземов – сезонный ритм разрушения части гумуса и его новообразования в том же году из обильных выделений степных трав.

Следует отметить, что основная обработка (вспашка) почвы является достаточно энергоемким приемом в технологии возделывания культур, при этом активизируются процессы минерализации органического вещества, наблюдают ухудшение агрофизических свойств почвы, что в конечном итоге приводит к уменьшению продуктивности агроценозов [12]. Альтернативой вспашки являются ресурсосберегающие обработки почвы [13–15].

В связи с этим цель работы – изучение длительного действия способов обработки почвы на состояние органического вещества и структурно-агрегатный состав лугово-черноземной почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на опытном поле лаборатории ресурсосберегающих агротехнологий Омского АНЦ в длительном (1986 г. закладки) стационарном опыте, на основе плодосменного севооборота с чередованием культур: соя–пшеница яровая–рапс яровой (с 2020 г. – лен)–ячмень в южной лесостепной зоне Омской обл. Варианты систем обработки почвы были заложены с начала эксперимента, а почвенные пробы отбирали в течение 3-х лет (2018–2020 гг.).

Объект исследования – почва лугово-черноземная среднечерноземная среднегумусовая тяжело-суглинистая. Обеспеченность (слой 0–20 см почвы) подвижным фосфором и обменным калием (по Чирикову) – повышенная и очень высокая (105–128 и 350–420 мг/кг соответственно). Сумма обменных катионов – 32.1 ммоль/100 г почвы, рН 6.5.

Схема опыта включала следующие варианты обработки почвы:

1 – контроль – отвальная система (ОС) обработки почвы (ежегодная осенняя вспашка на глубину 20–22 см под все культуры севооборота плугом ПЛН-4-35);

2 – комбинированная система (КС) обработки почвы (без осенней обработки под рапс, плоско-

резная на глубину 10–12 см под яровую пшеницу и ячмень, вспашка под сою);

3 – плоскорезная система (ПС) обработки почвы (ежегодная осенняя обработка на глубину 10–12 см под все культуры севооборота культиватором “Степняк”).

Варианты обработки почвы заложены на фоне без применения минеральных удобрений и средств защиты растений. Закрытие влаги весной фоновое – зубовыми боронами ЗБСС-1.0 в 2 следа, за исключением варианта без обработки почвы. Посев сельскохозяйственных культур – в оптимальные сроки. В опыте высевали районированные сорта сельскохозяйственных культур: яровую пшеницу сорта Омская 36, сою сорта Сибирячка, ячмень сорта Саша (селекции Омского АНЦ), яровой рапс сорта Юбилейный (с 2020 г. – лен сорта Северный селекции ФНЦ ВНИИМК). Площадь делянки 308 м² (14 × 22 м). Размещение вариантов систематическое. Повторность в опыте четырехкратная. Учет урожая проводили комбайном Сампо-130 в оптимальные сроки. Урожайность приведена к 14%-ной влажности и 100%-ной чистоте.

Отбор почвенных проб проводили перед посевом культур севооборота из слоев 0–10 и 10–20 см. Определение общего углерода выполняли по методу Тюрина в модификации Никитина [16], мортмассы – путем отмывки водой на сите с диаметром ячеек 0.25 мм [17]. Структурный состав почвы определяли сухим просеиванием по методу Савинова.

Статистическая обработка результатов исследования выполнена методами дисперсионного и корреляционного анализов [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование, проведенное в системе севооборота по изучению гумусного режима почвы, показало, что за 32 года систематического применения систем обработок (ОС, КС и ПС) наблюдали дифференциацию пахотного слоя по содержанию гумуса как послойно, так и в вариантах опыта (табл. 1). В нашем исследовании в качестве варианта сравнения (контроля) использовали фон с отвальной системой обработки почвы. Содержание гумуса в пахотном слое почвы в варианте ОС составило 6.59%, тогда как в вариантах КС и ПС содержание его было соответственно на 0.30 и 0.48% больше в сравнении с фоном отвальной вспашки.

Положительный тренд в гумусообразовании объясняется тем, что на этих фонах снижалась интенсивность воздействия на почву и скорость трансформации органического вещества ввиду спа-

да активности почвенной биоты, что в конечном итоге определяло создание благоприятных условий для гумификации растительных остатков.

Следует отметить, что при анализе содержания гумуса послойно (0–10, 10–20 см) прослеживали аналогичную зависимость. На фоне *КС* содержание гумуса увеличилось (относительные ед.) в слое 0–10 см на 6 и в слое 10–20 – на 3%, в варианте *ПС* – соответственно на 9 и 6% в сравнении с отвальной обработкой. Известно, что в почве проходят 2 основных процесса: это деструкция (в том числе и минерализация) и синтез (в том числе гумификация). Следовательно, в варианте *ПС* в слоях 0–10 и 10–20 см активно происходило секвестирование углерода, а в варианте *КС* этот процесс прослежен только в слое 0–10 см. Поэтому можно предположить, что приоритет в гумусонакоплении за плоскорезной системой обработки почвы. С учетом того, что продуктивность севооборота в этих вариантах существенно не различалась, и обогащение почвы растительными остатками было примерно одинаковым, значит, в большей степени интенсивность процесса и его направленность определялась физико-химическими свойствами почвы, реакцией микробиома на экологические условия, складывавшимися при разных системах обработки почвы.

Содержание лабильного органического вещества (*ЛОВ*), согласно достаточно большому количеству экспериментальных данных [19–21], является наиболее чувствительным показателем изменения плодородия почвы, чем содержание гумуса, и его пул зависит от комплекса экологических факторов. Характер накопления *ЛОВ* в пахотных почвах определяется в первую очередь видом севооборота, приемами обработки почв, применением удобрений и т.п. [22, 23]. В нашем исследовании системы обработки почвы оказали заметное влияние на содержание *ЛОВ*. Одним из основных компонентов *ЛОВ* почвы является мортмасса. Анализ запасов мортмассы в почве показал, что в пахотном горизонте количество этой легкоразлагаемой части органического вещества изменялось от 8.0 в варианте *ПС* до 8.69 т/га – в варианте *ОС*, что было вполне закономерным (рис. 1).

Ранее проведенными исследованиями установлено, что накопление мортмассы в почве находится в тесной корреляционной зависимости от продуктивности агроценоза [24]. В варианте *ОС* продуктивность севооборота была максимальной и минимальной в варианте *ПС*, этим и объясняются изменения запасов мортмассы в вариантах опыта. Содержание мортмассы в слоях почвы зависело прежде всего от глубины обработки почвы. В варианте *ПС* содержание мортмассы в слое 0–10 см было на 1.26 т/га (или на 32%)

Таблица 1. Содержание гумуса в лугово-черноземной почве в зависимости от систем обработки почвы в севообороте, %

Слой почвы, см	<i>ОС</i>	Отклонение содержания гумуса (\pm %) от фона <i>ОС</i>	
		<i>КС</i>	<i>ПС</i>
0–10	6.56	0.37/6	0.57/9
10–20	6.62	0.23/4	0.42/6
0–20	6.59	0.30/5	0.48/7

$$HCP_{05} \text{ система обработки почвы} = 0.11, HCP_{05} \text{ слой почвы} = 0.09, \\ HCP_{05} \text{ частных средних} = 0.15$$

Примечание. *ОС* – отвальная, *КС* – комбинированная, *ПС* – плоскорезная система обработки почвы.

больше в сравнении с вариантом отвальной системы обработки почвы, а в слое 10–20 наблюдали обратную зависимость, запасы мортмассы снизились на 1.91 т/га (или на 40%). При рассмотрении распределения мортмассы в слоях (ее доля относительно запасов в слое 0–20 см, %) установлено, что в ряду вариантов *ОС–КС–ПС* в слое 0–10 см наблюдали увеличение запасов мортмассы (45–53–65%), а в слое 10–20 см наоборот, снижение (55–47–35%). Рост содержания *ЛОВ* в верхнем горизонте обусловлен наибольшим накоплением растительных остатков на поверхности поля, снижением его минерализации ввиду уменьшения интенсивности воздействия и ограничения доступности почвенной биоты.

Известна ведущая роль лабильной фракции органического вещества как свободной, так и закрепленной внутри почвенных агрегатов, в формировании и сохранении структуры почвы, особенно почвенных макроагрегатов [8]. При уменьшении поступления свежих органических веществ в почву снижается содержание их лабильных форм, нарушается воспроизводство стабильных гумусовых веществ и формирование агрегатов, что ведет к ухудшению структурного состояния почвы.

Традиционно структура почвы включает в себя форму и размер структурных отдельностей в виде макроагрегатов (педов) >0.25 мм и соответственно микроагрегатов (<0.25 мм), на которые распадается почва [25]. Среди макроагрегатов иногда выделяются также мезоагрегаты (0.25–7.00 мм) и собственно макроагрегаты (>7(10) мм).

Результаты, полученные нами при сухом просеивании почвы, показали достаточно высокую степень агрегированности пахотного горизонта. Выход агрономически ценных агрегатов размером 0.25–10 мм составил 43–65%, более 10 мм –

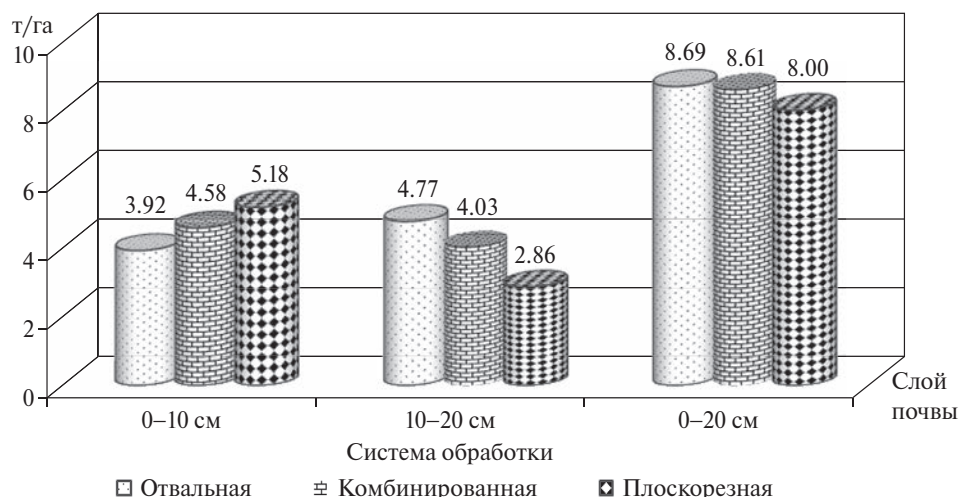


Рис. 1. Влияние системы обработки на запасы мортмассы в почве, т/га HCP_{05} система обработки почвы = 2.5, HCP_{05} слой почвы = 2.0, HCP_{05} частных средних = 3.5.

32–54% (глыбистая фракция), доля агрегатов <0.25 мм (пылеватая фракция) – 2–4% (табл. 2).

Установлено, что при отвальной системе обработки почвы содержание глыбистой фракции в слое 0–10 см было меньше (31.5%) в сравнении с нижележащим слоем (53.8%), что могло быть связано с механическим перемешиванием слоев при вспашке (рис. 2). В вариантах *КС* и *ПС* пахотный горизонт по количеству макроагрегатов послойно не различался. Содержание структурных агрегатов размером 0.25–10 мм было наибольшим в варианте *ОС* в слое 0–10 см – 65.4% за счет уменьшения глыбистой фракции и существенным увеличением (до 21%) фракции размером 1.0–0.5 мм. В вариантах *КС* и *ПС* содержание данной фракции было равно 53.5–56.6%. Содержание структурных микроагрегатов (<0.25 мм) в слое 0–10 см находилось в пределах 3.0–3.7% и не зависело от системы обработки почвы. В нижележащем слое (10–20 см) в варианте *КС* отмечено уменьшение данной фракции до 2.0%, а при плоскорезной обработке – увеличение до 4.5%. В целом, оценивая слой 0–20 см почвы, отмечено отсутствие существенных различий в содержании фракций >10 мм

и 0.25–10 мм в вариантах опыта. Снижение интенсивности обработки почвы обеспечило увеличение количества агрегатов <0.25 мм.

Исходя из расчета коэффициента структурности почвы, в котором учитывают количество агрономически ценных агрегатов, установлено, что почва в слое 0–10 см была в хорошем и отличном агрегатном состоянии (1.30–1.89). Данный показатель для слоя 10–20 см варьировал в пределах от 0.75 до 1.22, соответствуя хорошей степени агрегатирования.

При анализе полученных данных содержания консервативного и лабильного органического вещества, особенности структурно-агрегатного состава почвы определяли причинно-следственную связь количественных и качественных изменений этих показателей плодородия и систем обработки почвы. Нами установлена тесная корреляционная связь между запасами мортмассы в почвенном слое 0–20 см и содержанием структурно-агрегатных фракций размером 10–5 мм ($r = 0.721 \pm 0.11$) и 5–3 мм ($r = 0.687 \pm 0.10$). По мнению авторов работы [1] количественные и качественные характеристики почвенного органического веще-

Таблица 2. Агрегатный состав лугово-черноземной почвы в зависимости от системы обработки почвы

Вариант	Глубина, см	Содержание агрегатов, % размером, мм							
		>10	10–5	5–3	3–2	2–1	1.0–0.5	0.5–0.25	<0.25
Отвальная	0–10	31.5	9.0	8.7	7.7	12.6	21.0	6.4	3.1
	10–20	53.8	7.9	7.2	5.6	9.4	11.6	1.4	3.1
Комбинированная	0–10	42.8	9.7	9.8	7.5	11.8	13.4	1.3	3.7
	10–20	43.6	8.5	8.6	5.8	11.6	15.6	4.3	2.0
Плоскорезная	0–10	40.3	8.9	9.1	8.2	11.3	16.1	3.0	3.1
	10–20	41.8	8.1	6.7	10.9	9.3	12.5	6.2	4.5

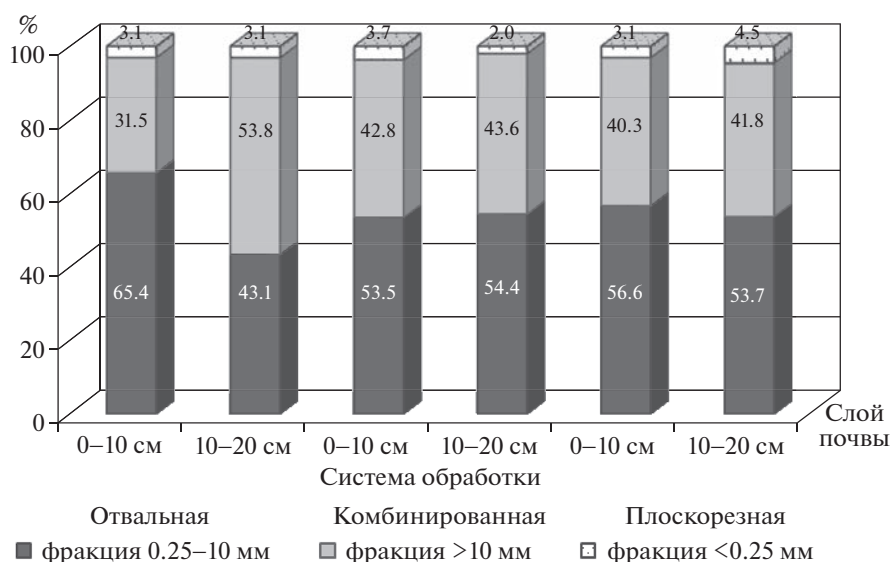


Рис. 2. Содержание почвенных агрегатов различных фракций в зависимости от системы обработки почвы.

ства являются достаточно значимыми индикаторами структурно-агрегатного состава почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в длительном (34 года) стационарном опыте установлено, что содержание гумуса в старопахотной лугово-черноземной почве при использовании плоскорезной и комбинированной систем обработок почвы увеличилось на 0.30 и 0.48% в сравнении со вспашкой. Система обработки почвы оказывала существенное влияние на послойное распределение гумуса. На фоне комбинированной системы обработки содержание гумуса увеличилось (в относительных ед.) в слое 0–10 см на 6 и в слое 10–20 – на 3%, в варианте плоскорезной системы – на 9 и 6% соответственно в сравнении со вспашкой. Максимальные запасы мортмассы накапливались при отвальной обработке почвы слое 10–20 см. В вариантах КС и ПС количество мортмассы в слое почвы 0–10 см было больше на 0.55 т/га (на 14%) и на 2.36 т/га (на 83%) в сравнении со слоем 10–20 см. В ряду вариантов ОС–КС–ПС наблюдали увеличение запасов мортмассы (45–53–65%) в слое 0–10 см, а в слое 10–20 см, наоборот, – уменьшение (55–47–35%). Содержание ценных структурных агрегатов размером 0.25–10 мм было наибольшим в варианте со вспашкой в слое 0–10 см (65.4%) за счет уменьшения глыбистой фракции и увеличения (до 21%) фракции размером 1.0–0.5 мм. В вариантах КС и ПС содержание данной фракции было на 11.9 и 8.8% меньше, чем в варианте ОС. Установлена тесная корреляционная связь между запасами мортмассы в почвенном слое 0–

20 см и содержания структурно-агрегатных фракций размером 10–5 мм ($r = 0.721 \pm 0.11$) и 5–3 мм ($r = 0.687 \pm 0.10$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козут Б.М., Яшин М.А., Семенов В.М., Авдеева Т.Н., Маркина Л.Г., Лукин С.М., Тарасов С.И. Распределение трансформированного органического вещества в структурных отдельностях дерново-подзолистой супесчаной почвы // Почвоведение. 2016. № 1. С. 52–64.
2. Дубовик Е.В., Дубовик Д.В. Взаимосвязь содержания углерода органических соединений и структурного состояния чернозема типичного // Почвоведение. 2019. № 2. С. 171–183.
3. Семенов В.М., Иванникова Н.А., Семенова Н.А., Коджаева А.К., Удальцов С.Н. Минерализация органического вещества в разных по размеру агрегатных фракциях почвы // Почвоведение. 2010. № 2. С. 28–34.
4. John B., Yamashita T., Ludvig B., Flessa H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use // Geoderma. 2005. V. 128. P. 63–79.
5. Яшин М.Я., Авдеева Т.Н., Козут Б.М., Маркин Л.Г., Семенов В.М., Тарасов С.И., Фрид А.С. Агрогенная трансформация лабильных гумусовых веществ и структуры дерново-подзолистой супесчаной почвы // Агрохимия. 2015. № 9. С. 3–13.
6. Мамонтов В.Г., Мамонтов В.Г., Афанасьев Р.А., Соколовская Е.Л. Лабильные гумусовые вещества – особая группа органических соединений чернозема обыкновенного // Плодородие. 2018. № 5. С. 15–19.
7. Kroll E.S., Okjemstad J.O., Baldock J.A. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Canberra, ACT: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, 2004. 129 p.

8. *Вершинин П.В.* Почвенная структура и условия ее формирования. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 188 с.
9. *Гамзиков Г.П., Кулагина М.Н.* Изменение содержания гумуса в почвах в результате сельскохозяйственного использования // *Обзорн. информ-я.* М.: ВНИИТЭИагропром, 1992. 48 с.
10. *Мокриков Г.В., Минникова Т.В., Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* Изменение содержания и состава органического вещества черноземов Приазовья при использовании технологии прямого посева // *Агрохимия.* 2020. № 1. С. 18–24.
11. *Пономарева В.В., Плотникова Т.А.* Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 1980. 221 с.
12. *Беленков А.И., Сабо У., Кунафин Р.И.* Теория и практика основной обработки почвы в современных системах земледелия // *Владимир. земледец.* 2017. № 1. С. 8–11.
13. *Шарков И.Н., Данилова А.А.* Влияние длительного антропогенного воздействия на содержание и состав органического вещества чернозема выщелоченного в лесостепи Приобья // *Сибир. экол. журн.* 2012. Т. 19. № 5. С. 693–701.
14. *Чекусов М.С., Юшкевич Л.В., Бойко В.С., Еришов В.Л.* Агрорландшафтные особенности основной обработки почвы в Омской области // *Вестн. ОмГАУ.* № 4. 2019. С. 88–95.
15. *Байбеков Р.Ф.* Природоподобные технологии – основа стабильного развития земледелия // *Земледелие.* 2018. № 2. С. 5–8.
16. *Никитин Б.А.* Метод определения гумуса почвы // *Агрохимия.* 1999. № 5. С. 91–93.
17. *Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Шепелев А.Г.* Изучение изменений содержания лабильного органического вещества в почве при использовании ее в различных севооборотах // *Проблемы рационального использования малопродуктивных земель: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. (г. Омск, 28–29 апреля 2009 г. Омск: РАСХН, СО; СибНИИСХ, 2009. С. 98–102.*
18. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 352 с.
19. *Ганжара Н.Ф., Байбеков Р.Ф., Борисов Б.А., Надежкин С.М.* Оптимизация содержания лабильного органического вещества в почвах лесостепи Поволжья // *Плодородие.* 2010. № 5. С. 15–16.
20. *Шарков И.Н.* Плодородие в свете современных представлений об органическом веществе почвы // *Агрохимические свойства почв и приемы их регулирования: сб. научн. тр. Новосибирск, 2009. С. 60–72.*
21. *Шевцова Л.К., Хайдуков К.П.* Совершенствование методов оценки гумусного состояния почв // *Состояние и пути повышения эффективности исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. конф. Геосети / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2012. С. 79–92.*
22. *Дедов А.В., Несмеянова М.А.* Лабильное органическое вещество и приемы его регулирования // *Изв. Оренбург. ГАУ.* 2017. № 5. С. 8–10.
23. *Титлянова А.А.* Лабильное органическое вещество в пахотных почвах // *Почва – ресурс экологической и продовольственной безопасности: сб. научн. тр. Новосибирск, 2016 С. 36–43.*
24. *Балабанова Н.Ф., Воронкова Н.А.* Содержание лабильного органического вещества в лугово-черноземной почве // *Агрохимия.* 2015. № 1. С. 16–22.
25. *Шеин Е.В.* Курс физики почв: учебник для студ. вузов, обучающихся по направлению 510700 “Почвоведение” и специальности 013000 “Почвоведение” М.: Изд-во МГУ, 2005. 430 с.

Influence of Tillage Systems on the Content of Organic Matter and Its Structural State

N. F. Balabanova^{a,#}, N. A. Voronkova^a, and L. V. Yushkevich^a

^a*Omsk Agrarian Scientific Center
prosp. Koroleva 26, Omsk 644012, Russia*

[#]*E-mail: natascha.balabanowa@mail.ru*

In a long-term stationary experiment on the basis of a 4-pole fruit-bearing crop rotation, the influence of processing methods with different levels of mechanical impact on the soil was studied: dump (plowing to a depth of 20–22 cm), combined (alternating plowing, plane-cutting processing (to a depth of 10–12 cm), without processing) and plane-cutting processing on the content of organic matter and the structural and aggregate composition of meadow-chnozem soil. It was found that a decrease in the intensity and depth of tillage with a combined and flat-cut system increased the humus content by 0.30 and 0.48% in a layer of 0–20 cm in comparison with dump treatment. The tillage system had a significant impact on the layer-by-layer distribution of labile organic matter in the form of mortmass. The largest stocks of mortmass in the arable layer were noted in the variant of the dump tillage system – 8.69 t/ha. On resource-saving backgrounds, a tendency to decrease the stocks of mortmass in the soil by 0.08–0.69 t/ha was revealed. The contribution of agronomically valuable structural units of 0.25–10 mm in size was 43.1–65.4 in layers, and the yield of large lumps and dust was 34.6–56.9% of the soil mass. The best structural condition of the soil is marked when using a dump treatment system. The presence of a close correlation between the stocks of mortmass in the soil layer of 0–20 cm and the content of structural-aggregate fractions with a size of 10–5 mm ($r = 0.72 \pm 0.11$) and 5–3 mm ($r = 0.68 \pm 0.10$) was established.

Keywords: meadow-chnozem soil, humus, mortmass, soil aggregates.

УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЛОДОРОДИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ[§]

© 2023 г. И. В. Лыскова^{1,*}, Т. В. Лыскова¹

¹ Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
612500 Кировская обл., п. Фаленки, ул. Тимирязева, 3, Россия

*E-mail: fss.zam@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

На основе многолетних (2016–2021 гг.) исследований в длительном стационарном опыте (1971–2021 гг.) в восточном районе центральной климатической зоны Кировской обл. оценено влияние кислотности почвы и содержания подвижного фосфора на урожайность и качество зерновых культур и клевера лугового при внесении удобрений (N90, N90P50K90). Установлено, что максимальная урожайность (4.43 т/га) в длительном стационарном опыте в период 2016–2021 гг. получена у озимой ржи сорта Фаленская 4 при внесении N90P50K90 на почве с рН_{KCl} 3.8 и содержанием подвижного фосфора в почве 121 мг/кг, что было больше, чем в варианте без удобрений, в 1.6 раза. Содержание сырого протеина в зерне злаковых культур и зеленой массе клевера лугового формировалось больше на почве при рН 5.2–5.7, чем при рН 3.7–4.0, не зависело от содержания подвижного фосфора в почве. Внесение удобрений (N90, N90P50K90) под злаковые культуры повышало этот показатель на 1.60–5.96%. Показатель “натура зерна” злаковых культур не зависел от уровня кислотности и содержания подвижного фосфора в почве, при этом показатель превышал базисную норму стандартов при заготовках зерна. Содержание сырой клейковины в зерне яровой пшеницы сортов Ирень и Баженька повышалось при применении удобрений на 4.0–14.8%. Максимальное содержание (39.8%) отмечено в зерне сорта Ирень при внесении N90P50K90 на почве с рН_{KCl} 5.3–5.6 и содержанием подвижного фосфора 170–191 мг/кг. Влияние удобрений и уровня плодородия почвы на показатель “число падения” зерна озимой ржи было несущественным.

Ключевые слова: длительный стационарный опыт, известкование, минеральные удобрения, подвижный фосфор, рожь озимая, пшеница яровая, овес, клевер луговой, масса 1000 зерен, натура зерна, сырой протеин, число падения.

DOI: 10.31857/S0002188123100101, **EDN:** OEDENU

ВВЕДЕНИЕ

Получение высоких и устойчивых урожаев в сельскохозяйственных районах на дерново-подзолистых почвах возможно благодаря научно обоснованной системе удобрения [1–3]. В Кировской обл. в почвенной структуре дерново-подзолистые почвы занимают 45% от всей площади пашни [4, 5]. Насыщенность пашни минеральными удобрениями за последние 10 лет (2013–2022 гг.) составила 23.5 кг д.в./га, при средней урожайности зерновых и зернобобовых культур 1.9 т/га [6]. Согласно данным Государственного центра агрохимической службы “Кировский”, на 01.01.2022 г.

82% пашни Кировской обл. составляют кислые почвы, 52% относится к категории низкой (<2.1%) обеспеченности гумусом, 59 и 18% относятся к почвам с пониженным содержанием подвижного фосфора и обменного калия [7]. По мнению многих авторов, для повышения плодородия дерново-подзолистых почв определяющее значение имеют кислотность и запас фосфатов, при этом применение удобрений, особенно в высоких дозах, будет способствовать увеличению окультуренности почв [8, 9].

Несмотря на то что дерново-подзолистые почвы характеризуются низким естественным плодородием, они отличаются хорошими условиями увлажнения, поэтому при достаточном обеспечении растений питательными веществами на них можно получить высокие и устойчивые урожаи

[§] Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (тема № FNWE-2022-0005).

сельскохозяйственных культур [10]. В свою очередь применение фосфорных удобрений (и их последствие) в комплексе с азотно-калийными нивелирует влияние погодных условий на продуктивность зерновых культур (на примере яровой пшеницы): наиболее высокие коэффициенты детерминации, отражающие долю вариабельности, объясняемую погодными условиями, отмечены для варианта без удобрений ($R^2 = 0.59-0.73$), тогда как при их внесении они снижаются до $R^2 = 0.50-0.56$ [11].

Правильное эффективное использование удобрений способствует не только увеличению урожая, но и улучшению его качества [12]. В условиях центральной части Кировской обл. на дерново-подзолистых почвах пригодное для продовольственных целей (согласно требованиям ГОСТ 28673-90) зерно овса может быть получено в благоприятные по увлажнению годы. Установлено, что внесение удобрений в дозе N90P45K60 повышает содержание сырого белка в зерне в среднем с 7.3 до 9.2% [13]. В Предуралье на среднекислых дерново-подзолистых почвах с повышенным содержанием подвижного фосфора максимальное содержание белка в зерне яровой пшеницы (12.9–13.1%) отмечено при внесении N60P60K60, увеличение дозы удобрений >60 кг д.в./га не обеспечивало существенного роста содержания белка [14].

Цель работы – оценка влияния плодородия дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, сформированной на покровных суглинках, на урожайность и качество основных сельскохозяйственных культур (ржи озимой, пшеницы яровой, овса, клевера лугового) в Кировской обл.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в 2016–2021 гг. на базе длительного стационарного опыта (Фаленская селекционная станция – филиал Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого), заложенного в 1971 г. в восточном агропочвенном районе центральной климатической зоны Кировской обл. Почва дерново-подзолистая среднесуглинистая, сформированная на покровных суглинках. Агрохимическая характеристика почвы перед закладкой опыта (слой 0–20 см): pH_{KCl} 5.2, сумма поглощенных оснований (по Каппену–Гильковицу) – 10.2 мг-экв/100 г, гидролитическая кислотность (по Каппену) – 5.5 мг-экв/100 г, содержание подвижных фосфора и калия (по Кирсанову) – 90 и 120 мг/кг соответственно, гумус (по Тюрину) – 2.5%. Опыт проводили в зернопаротравяном севообороте: чи-

стый пар–рожь озимая сорта Фаленская 4–пшеница яровая сорта Ирень с подсевом клевера лугового сорта Дымковский, клевер 1-го года пользования (г.п.)–клевер 2-го г.п., яровая пшеница сорта Баженка–овес сорта Медведь. Сорты сельскохозяйственных культур, возделываемые в опыте, селекции ФАНЦ Северо-Востока (сорт Ирень – оригинатор Уральский НИИСХ). Общая площадь делянки 40.25 м², повторность четырехкратная.

Систематически в течение 1971–1975 гг. вносили удобрения по следующей схеме: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N90, 3 – N90P90K90, 4 – N90P180K90, 5 – N90P270K90, 6 – N90P360K90. Удобрения в виде N_{aa} , $P_{сг}$, $P_{сд}$ и K_x вносили на 2-х фонах: без известки и известкования в дозе по 1.0 гидролитической кислотности (H_r). Известь внесена в 1971, 1979 и 1987 гг. в форме доломитовой муки. С 1976 по 2007 г. суперфосфат в опыте не вносили – изучали его последствие на фоне совместного применения азотных и калийных удобрений.

В период исследования 2008–2014 гг. удобрения вносили по следующей схеме: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N90, 3 – N90P50K90, 4 – N90P100K90, 5 – N90P150K90, 6 – N90P200K90. С 2013 г. вносили K_c . В 2009 г. проведено повторное известкование фона “известь по 1 H_r ”. В течение 2015–2021 гг. удобрения вносили по схеме: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N90, 3–6. N90P50K90.

Образцы почвы отобраны ручным буром в 2016 и 2021 г. с 2-х несмежных повторностей в слое 0–20 см почвы в 3-х точках на каждой. Определение pH_{KCl} проводили потенциометрическим методом на иономере ЭВ-74 (ГОСТ 26483-85), гидролитической кислотности – по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91), суммы поглощенных оснований – по Каппену–Гильковицу (ГОСТ 27821-88), подвижных соединений фосфора и калия – по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91), обменную кислотность и подвижный алюминий – по Соколову [15]. Учет урожая сельскохозяйственных культур проводили методом площадок. Основные методы исследования растений: определение общего азота – по методу Кьельдаля в модификации Сереньева с пересчетом на сырой протеин [16]. Технологические анализы: натура зерна, масса 1000 зерен, содержание клейковины выполняли по [17]. Статистическую обработку (дисперсионный и корреляционный анализ) проводили, используя пакет программ AGROS – версия 2.07.

Таблица 1. Метеорологические условия в годы проведения опыта (2016–2021 гг.)

Год	Средняя температура воздуха, °С				ГТК за ВП*	Количество осадков, мм				
	май	июнь	июль	август		май	июнь	июль	август	май– август
2016	13.1	15.9	20.3	20.9	0.7	11	47	51	32	141
2017	7.5	14.0	17.3	16.6	1.7	59	59	159	25	301
2018	10.6	14.1	20.3	16.0	1.4	58	77	74	44	253
2019	13.2	15.1	15.9	13.0	2.2	33	108	75	157	390
2020	12.1	14.3	20.2	14.7	1.4	65	46	84	52	247
2021	15.0	19.3	18.8	18.2	0.8	76	19	65	36	196
Среднее многолетнее**	11.4	15.9	18.3	15.4	1.4	44	77	67	73	261

*Гидротермический коэффициент за вегетационный период.

**Средняя многолетняя норма, рассчитанная в соответствии с требованиями ВМО за 30-летний период (1991–2020 гг.).

Метеорологические условия в годы исследования различались по температурному режиму и количеству осадков (табл. 1). Наиболее благоприятными для роста и формирования урожая зерновых культур были 2018 и 2020 гг. – ГТК (по Селянинову) вегетационного периода составил 1.4. В 2016 и 2021 гг. вегетационный период характеризовался почвенной и атмосферной засухой (ГТК = 0.7 и 0.8 соответственно). Вегетационный период в 2017 и 2019 гг. был с избыточным увлажнением (ГТК = 1.7 и 2.2 соответственно).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Систематическое применение удобрений (N90, N90P50–200K90) в период 2008–2014 гг. оказало существенное влияние на агрохимические показатели верхнего (0–20 см) слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (табл. 2). На фоне без извести в почве наблюдали стабилизацию кислотности в пределах pH_{KCl} 3.7–3.9, длительное применение удобрений привело к подкислению почвы на 1.3–1.5 ед. к уровню исходного pH_{KCl} . Отмечено подкисление почвы и в контрольном варианте на 1.2–1.3 ед. Внесение извести по полной величине гидролитической кислотности в 2009 г. обеспечило поддержание показателя pH_{KCl} на уровне 6.0–6.2 ед. (в образцах почвы 2010 г.). К 2016 г. отмечено подкисление почвы известкованного фона в среднем на 0.5–0.6 ед., а к концу ротации севооборота (2021 г.) – на 0.7–0.8 ед. Гидролитическая кислотность была существенно меньше в варианте без удобрений, чем в вариантах с внесением удобрений на фоне без извести, между дозами удобрений и величиной H_T выявлена положительная зависимость ($r = 0.88$), на известкованной почве такой закономерности

не наблюдали. Таким образом, по показателям реакции почвенной среды наблюдали тенденцию к подкислению как на фоне без извести, так и на известкованном фоне.

Одним из главных факторов, определяющих отрицательное действие кислых почв на растения, является наличие в них больших количеств подвижных форм алюминия. Характерной особенностью исследованных почв является высокое содержание обменных форм алюминия в верхних горизонтах, которое может достигать 35 мг/100 г почвы [18]. В нашем исследовании на кислом фоне содержание ионов алюминия в слое 0–20 см почвы менялось от 10.6 до 15.8 мг/100 г почвы, при этом в образцах почвы 2021 г. произошло его увеличение в среднем на 11.5% по сравнению с отбором 2016 г. На произвесткованном фоне алюминий по методу Соколова не был выявлен.

Содержание подвижного фосфора в первых 2-х вариантах опыта, где на протяжении 50 лет не вносили фосфорные удобрения, уменьшилось незначительно по сравнению с исходной почвой (средняя обеспеченность). На фоне при pH_{KCl} 3.8 и внесении P90 содержание подвижного фосфора к окончанию ротации севооборота составило от 147 до 196 мг/кг (повышенная и высокая обеспеченность). На произвесткованном (в 2009 г.) фоне степень обеспеченности почвы подвижным фосфором осталась повышенной, высокой и очень высокой.

Благодаря тому что калий закрепляется в почве в доступной для растений форме, его хорошо используют растения. Существенно меньше было содержание подвижного калия в почве тех вариантов, где его не вносили. Обеспеченность почвы подвижным калием после внесения в дозе 90 кг д.в./га к 2021 г. составила от 180 до 300 мг/кг поч-

Таблица 2. Влияние минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы длительного стационарного опыта

Вариант, № (фактор <i>B</i>)	рН _{KCl}	Н _{обм}	<i>S</i>	<i>H_r</i>	Al, мг/100 г	P ₂ O ₅	K ₂ O
						мг-экв/100 г	
Фон без извести (фактор <i>A</i>)							
1	<u>4.0</u>	<u>1.26</u>	9.8	<u>6.98</u>	<u>10.8</u>	<u>88</u>	<u>102</u>
	3.9	1.34		7.35	10.9	87	148
2	<u>3.9</u>	<u>1.25</u>	9.1	<u>7.32</u>	<u>10.6</u>	<u>78</u>	<u>110</u>
	3.8	1.49		7.76	12.2	76	141
3	<u>3.8</u>	<u>1.43</u>	8.7	<u>7.57</u>	<u>12.4</u>	<u>121</u>	<u>188</u>
	3.7	1.90		8.69	16.0	147	239
4	<u>3.8</u>	<u>1.81</u>	8.5	<u>8.49</u>	<u>15.7</u>	<u>170</u>	<u>199</u>
	3.7	1.80		8.77	15.3	191	300
5	<u>3.7</u>	<u>1.83</u>	8.4	<u>8.15</u>	<u>15.8</u>	<u>184</u>	<u>219</u>
	3.7	2.00		8.94	16.8	196	180
6	<u>3.8</u>	<u>1.55</u>	9.1	<u>8.15</u>	<u>13.4</u>	<u>230</u>	<u>192</u>
	3.7	1.93		8.69	16.3	186	186
Среднее	<u>3.8</u>	<u>1.52</u>	8.9	<u>7.78</u>	<u>13.1</u>	<u>145</u>	<u>161</u>
	3.8	1.74		8.36	14.6	148	206
Фон известкование по 1.0 <i>H_r</i>							
1	<u>5.4</u>	<u>0.04</u>	14.4	<u>2.36</u>	—	<u>74</u>	<u>105</u>
	5.3	0.07		2.92	67	122	
2	<u>5.5</u>	<u>0.03</u>	15.6	<u>2.02</u>	—	<u>86</u>	<u>108</u>
	5.2	0.08		3.09	66	121	
3	<u>5.5</u>	<u>0.03</u>	14.7	<u>2.18</u>	—	<u>107</u>	<u>170</u>
	5.5	0.06		2.84	152	179	
4	<u>5.5</u>	<u>0.03</u>	15.8	<u>2.18</u>	—	<u>190</u>	<u>180</u>
	5.3	0.06		3.17	186	184	
5	<u>5.7</u>	<u>0.02</u>	16.0	<u>1.85</u>	—	<u>226</u>	<u>169</u>
	5.4	0.07		3.01	266	223	
6	<u>5.5</u>	<u>0.04</u>	15.6	<u>2.18</u>	—	<u>271</u>	<u>169</u>
	5.4	0.07		3.26	249	207	
Среднее	<u>5.5</u>	<u>0.03</u>	15.3	<u>2.13</u>	—	<u>159</u>	<u>142</u>
	5.4	0.07		3.05	168	172	
<i>HCP</i> ₀₅	фактор	—	фактор	фактор	—	фактор	фактор
	<u><i>A</i> = 1.2</u>	фактор	<i>A</i> = 5.1	<u><i>A</i> = 0.17</u>	—	<u><i>B</i> = 24</u>	<u><i>B</i> = 32</u>
	фактор	<i>A</i> = 0.68	—	фактор	—	фактор	фактор
	<u><i>A</i> = 1.4</u>	—	—	<u><i>A</i> = 0.90</u>	—	<u><i>B</i> = 43</u>	<u><i>B</i> = 51</u>

Примечания. 1. Над чертой — в начале (2016 г.), под чертой — в конце (2021 г.) ротации севооборота. 2. Приведена *HCP*₀₅, где $F_{\text{факт}} > F_{\text{теор}}$. То же в табл. 3–5.

вы на фоне без извести и от 179 до 223 мг/кг — на известкованном фоне.

Озимая рожь Фаленская 4 — хорошо известный в Нечерноземной зоне сорт, допущен в производство с 1999 г. в 4-х регионах, в том числе в Волго-Вятском, высокозимостойкий, имеет хорошие хлебопекарные качества. Из всех культур полевого севооборота озимая рожь дала самый

высокий урожай зерна в засушливых условиях — за весь вегетационный период 2016 г. количество осадков составило 54% от среднееголетней нормы. Урожайность на кислом фоне (рН_{KCl} 3.8) в среднем составила 3.95 т/га, на известкованном (рН_{KCl} 5.2) — 3.36 т/га (табл. 3). Максимальная урожайность (4.43 т/га) была получена при внесении N90P50K90 на почве с рН_{KCl} 3.8 и со-

держанием подвижного фосфора в почве 121 мг/кг, что было больше, чем в варианте без удобрений в 1.6 раза. Рожь – культура менее требовательная к плодородию почвы и к почвенной кислотности, поэтому прибавка урожайности от внесения удобрений на фоне без извести была больше (1.00–1.65 т/га), чем на фоне известкования по 1.0 H_r (0.27–0.94 т/га), при этом окупаемость 1 кг удобрений зерном была больше при внесении N90, чем в остальных вариантах, и составила 12.8 и 10.4 кг соответственно на разных фонах.

Выращиваемый в опыте раннеспелый сорт пшеницы Ирень относится к ценным по качеству сортам, районирован по Кировской обл. с 2000 г. Урожайность яровой пшеницы в 2017 г. составила на кислом фоне в среднем 2.00, на производственном – 2.02 т/га. О влиянии последствия известкования на улучшение условий питания и развития растений говорит тот факт, что на 36% повысилась урожайность пшеницы в варианте без удобрений и на 41% (или на 0.81 т/га) при использовании полного удобрения (вариант 3). Максимальная урожайность 2.79 т/га была получена при внесении N90P50K90 на известкованном фоне с содержанием подвижного фосфора 107–152 мг/кг. Окупаемость 1 кг удобрений зерном была больше в варианте с односторонним внесением азотных удобрений (N90) и составила: 9.3 кг на фоне без извести и 8.7 кг – на фоне известкования по 1.0 H_r . В вариантах с внесением NPK окупаемость снизилась до 4.0 кг, но отмечена тенденция к ее росту на фонах с повышенным содержанием фосфора в почве до 6.8 кг. Погодные условия июля (сильные дожди), когда у растений шел налив зерна, вызвало полегание посевов, в результате произошло снижение урожайности. Закономерности, характеризующие связь свойств почв с величиной урожайности сельскохозяйственных культур, являются основой для оценки плодородия почв, выявления наилучших условий возделывания культур, прогнозирования продуктивности растений [19]. В нашем исследовании выявлены достоверные корреляционные связи между содержанием подвижного фосфора в почве и урожайностью яровой пшеницы ($r = 0.85$) на фоне без извести. На известкованном фоне такую закономерность не просчитывали ввиду влияния фактора полегания посевов.

Сорт клевера лугового Дымковский включен в госреестр селекционных достижений РФ с 1993 г. в 7-ми регионах, среднеспелый, двукосный, обладает высокой зимостойкостью (90–95%). Клевер – культура, которая сильно страдает от кислотности почвы, оптимальным является pH 5.6–

6.0. Урожайность зеленой массы клевера была на 40% меньше на кислой почве, чем на производственной в варианте без удобрений. В нашем исследовании при внесении удобрений (N90 и N90P50K) под покровную культуру урожайность зеленой массы клевера снижалась относительно контрольного варианта в 1.9–2.8 раза при pH 3.8 и в 1.5–2.4 раза при pH 5.2. Надо отметить, что такая тенденция была отмечена и в прошлые годы, когда в опыте возделывали клевер, а также подобные закономерности были выявлены коллегами из ФАНЦ Северо-Востока [20]. Установлены достоверные корреляционные связи степени кислотности почвы (pH и H_r) с урожайностью зеленой массы клевера ($r = 0.76$ и $r = -0.79$ соответственно). Доля влияния содержания подвижного фосфора в почве на урожайность клевера была незначительной, объясняется данный факт тем, что клевер имеет хорошо развитую корневую систему и способен использовать питательные вещества из более глубоких почвенных горизонтов, где доступность фосфора выше [18].

Яровая пшеница раннеспелого сорта Баженка допущена в производство в Волго-Вятском регионе с 2011 г. Формирует зерно, характерное для ценной пшеницы. Благоприятные метеорологические условия вегетационного периода 2020 г. способствовали получению урожайности в среднем на фонах 3.27 и 3.44 т/га соответственно (табл. 3). Выявлены достоверные корреляционные связи между содержанием подвижного фосфора в почве и урожайностью яровой пшеницы ($r = 0.70$). Известно, что на эффективность фосфорных удобрений большое влияние оказывает содержание в почве подвижного фосфора [10].

В 2021 г. в опыте возделывали овес среднеспелого сорта Медведь, допущен в производство с 2016 г. в Центральном и Волго-Вятском регионах, достоинства сорта – устойчивость к кислотности дерново-подзолистых почв, к осыпанию, среднезасухоустойчив, относится к ценным сортам по качеству (выход ядра 68%). Урожайность овса сорта Медведь составила на кислом фоне в среднем 1.72, на производственном – 2.29 т/га (табл. 3). Надо отметить, что этот показатель меньше, чем средняя урожайность овса (3.39 ± 0.65 т/га) в стационарном опыте в 1971–2020 гг. (когда в опыте возделывали данную культуру) [11]. Эффективность от применения полного минерального удобрения по сравнению с контрольным вариантом составила на фоне без известкования от 13 до 21 и на производственном фоне – от 25 до 46%. При этом окупаемость 1 кг удобрений зерном составила 3.4 кг на фоне без извести при максимальной урожайности 2.05 т/га, на фоне извест-

Таблица 3. Урожайность сельскохозяйственных культур и окупаемость удобрений в период исследования (2016–2021 гг.)

Показатель	Фон	Содержание подвижного фосфора, мг/кг почвы					
		7–88	66–86	107–152	170–191	184–266	186–271
Озимая рожь сорта Фаленская 4 (зерно), 2016 г.							
Урожайность, т/га	0	2.78	3.94	4.43	4.35	4.42	3.78
	1	2.95	3.89	3.22	3.33	3.34	3.41
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 0.66					
Прибавка урожайности к варианту без удобрений, т/га	0	–	1.16	1.65	1.57	1.64	1.00
	1	–	0.94	0.27	0.38	0.39	0.46
Окупаемость удобрений, кг	0	–	12.8	7.2	6.8	7.1	4.3
	1	–	10.4	1.2	1.7	1.7	2.0
Яровая пшеница сорта Ирень (зерно), 2017 г.							
Урожайность, т/га	0	1.05	1.89	1.98	1.99	2.50	2.61
	1	1.43	2.21	2.79	1.50	1.69	2.51
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 0.73					
Прибавка урожайности к варианту без удобрений, т/га	0	–	0.84	0.93	0.94	1.45	1.56
	1	–	0.78	1.36	0.07	0.26	1.08
Окупаемость удобрений, кг	0	–	9.3	4.0	4.1	6.3	6.8
	1	–	8.7	5.9	0.3	1.1	4.7
Клевер сорта Дымковский (зеленая масса), 2018 г.							
Урожайность, т/га	0	25.0	9.0	13.5	10.5	10.0	9.8
	1	41.8	26.0	28.8	28.5	27.5	17.0
	<i>HCP</i> ₀₅	$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$					
Прибавка урожайности к варианту без удобрений, т/га	0	–	–16.0	–11.5	–14.5	–15.0	–15.2
	1	–	–15.8	–13.0	–13.3	–14.3	–24.8
Яровая пшеница сорта Баженка (зерно), 2020 г.							
Урожайность, т/га	0	2.12	2.92	3.86	3.68	3.78	3.28
	1	2.94	3.21	3.51	3.77	3.97	3.23
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 0.74					
Прибавка урожайности к варианту без удобрений, т/га	0	–	0.80	1.74	1.56	1.66	1.16
	1	–	0.27	0.57	0.83	1.03	0.29
Окупаемость удобрений, кг	0	–	8.9	9.7	8.7	9.2	6.4
	1	–	3.0	3.2	4.6	5.7	1.6
Овес сорта Медведь (зерно), 2021 г.							
Урожайность, т/га	0	1.70	1.20	1.92	1.93	1.94	2.05
	1	1.84	2.12	2.36	2.41	2.68	2.30
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 0.42					
Прибавка урожайности к варианту без удобрений, т/га	0	–	–0.07	0.65	0.66	0.67	0.78
	1	–	0.28	0.52	0.57	0.84	0.46
Окупаемость удобрений, кг	0	–	–	2.8	2.9	2.9	3.4
	1	–	1.2	2.3	2.5	3.7	2.0

Примечание. 0 – фон без извести, 1 – фон известкования по 1.0 Н_г.

Таблица 4. Содержание сырого протеина (%) в зерне и сухом веществе в зависимости от содержания подвижного фосфора в почве

Фон	Содержание подвижного фосфора, мг/кг почвы					
	67–88	66–86	107–152	170–191	184–266	186–271
Озимая рожь сорта Фаленская 4 (зерно), 2016 г.						
Без извести	7.95	9.38	9.84	9.55	9.58	9.80
Известкование по 1.0 H_r	9.20	11.0	10.5	11.5	11.2	10.4
HCP_{05} фактор $A = 0.96$, фактор $B = 1.21$						
Яровая пшеница сорта Ирень (зерно), 2017 г.						
Без извести	11.7	12.3	13.4	14.7	13.7	12.3
Известкование по 1.0 H_r	10.1	12.8	15.1	16.1	14.7	13.1
$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$						
Клевер сорта Дымковский (сухое вещество), 2018 г.						
Без извести	18.0	16.5	17.7	18.4	16.8	17.5
Известкование по 1.0 H_r	19.3	19.4	20.3	21.2	20.6	18.5
$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$						
Яровая пшеница сорта Баженка (зерно), 2020 г.						
Без извести	9.58	12.17	12.51	12.17	12.56	12.74
Известкование по 1.0 H_r	10.6	12.1	12.7	12.4	13.0	12.6
HCP_{05} фактор $B = 0.9$						
Овес сорта Медведь (зерно), 2021 г.						
Без извести	11.6	12.0	12.8	13.8	13.4	12.5
Известкование по 1.0 H_r	11.8	12.5	12.9	13.7	13.7	13.1
HCP_{05} фактор $B = 0.9$						

кования по 1 H_r – 3.7 кг при урожайности 2.68 т/га. Окупаемость на фоне известкования по 1 H_r была меньше, чем на фоне без извести, т.к. прибавка урожайности на этом фоне относительно варианта без удобрений была также соответственно меньше. Выявлены достоверные корреляционные связи между содержанием подвижного фосфора в почве и урожайностью овса ($r = 0.71$). При этом надо отметить, что коэффициент корреляции на фоне без извести составил 0.81, а на фоне известкования по 1.0 H_r – 0.66.

Важным показателем качества зерна и зеленой массы клевера лугового является содержание в нем белка (сырого протеина). Установлено, что основное количество белка в зерне накапливается благодаря оттоку азотистых веществ из вегетативных органов и немного за счет поглощения азота корнями после цветения. На азотный обмен сильное влияние оказывает фосфор, а точнее соотношение азота и фосфора [21]. Минеральные удобрения оказывали неоднозначное влияние на

качество культур в опыте. Существенно выше (в 1.1 раза) было содержание протеина в зерне озимой ржи на произвесткованном фоне – 10.6%, чем на фоне без извести – 9.35% (табл. 4). На почве с повышенным и высоким содержанием подвижного фосфора при применении удобрений (N90P50K90) данный показатель увеличивался на 1.60–1.89% на фоне без извести и на 1.23–2.25% – на фоне известкования по 1.0 H_r . Максимальное содержание протеина (11.5%), что было больше в 1.2 раза, чем в контрольном варианте, отмечено на почве при pH 5.4–5.7 и содержании подвижного фосфора 170–191 мг/кг.

При возделывании пшеницы на хлебопекарные цели содержание белка должно быть $\geq 13\%$. Содержание сырого протеина в зерне пшеницы сорта Ирень в варианте без удобрений составило 11.7% на фоне без извести и 10.1% – на произвесткованном фоне. Применение удобрений (N90P50K90) способствовало повышению содержания сырого протеина в зерне до 13.4–14.7% на

кислой почве и до 13.1–16.1% на известкованном фоне, коэффициент корреляции составил 0.68. Сорт Баженка, возделываемый в 2020 г., сформировал зерно с более низким содержанием сырого протеина, чем сорт Ирень. Отмечены одинаковые тенденции к увеличению данного показателя: при выращивании культуры на известкованном фоне содержание белка в зерне составило в среднем до 12.2%, максимальное содержание сырого протеина 13.0% было сформировано на почве с содержанием подвижного фосфора 184–266 мг/кг.

Согласно ГОСТ Р-53901-2010 “Овес кормовой. Технические условия”, зерно овса сорта Медведь можно отнести ко II классу – при возделывании овса без удобрений содержание сырого протеина в зерне составило 11.6% на фоне без извести и 11.8% на известкованном фоне. На содержание сырого протеина в зерне овса влияние оказывали азотные удобрения как при одностороннем внесении, так и в составе НРК, коэффициент корреляции составил 0.65, а зерно соответствовало I классу, т.е. содержание сырого протеина было >12%.

Максимальное содержание сырого протеина в сухой массе клевера 18.4 и 21.2% отмечено в варианте с повышенным содержанием фосфора в почве (170–191 мг/кг) на обоих фонах (табл. 4). При этом на известкованном фоне содержание протеина в клевере было больше, чем на фоне без известкования. Установлены достоверные корреляционные связи степени кислотности почвы (величин рН и H_T) с содержанием сырого протеина в сухой массе клевера ($r = 0.87$ и $r = -0.86$ соответственно). Доля влияния содержания подвижного фосфора в почве на содержание протеина в клевере была незначительной.

Злаковые культуры, изученные в опыте, относятся к группе зернофуражных культур, в то же время эти культуры продовольственные, из которых получают высококачественные продукты питания. Большое значение имеет определение показателей, которые входят в базисную норму ГОСТов при заготовках и поставках зерна. Так натура зерна ржи и пшеницы служит одним из ориентировочных показателей мукомольных качеств, овса – характеризует выход ядра. Базисная норма натуры зерна для озимой ржи в Кировской обл. равна 680 г/л, в вариантах опыта этот показатель менялся в пределах 701–713 г/л, т.е. превышал базисную норму. Показатель массы 1000 зерен, характеризующий крупность и выполненность зерна, связан с линейными размерами зерна, химическим составом и комплексом технологических свойств, обуславливающих каче-

ство получаемой продукции [22]. В нашем опыте удобрения не оказали существенного влияния на массу 1000 зерен озимой ржи, в среднем на 2.7 г крупнее сформировалось зерно на известкованной почве, чем на кислой. Важным показателем технологических качеств зерна озимой ржи является число падения, который отражает степень пророслости зерна и активность фермента альфа-амилазы. По нему судят о пригодности зерна к переработке на муку. Основным фактором, определяющим величину этого показателя, является уровень увлажнения в период налива зерна [22]. Созревание озимой ржи в 2016 г. проходило при благоприятных условиях: температура воздуха была выше нормы на 2.1°C во 2-й декаде и на 3.9°C – в 3-й декаде июля, при минимальном (1.5% от нормы) уровне увлажнения. При таких метеоусловиях число падения озимой ржи в опыте было достаточно высоким – >200 с, что соответствовало I-му классу ГОСТ 16990-88 “Рожь. Требования при заготовках и поставках”, влияние удобрений и уровня плодородия почвы на этот показатель было незначительным.

Базисная норма этого показателя для яровой пшеницы в Кировской обл. (ГОСТ Р 52554-2006 “Пшеница. Требования при заготовках и поставках”) равна 730 г/л. Натура зерна сорта Ирень в вариантах опыта менялась в пределах 749–796 г/л, т.е. превышала базисную норму (табл. 5). Исключение составил вариант 4 на известкованном фоне, где было отмечено сильное полегание растений. Надо отметить, что на обоих фонах в вариантах без удобрений и одностороннем внесении азотного удобрения натура зерна была наибольшей (785–796 г/л). Сложившиеся погодные условия (повышенная температура воздуха при недостатке увлажнения) в период налива зерна оказали влияние на крупность зерна – масса 1000 зерен была в среднем равна 31.1 и 32.9 г соответственно фонам без извести и известкования, что больше контрольных вариантов на 9 и 13%.

Согласно межгосударственному стандарту (ГОСТ 28673-2019. Овес. Технические условия) по величине натурной массы зерно овса подразделяют на 3 класса: I класс – ≥ 550 , II класс – ≥ 540 , III класс – ≥ 520 г/л. Зерно овса сорта Медведь соответствовало требованиям ГОСТа. Максимальная натура зерна отмечена в 2-х вариантах на фоне известкования по 1 H_T – 530 г/л. Таким образом, несмотря на имеющиеся литературные данные [23] о влиянии доз и видов минеральных удобрений на натуру зерна, результаты нашего исследования этого не подтвердили. Согласно сортовым характеристикам, сорт Медведь формирует зерно с массой 1000 зерен от 34 до 46 г, что

Таблица 5. Качество сельскохозяйственных культур в зависимости от плодородия дерново-подзолистой почвы

Показатель	рН _{KCl}	Содержания подвижного фосфора в почве, мг/кг					
		67–88	66–86	107–152	170–191	184–266	186–271
Озимая рожь сорта Фаленская 4, 2016 г.							
Масса 1000 зерен, г	3.7–4.0	27.9	26.4	25.7	25.8	25.3	25.7
	5.4–5.7	26.6	27.1	28.3	29.5	30.4	30.8
Натура зерна, г/л	3.7–4.0	734	723	711	705	702	709
	5.4–5.7	722	714	705	710	711	711
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 7					
Число падения, с	3.7–4.0	236	237	232	226	225	237
	5.4–5.7	242	224	228	218	236	240
Яровая пшеница сорта Ирень, 2017 г.							
Масса 1000 зерен, г	3.7–3.9	28.6	32.2	28.4	29.8	32.4	32.9
	5.3–5.6	29.2	35.2	34.0	29.5	31.9	34.1
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 3.3					
Натура зерна, г/л	3.7–3.9	785	785	749	754	764	779
	5.3–5.6	793	796	783	728	758	776
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 28					
Содержание сырой клейковины, %	3.7–3.9	24.8	31.8	33.4	33.8	31.6	28.8
	5.3–5.6	25.0	38.0	29.8	39.8	36.2	34.1
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 3.0					
Яровая пшеница сорта Баженка, 2020 г.							
Масса 1000 зерен, г	3.8–3.9	31.0	34.0	30.7	32.0	31.4	31.3
	5.3–5.4	30.5	33.4	31.0	30.0	30.9	29.1
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 0.6					
Натура зерна, г/л	3.8–3.9	767	771	750	762	761	756
	5.3–5.4	760	770	748	745	745	737
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 8.5					
Содержание сырой клейковины, %	3.8–3.9	25.2	30.0	32.6	30.8	31.4	29.8
	5.3–5.4	23.6	30.0	28.8	29.8	30.8	29.8
	<i>HCP</i> ₀₅	Фактор <i>B</i> = 2.5					
Овес сорта Медведь, 2021 г.							
Масса 1000 зерен, г	3.7–3.9	38.1	38.3	38.6	38.1	39.6	39.1
	5.2–5.4	38.8	38.0	38.8	38.8	38.0	38.5
Натура зерна, г/л	3.7–3.9	525	519	520	526	517	522
	5.2–5.4	528	520	530	520	515	530

по Международному классификатору СЭВ рода *Avena* L. считается выше средней группы. Сложившиеся погодные условия в период налива зерна оказали влияние на крупность зерна – масса 1000 зерен была в вариантах равна 38.0–39.6 г. без существенной разницы в зависимости от варианта опыта и фона. Надо отметить, что по дан-

ным других исследователей применение удобрений либо не влияло на показатель массы 1000 зерен [24], либо увеличивало его в 50–56% случаев [25].

Одним из наиболее важных показателей технологических качеств зерна яровой пшеницы является содержание сырой клейковины. Возделываемые в опыте сорта яровой пшеницы Ирень и

Баженка относятся к ценным по качеству сортам, т.е. содержание сырой клейковины в зерне должно быть $\geq 25\%$. В условиях 2017 г. во всех вариантах опыта с удобрениями содержание сырой клейковины было достаточно высокое: в среднем на кислом фоне – 30.7, на известкованном – 33.8%. Внесение удобрений повышало содержание клейковины в 1.4 раза (при pH 3.7–3.9) и в 1.6 раза (при pH 5.3–5.6) по сравнению с контрольным вариантом на почве с содержанием подвижного фосфора 170–191 мг/кг. В почвенно-климатических условиях Нечерноземной зоны обычно, когда выявлено высокое содержание клейковины в зерне, то качество клейковины снижается. Показано на приборе ИДК-1, что показатель деформации клейковины был >80 ед. прибора, что соответствовало II группе качества (удовлетворительная слабая). Возделываемый в опыте в 2020 г. сорт Баженка сформировал зерно с достаточно высоким содержанием сырой клейковины: в среднем на кислом фоне – 30.9, на известкованном – 29.8%, показатель деформации клейковины составил 101 ед. прибора, что соответствовало II группе качества. Надо отметить, что выявлена тесная корреляционная связь урожайности яровой пшеницы с содержанием клейковины в зерне ($r = 0.78$). Таким образом, внесение удобрений оказывало существенное влияние на качество зерна яровой пшеницы независимо от содержания подвижного фосфора в почве и почвенной кислотности.

ВЫВОДЫ

1. Длительное (50 лет) применение минеральных удобрений без известкования привело к подкислению дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы к уровню исходной кислотности почвы и составило в среднем 3.8 ед. pH. Отмечено подкисление почвы известкованного фона в среднем на 0.7–0.8 ед. Содержание подвижного фосфора в почве по окончании ротации севооборота (2021 г.) в зависимости от варианта опыта изменялось от среднего (66–88 мг/кг) до очень высокого (266–271 мг/кг).

2. Максимальная урожайность (4.43 т/га) в длительном стационарном опыте в период 2016–2021 гг. получена у озимой ржи сорта Фаленская 4 при внесении N90P50K90 на почве с pH_{KCl} 3.8 и содержанием подвижного фосфора в почве 121 мг/кг, что было больше, чем в варианте без удобрений в 1.6 раза. Максимальная окупаемость удобрений получена у озимой ржи сорта Фаленская 4 (10.4 кг) и яровой пшеницы сорта Ирень

(8.7 кг) при внесении аммиачной селитры в дозе 90 кг/га.

3. Содержание сырого протеина в зерне злаковых культур и зеленой массе клевера лугового было больше на почве при pH 5.2–5.7, чем при pH 3.7–4.0, не зависело от содержания подвижного фосфора в почве. Внесение удобрений (N90 и N90P50K90) под злаковые культуры повышало этот показатель на 1.60–5.96%.

4. Показатель натурности зерна злаковых культур не зависел от уровня кислотности и содержания подвижного фосфора в почве, при этом показатель превышал базисную норму стандартов при заготовках зерна.

5. Содержание сырой клейковины в зерне яровой пшеницы сортов Ирень и Баженка повышалось при применении удобрений на 4.0–14.8%. Максимальное содержание (33.8 и 39.8%) отмечено у сорта Ирень как на кислой, так и на известкованной почве при содержании подвижного фосфора 170–191 мг/кг при внесении N90P50K90.

6. Влияние удобрений и уровня плодородия почвы на показатель число падения у озимой ржи было несущественным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно ландшафтом земледелии // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139.
2. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почвы России и пути его регулирования // Плодородие. 2020. № 6. С. 3–13.
3. *Кидин В.В.* Система удобрения. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 534 с.
4. *Тюлин В.В.* Почвы Кировской области. Киров: Волго-Вятское кн. изд-во, Кировское отд-е, 1976. 288 с.
5. *Молодкин В.Н., Бусыгин А.С.* Плодородие пахотных почв Кировской области // Земледелие. 2016. № 8. С. 16–18.
6. Единая межведомственная информационно-статистическая система [Электр. ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31533> (дата обращения 20.01.2023 г.)
7. Динамика изменения кислотности почв Кировской области [Электр. ресурс]. URL: <https://agrohim-kirov.ru/динамика-изменения-кислотности-почв/> (дата обращения 11.01.2023 г.)
8. *Дыбин В.В., Чернышкова Л.Б.* Изменение плодородия дерново-подзолистой почвы и продуктивности культур при длительном применении удобрений с известкованием // Плодородие. 2014. № 2. С. 22–23.
9. *Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е.* Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агро-

- фитоценозов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 92–115.
10. Шафран С.А. Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и ее резервы // Агрохимия. 2016. № 8. С. 3–10.
 11. Лыскова И.В., Суховеева О.Э., Лыскова Т.В. Влияние локального изменения климата на продуктивность яровых зерновых культур в условиях Кировской области // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2021. № 22 (2). С. 244–253.
 12. Завьялова Н.Е., Шишков Д.Г. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество сельскохозяйственных культур в длительном стационарном опыте в климатических условиях Предуралья // Изв. ТСХА. 2020. Вып. 5. С. 5–17.
 13. Пасынкова Е.Н., Пасынков А.В., Баландина С.А. Формирование урожая и технологических качеств зерна различных сортов овса в зависимости от доз и сроков применения азотных удобрений // Агрохимия. 2008. № 4. С. 43–51.
 14. Косолапова В.И., Возжаев В.И., Лейних П.А. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от применения минеральных удобрений // Перм. аграрн. вестн. 2017. № 3 (19). С. 76–80.
 15. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
 16. Метод ускоренного определения азота с использованием аппарата Сереньева. М.: ЦИНАО, 1989. 8 с.
 17. Методические рекомендации по оценке качества зерна. М., 1977. 172 с.
 18. Калинин А.И. Агрохимические свойства дерново-подзолистых почв и продуктивность растений. Киров, 2004. 220 с.
 19. Прошкин В.А. Моделирование эффективности минеральных удобрений по показателям агрохимических свойств почвы // Агрохимия. 2012. № 7. С. 16–27.
 20. Абашев В.Д., Светлакова Е.В. Влияние минеральных удобрений на урожайность культур зернотравяного севооборота // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 2 (45). С. 37–43.
 21. Коданев И.М. Агротехнические приемы повышения качества зерна. Горький, 1981. 47 с.
 22. Беркутова Н.С. Методы оценки и формирование качества зерна. М.: Росагропромиздат, 1991. 206 с.
 23. Завалин А.А., Пасынков А.В. Азотное питание и прогноз качества зерновых культур. М.: ВНИИА, 2007. 208 с.
 24. Абашев В.Д., Попов Ф.А., Носкова Е.Н., Жук С.Н. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество голозерного овса сорта Першерон // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2018. Т. 62. № 1. С. 52–57.
 25. Mutlu A. The effect of organic fertilizers on grain yield and some yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.) // Fresen. Environ. Bul. 2021. № 29 (12). P. 10840–10846.

Dependence of Crop Yield and Quality on Fertility of Sod-Podsolic Soil

I. V. Lyskova^{a,*} and T. V. Lyskova^a

^aFalenki Breeding Station – Branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky ul. Timiryazeva 3, Falenki, Kirov region 612500, Russia

*E-mail: fss.nauka@mail.ru

Based on long-term (2016–2021) research results in a long-term stationary experiment (1971–2021) in the eastern district of the central climatic zone of the Kirov region, the influence of soil acidity and the content of mobile phosphorus on the yield and quality of grain crops and meadow clover when applying fertilizers (N90, N90P50K90) was estimated. It was found that the maximum yield (4.43 t/ha) in a long-term stationary experiment in the period 2016–2021 was obtained from Falenskaya 4 winter rye when N90P50K90 was applied to soil with pH_{KCl} 3.8 and the content of mobile phosphorus in the soil was 121 mg/kg, which is 1.6 times higher than the “without fertilizers” option. The content of crude protein in the grain of cereals and the green mass of meadow clover was formed higher on the soil at pH 5.2–5.7 than at pH 3.7–4.0, did not depend on the content of mobile phosphorus in the soil, the application of fertilizers (N90, N90P50K90) for cereals increased the indicator by 1.60–5.96%. The indicator “grain nature” of cereal crops did not depend on the level of acidity and the content of mobile phosphorus in the soil, while the indicator exceeded the basic norm of standards for grain harvesting. The content of raw gluten in the grain of spring wheat varieties Iren and Bazhenka increased with the use of fertilizers by 4.0–14.8%. The maximum content (33.8 and 39.8%) was observed in the Iren variety on both acidic and cultivated soil with a mobile phosphorus content of 170–191 mg/kg when N90P50K90 was applied. The effect of fertilizers and the level of soil fertility on the indicator “falling number” in winter rye was insignificant.

Keywords: long stationary experiment, lime application, mineral fertilizers, mobile phosphorus, winter rye, spring wheat, oats, meadow clover, weight 1000 grains, grain nature, crude protein, falling number.

УДК 631.416.1/.2/.4:631.445.41: 633.853

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В АГРОЧЕРНОЗЕМЕ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ РЫЖИКА ПОСЕВНОГО

© 2023 г. Н. Л. Кураченко^{1,*}, О. А. Ульянова¹, О. А. Власенко¹,
В. В. Казанов¹, Е. Ю. Казанова¹

¹Красноярский государственный аграрный университет
660049 Красноярск, просп. Мира, 90, Россия

*E-mail: kurachenko@mail.ru

Поступила в редакцию 08.03.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

В полевом опыте изучен пищевой режим агрочернозема при возделывании рыжика посевного (*Camelina sativa* (L.) Grantz) в условиях Канской лесостепи Красноярского края. Преимущественное поглощение и вынос культурой нитратного азота и обменного калия определило низкую обеспеченность минеральным азотом 0–40 см слоя почвы (5–6 мг/кг) при сохранении средней и очень высокой обеспеченности обменным калием (87–158 мг/кг). Показано, что наибольшая доля возврата в почву после уборки рыжика приходилась на N и P (50–37%). С корневыми и пожнивными остатками в почву возвращалось: азота – 70, фосфора – 19 и калия – 51 кг/га. Агрочерноземы Канской лесостепи без дополнительного внесения удобрений способны обеспечивать достаточный уровень фосфорного и калийного питания в посевах рыжика.

Ключевые слова: агрочернозем, рыжик посевной, аммонийный азот, нитратный азот, подвижный фосфор, обменный калий.

DOI: 10.31857/S0002188123090077, **EDN:** YVBXFY

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть пахотных земель в Российской Федерации расположена в климатических зонах с неблагоприятными для культурных растений условиями. Для сибирского региона расширение ассортимента новых видов масличных растений, нетребовательных к почвенно-климатическим условиям, важно с точки зрения повышения биоразнообразия и стабильности производства растительных масел для различного хозяйственного использования. Капустные культуры (семейство Brassicaceae) сегодня занимают одну из ведущих позиций в производстве масличных культур [1]. Рыжик посевной (*Camelina sativa* (L.) Grantz) является единственным видом, дающим полувысыхающее масло с содержанием жира 29–47%. Это одна из перспективных масличных культур для лесостепной зоны Красноярского края с резкоконтинентальным климатом. Это растение длинного дня, способное хорошо переносить низкие температуры в начале вегетации, отличающееся скороспелостью, достаточно высокой засухоустойчивостью [2–4]. Возделывание рыжика посевного представляет интерес в связи с его продовольственным, кормовым, техническим, агротехническим и экологическим значением [5].

Капустные масличные культуры предъявляют не одинаковые требования к почвенному плодородию, и при этом они по-разному влияют на пищевой режим почв. Это необходимо учитывать при разработке технологии их возделывания, рациональном размещении их в севообороте с учетом плодородия почв. Цель работы – изучение пищевого режима агрочернозема при возделывании рыжика посевного в условиях Канской лесостепи.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в 2019–2020 гг. в полевом опыте на территории ООО “ОПХ Соляное” Канско-Рыбинского геоморфологического округа Красноярского края. Среднегодовое количество осадков на этой территории составляет 359–452 мм при отрицательной среднегодовой температуре, изменяющейся от –0.3 до –3.0°C. Продолжительность периода биологической активности варьирует в пределах 84–115 сут. Сумма температур >10°C равна 1560–1800°C.

Объектами исследования явились агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный тяжело-суглинистый и рыжик посевной (*Camelina sativa* (L.) Crantz) сорта Ужурский, возделываемый в

2019 г. после занятого пара (горохоовсяной смеси) и в 2020 г. — после чистого пара. Детальное обследование опытного участка с целью выявления неоднородности агроэкологического состояния почвенного покрова показало, что почвы характеризовались в слое 0–20 см высоким содержанием гумуса (6–9%), высокой суммой обменных оснований (62–51 ммоль/100 г), нейтральной реакцией почвенного раствора (pH_{H_2O} 6.5–6.9).

В технологии возделывания рыжика посевного применяли следующие препараты: Табу, ВСК (6 л/т) + Миура (0.8 л/га) + Гуминатрин масляный (2.2 л/га) + Брейк, МЭ (0.06 л/га). В период вегетации культуры использовали магниевую селитру (3 кг/га) для подкормки растений.

Общая площадь опытных делянок 1500 м², учетная — 500 м². Агрохимические показатели определяли в смешанных почвенных образцах, состоящих из 10-ти индивидуальных проб, отобранных на глубине 0–20 и 20–40 см в период с мая по сентябрь. В почвенных образцах определяли: содержание нитратного азота (ГОСТ 26488-85), обменного аммония (ГОСТ 26489-85), подвижного фосфора (ГОСТ 26204-91), обменного калия (ГОСТ 26204-91). В надземной фитомассе и корнях в фазах листовой розетки, цветения и зеленой спелости рыжика определяли содержание азота (ГОСТ 32044.1-2012), фосфора (ГОСТ ISO 6491-2016) и калия (ГОСТ 30504-97). Надземное и подземное растительное вещество учитывали в четырехкратной повторности. Надземное растительное вещество определяли методом укосов, площадь укоса — 0.25 м². Подземное растительное вещество учитывали одновременно с надземным в те же сроки и на тех же пробных площадях методом монолитов на глубине 0–20 и 20–40 см. Площадь монолита — 0.02 м². Монолиты отмывали от почвы в проточной воде на сите с диаметром ячеек 0.25 мм. Отмытое подземное растительное вещество разбирали на фракции: корни, крупную мортмассу >0.5 мм, мелкую мортмассу <0.5 мм. Все фракции растительного вещества доводили до воздушно-сухого состояния, взвешивали и определяли запасы.

Для выявления достоверных различий средних использовали двухфакторный дисперсионный анализ [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание азота в почве, его запасы, формы и подвижность в существенной степени определяют плодородие почвы [7]. На долю минерального азота в агропочвах земледельческой части

Красноярского края приходится всего 1–2%. Поэтому количество азота в пахотных почвах по обеспеченности питания растений часто бывает в минимуме и лимитирует урожайность сельскохозяйственных культур. Динамика и содержание доступных и подвижных форм элементов питания в почве в период вегетации культурных растений позволяет судить об их обеспеченности во время фаз развития.

Непосредственным источником питания растений является минеральный азот. При этом нитратная и аммонийная форма азота в физиологическом отношении являются равноценными источниками питания растений.

При схожей динамике содержания минерального азота в пахотном и подпахотном слоях лучшие условия для его накопления складывались при возделывании рыжика посевного после чистого пара. В условиях повышенной влагообеспеченности вегетационного сезона 2020 г. отмечено более интенсивное накопление нитратного азота в почве. В посевах рыжика посевного, возделываемого после занятого пара, установлено преобладание аммонийной формы над нитратной в течение вегетации культуры (рис. 1).

На фоне низкой обеспеченности нитратным азотом слоя 0–40 см агрочернозема (4–6 мг/кг) отмечена, как правило, средняя обеспеченность почвы аммонийной формой азота. В период цветения рыжика усиление процессов аммонификации, обусловленное оптимальными погодными условиями, определяло повышенное содержание этой формы азота (14 мг/кг). Усиление аммонификационных процессов в период созревания семян рыжика способствовало формированию средней и повышенной обеспеченности слоя 0–20 см агрочернозема аммонийным азотом (8–15 мг/кг).

Хорошая обеспеченность аммонийным азотом почвы под посевом рыжика определялась влиянием предшественника. Это было обусловлено активным гидролизом и минерализацией органических веществ остатков горохоовсяной смеси парового поля. По данным [8], фактор “предшественник” в большей степени оказывает влияние на мобилизацию минерального азота по сравнению с ГТК.

Известно, что процессы образования аммонийной и нитратной формы азота взаимосвязаны. Пассивная аммонификация тормозит нитратонакопление, а усиление аммонификации приводит к энергичному проявлению нитрификационного процесса. Низкая обеспеченность нитратным азотом слоя 0–40 см агрочернозема под посевами рыжика обусловлена преимущественным потреблением этой формы азота вегетативной массой культуры. Оценка среднестатистического содержания минерального азота и характера его дина-

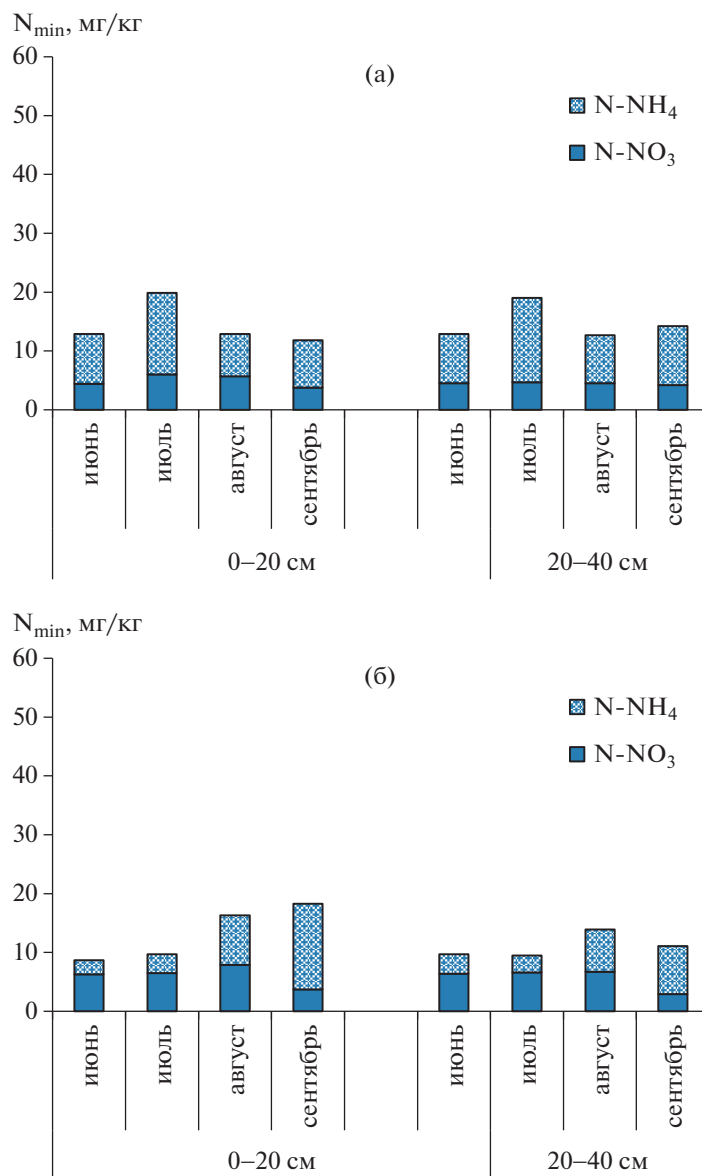


Рис. 1. Динамика содержания минерального азота в агрочерноземе под посевами ржи посевного: (а) – 2019 г. (после занятого пара), (б) – 2020 г. (после чистого пара), мг/кг.

мики показала преимущественное потребление нитратного азота ржи посевным (табл. 1). Установлена средняя обеспеченность слоя 0–40 см агрочернозема под посевами ржи посевного, возделываемого после занятого пара (9–10 мг/кг) при средней сезонной динамике показателя ($C_v = 27–32\%$). В почве под посевами ржи после чистого пара в течение вегетационного сезона в среднем формировалась низкая обеспеченность аммонийным и нитратным азотом, не превышающая 7 мг/кг.

Выявлены достоверные изменения содержания минеральных форм азота по годам исследования, а также в пахотном и подпахотном слоях

($p < 0.05$). Исключение составляло содержание нитратного азота, достоверно не отличавшееся по годам исследования.

Динамика содержания подвижного фосфора, необходимого для формирования мощной корневой системы масличных культур, повышения их устойчивости к морозу, засухе, увеличения семенной продуктивности и ускорения созревания семян, проявлялась как в течение всего периода вегетации ржи, так и по годам исследования.

В начале вегетации ржи посевного отмечена повышенная обеспеченность P_2O_5 в слое 0–40 см почвы по годам исследования (232–245 мг/кг), что особенно важно в ранних фазах развития рас-

Таблица 1. Среднестатистические параметры содержания минерального азота в агрочерноземе под посевами рожька посевного, мг/кг

Слой, см (фактор А)	Год (фактор Б)				Среднее фактора А
	2019 г.		2020 г.		
	Sx	Cv, %	Sx	Cv, %	
N-NH ₄					
0–20	9.4	32	7.2	78	8.3
20–40	10.2	27	5.4	50	7.8
Среднее фактора Б	9.8		6.3		
$p_A = 0.026^*$, $p_B = 0.0001^*$, $p_{AB} = 0.001^*$					
N-NO ₃					
0–20	4.9	20	6.1	29	5.5
20–40	4.5	4	5.7	32	5.1
Среднее фактора Б	4.7		5.9		
$p_A = 0.0006^*$, $p_B = 0.11$, $p_{AB} = 0.012^*$					

тений [9]. Значительное уменьшение количества подвижных фосфатов до низкого уровня произошло в период цветения рожька (146–149 мг/кг). Пополнение почвенного раствора подвижными фосфатами, отмеченное в августе и сентябре, в большей степени проявлялось в вегетационный сезон 2019 г. При размещении культуры после чистого пара была отмечена повышенная обеспеченность P₂O₅ в течение вегетации культуры.

Различный характер динамики накопления подвижного фосфора в агрочерноземе был обусловлен влажностью почвы. Хорошо известно, что основное перемещение фосфора к корням растений осуществляется при диффузии ионов. В сухой же почве, когда расстояние перемещения иона превышает 5–10 мм, поглощение фосфора замедляется. По мнению [10], у рожька имеется важная особенность – способность усваивать из почвы труднодоступные фосфаты. При этом вынос элементов питания урожаем небольшой. По данным авторов, больше всего растения рожька посевного с урожаем выносят азот – 68.2 кг/т основной и сопутствующей продукции. Меньше всего растения выносят фосфор (12.2 кг/га).

В посевах масличных культур калий улучшает усвоение азота и фосфора, снижает повреждаемость вредителями и поражаемость болезнями растений. Установлено, что максимальное количество обменного калия содержалось в слое 0–20 см агрочерноземов, ниже, в подпахотном горизонте его количество постепенно уменьшалось.

В вегетационный сезон 2019 г. средняя обеспеченность почвы K₂O отмечена до цветения расте-

ний рожька (65–78 мг/кг), далее выявлена повышенная и высокая обеспеченность (96–118 мг/кг). Очень высокая обеспеченность агрочернозема обменным калием в агроценозе рожька стабильно (Cv = 4–12%) сохранялась при его возделывании после чистого пара. По мнению В.Н. Якименко [11], потребность сельскохозяйственных культур в калии меняется в онтогенезе. Наиболее высокая требовательность к уровню калийного питания отмечена на ранних этапах развития и в период максимального нарастания биомассы. Кроме того, культуры с хорошо развитой корневой системой положительно отзываются только на внесение азотных и фосфорных удобрений даже на почвах с относительно истощенными калийными запасами. Это подтверждает их способность усваивать труднодоступные формы калия.

Анализ среднестатистического содержания подвижного фосфора и обменного калия в агрочерноземе при возделывании рожька посевного показал достоверное накопление элементов питания в слое 0–20 см и существенные отличия по годам исследования (табл. 2). Повышенная обеспеченность почвы подвижным фосфором под посевами рожька свидетельствовала о способности этой культуры сохранять запасы подвижного фосфора. Несмотря на интенсивное поглощение обменного калия и его преимущественный вынос из почвы урожаем культуры, сохранялась средняя обеспеченность этим элементом питания в вегетационный сезон 2019 г. (85–88 мг/кг). В условиях 2020 г. среднестатистическое содержание обменного калия в почве под посевами рожька оценивалось как очень высокое (151–165 мг/кг).

Особенности калийного режима почвы под посевами рожька посевного дали основание утверждать о существовании зависимости его изменений за счет главным образом почвенных процессов – мобилизации (высвобождения) и фиксации. По данным [12], при внесении высоких доз калийных удобрений содержание обменного калия в большинстве случаев сохраняется примерно на одном уровне. Это обусловлено динамическим равновесием всех форм почвенного калия. Известно, что фиксация калия почвой происходит при разной степени увлажнения, но более всего она выражена при влажности ≈30% и при переменном чередовании увлажнения и высушивания. Эти факторы влияют на систему всех форм почвенного калия.

Изучение особенностей поступления элементов питания и требования рожька к азотному, фосфорному и калийному питанию в различные периоды онтогенеза растений показало, что в су-

хой надземной фитомассе больше всего накопилось азота и калия (табл. 3).

Максимальное поглощение калия отмечено в период от фазы всходов до формирования листовой розетки (3.5%). Накопление азота в сухом веществе фитомассы рыжика наблюдали до фазы цветения (2.6–1.9%). Содержание азота, фосфора и калия в корнях рыжика оценили меньшей величиной, чем в надземной фитомассе. Для азота и калия характерно изменение химического состава корней в зависимости от фазы развития культуры. Максимальное количество азота накапливалось в период формирования листовой розетки (1.0%), калия в фазе цветения–плодоношения – 0.7%. Независимо от фазы развития культуры содержание фосфора изменялось в корнях от 0.2 до 0.3%.

Поступление азота, фосфора и калия с растительными остатками рыжика посевного было равно 140 кг/га (табл. 4), что было в 2 раза меньше по сравнению с рапсом [13]. С корневыми и пожнивными остатками рыжика в почву возвращалось до 70 кг N/га и 51 кг K₂O/га. Количество фосфора в среднем за период наблюдений не превышало 19 кг/га. Установлено, что с 1 т соломы в почву возвращалось у зернобобовых культур: азота – 6.9–8.2, фосфора – 4.4–4.6, калия – 16.6–18.0 кг/га; у озимых культур: азота – 4.1–4.9, фосфора – 2.6–3.1, калия – 15.3–17.7 кг/га [14]. Это позволило заключить, что с пожнивными остатками рыжика посевного в почву возвращалось значительно больше азота по сравнению с соломой зерновых и зернобобовых культур.

Полученные данные позволяют заключить, что агрочерноземы в климатических условиях Канской лесостепи без дополнительного внесения удобрений способны обеспечивать достаточный уровень фосфорного и калийного питания в посевах рыжика. Интенсивное потребление нитратного азота культурой должно быть компенсировано минеральными удобрениями и подкормками во время ее вегетации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание и динамика элементов питания в агрочерноземе Канской лесостепи при возделывании рыжика посевного определялись предшественником и погодными условиями вегетационных сезонов. Результаты проведенного исследования свидетельствовали о преимущественном потреблении культурой нитратного азота, что подтверждалось низкой обеспеченностью этой формой азота слоя 0–40 см агрочернозема (5–6 мг/кг). Минерализация органических остатков горохово-овсяной смеси занятого пара определила сред-

Таблица 2. Среднестатистическое содержание подвижного фосфора и обменного калия в агрочерноземе под посевами рыжика посевного, мг/кг

Слой, см (фактор А)	Фактор Б				Среднее фактора А
	2019 г.		2020 г.		
	Sx	Cv, %	Sx	Cv, %	
P₂O₅					
0–20	214	24	235	10	224
20–40	236	30	237	8	237
Среднее фактора Б	225		236		
$p_A = 0.0024^*, p_B = 0.0044^*, p_{AB} = 0.0076^*$					
K₂O					
0–20	88.4	15	165	4	127
20–40	84.9	27	151	12	118
Среднее фактора Б	86.7		158		
$p_A = 0.0033^*, p_B = 0.0001^*, p_{AB} = 0.038^*$					

Таблица 3. Химический состав фитомассы и корней рыжика посевного (2019–2020 гг.), % от сухого вещества

Фаза развития	Химический элемент		
	N	P	K
Надземная фитомасса			
Листовая розетка	2.55	0.50	3.47
Цветение	1.93	0.53	1.00
Зеленая спелость	1.76	0.60	0.69
Среднее	2.08	0.54	1.72
Корни			
Листовая розетка	1.00	0.20	0.21
Цветение	0.56	0.24	0.65
Зеленая спелость	0.89	0.28	0.24
Среднее	0.82	0.24	0.37

Таблица 4. Поступление в почву элементов питания с пожнивными и корневыми остатками рыжика посевного (2019–2020 гг.), кг/га

Химический элемент	Пожнивные остатки	Корни	Всего
N	52.4	17.3	69.7
P	13.6	5.1	18.7
K	43.3	7.9	51.2
Суммарное поступление	109.3	30.3	139.6

ную обеспеченность почвы аммонийным азотом (10 мг/кг). Незначительный вынос фосфора растениями рыжика обусловил повышенную обеспеченность агрочернозема подвижным фосфором (203–236 мг/кг) независимо от предшественника. Средняя (87 мг/кг) и очень высокая (158 мг/кг) обеспеченность почвы обменным калием на 97% определялась влиянием погодных условий и типом предшествующего парового поля. Данные химического состава растений рыжика свидетельствовали о преимущественном накоплении азота и калия в надземной фитомассе. Поступление азота, фосфора и калия с растительными остатками рыжика посевного оценили величиной 140 кг/га. С корневыми и пожнивными остатками рыжика в почву возвращалось: азота – 70 и калия – 51 кг/га. Количество фосфора в среднем за период наблюдений не превышало 19 кг/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прахова Т.Я., Смирнов А.А. Рыжик (*Camelina sativa* (L.) Crantz) и крамбе (*Crambe byssinica* Hochst.) – перспективные масличные культуры // Зерн. хозяйство России. 2013. № 4. С. 20–22.
2. Евтишина Е.В., Виноградов Д.В., Лупова Е.И., Гогмачадзе Г.Д. Влияние сроков посева и норм высевы на урожайность семян рыжика ярового в условиях Рязанской области // АгроЭкоИнфо. 2018. № 3.
3. Кураченко Н.Л., Ульянова О.А., Власенко О.А., Казанов В.В., Казанова Е.В. Оценка соответствия почвенно-агрохимических условий Канской лесостепи биологическим потребностям растений рапса и рыжика // Достиж. науки и техн. АПК. 2019. Т. 33. № 11. С. 5–9.
4. Виноградов Д.В., Мажайский Ю.А., Евтишина Е.В., Лупова Е.И. Приемы повышения продуктивности рыжика посевного (*Camelina sativa* (L.) Crantz) в условиях Нечерноземной зоны России // Рос. сел.-хоз. наука. 2019. № 4. С. 18–21.
5. Бопп В.Л., Пыжикова Н.И., Кураченко Н.Л., Валова Т.И. Обоснование способов и сроков уборки масличных культур (рапс, рыжик, горчица) в условиях Канской лесостепи // Вестн. КрасГАУ. 2019. № 6(147). С. 52–58.
6. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во МГУ, 1995. 319 с.
7. Васбиева М.Т. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на динамику содержания органического углерода и азотный режим дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1365–1372.
8. Чупрова В.В. Углерод и азот в агроэкосистемах Средней Сибири. Красноярск, 1997. 165 с.
9. Кураченко Н.Л., Колесник А.А. Содержание и пространственное распределение подвижных элементов питания агрочерноземов в зависимости от способов основной обработки почвы // Агрохимия. 2020. № 7. С. 11–16.
10. Прахова Т.Я., Вельмисева Л.Е. Влияние удобрений на продуктивность рыжика посевного // Зерн. хозяйство России. 2015. № 5. С. 27–30.
11. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
12. Рудой Н.Г. Агрохимия почв Средней Сибири. Красноярск, 2004. 166 с.
13. Кураченко Н.Л., Ульянова О.А., Власенко О.А., Казанов В.В., Казанова Е.Ю. Пищевой режим агрочернозема Канской лесостепи при возделывании ярового рапса на маслосемена // АгроЭкоИнфо. 2022. № 3 (51).
14. Пехота А.П. Поступление элементов питания с соломой зерновых и зернобобовых культур в дерново-подзолистую супесчаную почву в зависимости от системы удобрения // Почвовед. и агрохим. 2014. № 2. С. 179–185.

Dynamics of the Content of Nutrients in Agrochernozem during the Cultivation of Ginger Seed

N. L. Kurachenko^{a, #}, O. A. Ulyanova^a, O. A. Vlasenko^a, V. V. Kazanov^a, and E. Yu. Kazanova^a

^aKrasnoyarsk State Agrarian University
prosp. Mira 90, Krasnoyarsk 660049, Russia

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

In the field experiment, the food regime of agrochernozem was studied during the cultivation of the seed ginger (*Camelina sativa* (L.) Crantz) in the conditions of the Kansk forest-steppe of the Krasnoyarsk Territory. The predominant absorption and removal of nitrate nitrogen and exchangeable potassium by the culture determined the low availability of 0–40 cm of mineral nitrogen in the soil layer (5–6 mg/kg) while maintaining an average and very high availability of exchangeable potassium (87–158 mg/kg). It is shown that the largest share of the return to the soil after harvesting the ginger was accounted for by N and P (50–37%). With root and crop residues, nitrogen – 70, phosphorus – 19 and potassium – 51 kg/ha were returned to the soil. Agrochernozems of the Kansk forest-steppe, without additional fertilization, are able to provide a sufficient level of phosphorus and potassium nutrition in ginger crops.

Keywords: agrochernozem, seed ginger, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, mobile phosphorus, exchangeable potassium

УДК 631.416:631.445.25:631.51(470.314)

УДОБРЕНИЕ ОДНОЛЕТНИХ ТРАВ НА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЯ

© 2023 г. В. В. Окорков^{1,*}, Л. А. Окоркова¹, А. Е. Лебедева¹¹Верхневолжский федеральный аграрный научный центр
601261 Владимирская обл., Суздальский р-н, пос. Новый, Россия

*E-mail: okorkovvv@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

В многолетнем стационарном опыте изучены влияние удобрений на урожайность однолетних трав (викоовсяной и горохоовсяной смесей) и нитрифицирующая активность серых лесных почв. За 8 лет как без применения удобрений, так и с ними, урожайность трав изменялась в 1.72–1.88 раза. Установлено, что применение азота минеральных удобрений обеспечивало 88.3% общей вариации их урожайности, последствие навоза – 8.1, последствие РК удобрений – 1.8%. За 7 лет из 8-ми выявлена высокая степень взаимосвязи урожайности трав с запасами N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов трав. При этом минимальные запасы N-NO₃ формировались при гидротермическом коэффициенте за вегетационный период, равном 1.21. Применение удобрений, повышение влажности и температур в течение вегетации трав вели к росту нитрификационной активности серой лесной почвы. Предложено оценивать участие подвижных форм азота в питании растений по отношению содержания N-NO₃ в почве к содержанию N-NH₄ в водной вытяжке (1 : 1). Величины этого параметра в фазах всходов и уборки трав подтвердили определяющую роль запасов N-NO₃ в питании однолетних трав. Рассчитаны разностные коэффициенты использования азота N_{aa} в дозах N60 и N75, которые варьировали от 40 до 49%. Предложен алгоритм расчета размеров накопления N-NO₃ за вегетационный период трав. В удобренных азотом вариантах установлено хорошее совпадение коэффициентов использования накапливающихся запасов N-NO₃ с разностными.

Ключевые слова: серые лесные почвы, Владимирское ополье, урожайность, запасы нитратного и аммонийного азота, степень перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу, вынос N травами, отношение содержаний N-NO₃ и N-NH₄ в жидкой фазе почвы.

DOI: 10.31857/S0002188123100113, EDN: GHCXCP

ВВЕДЕНИЕ

Однолетние травы (викоовсяная и горохоовсяная смеси) в Нечерноземной зоне РФ являются важнейшим предшественником озимых и яровых культур, повышают чистоту полей и обеспеченность влагой, улучшают питание зерновых азотом [1]. В то же время нет однозначного мнения об удобрении этих культур. На серых лесных почвах Владимирского ополья в 1-й и 2-й ротациях 8-польного зернотравянопропашного севооборота удобрение однолетних трав полным минеральным удобрением (N40P40K40 и N80P80K80) по сравнению с одними азотными удобрениями слабо повышало их урожайность и заметно снижало их окупаемость [2]. Поэтому в 3-й и 4-й ротациях этого опыта взамен доз NPK применяли лишь дозы N60 и N75 в виде аммиачной селитры. Изучение их эффективности и было одной из целей работы.

Другая цель работы – на серых лесных почвах Ополья оценить роль нитратного и аммонийного азота в питании викоовсяной (горохоовсяной) смеси, т.к. в настоящее время, основываясь на опытах в водных культурах, распространено мнение о равноценности аммонийной и нитратной форм азота в питании растений [3]. Однако следует учитывать, что в почве нитратный азот полностью находится в жидкой фазе (почвенном растворе), а аммонийный – частично. Степень перехода N-NH₄ почвы в ее жидкую фазу зависит от свойств ППК и уровня применения удобрений [4–7].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 7-польном севообороте: занятый пар–яровая пшеница–овес с подсевом многолетних трав (клевер + тимофеев-

Таблица 1. Урожайность викоовсяной (горохоовсяной) смеси за годы исследования, ц з.е./га

Вариант	2007	2008	2009	2014	2015	2016	2021	2022	Среднее
1. Контроль	18.2	24.3	26.1	15.9	19.1	19.0	20.2	15.1	19.7
2. Известкование	19.2	24.2	24.5	16.3	18.7	22.1	19.5	15.9	20.0
3. РК – последствие	18.1	27.5	25.6	17.2	19.6	27.5	23.0	17.3	22.0
4. N60	23.0	32.1	32.5	21.1	24.6	30.6	21.2	18.2	25.4
5. N75	24.1	32.2	36.3	21.1	24.5	31.4	24.1	19.3	26.6
6. Навоз 40 т/га (Нав40) – последствие	19.7	27.2	24.3	17.8	19.0	26.3	21.9	18.1	21.8
7. Нав60 – последствие	18.5	25.0	24.9	18.6	20.7	26.8	23.6	18.2	22.0
8. Нав80 – последствие	19.6	26.8	24.4	18.9	20.3	28.3	23.3	18.9	22.6
9. Нав40 + РК – последствие	19.8	24.1	26.3	17.7	20.1	27.7	24.9	17.6	22.3
10. Нав40 + N60	23.5	31.6	31.7	21.1	24.8	29.4	25.4	20.4	26.0
11. Нав40 + N75	24.9	31.7	35.4	21.4	26.5	32.5	24.7	20.5	27.2
12. Нав60 + РК – последствие	19.7	26.0	26.3	19.9	20.1	25.0	26.1	18.5	22.7
13. Нав60 + N60	23.0	31.3	32.4	21.2	25.4	31.8	26.6	19.8	26.4
14. Нав60 + N75	26.0	36.5	37.2	22.2	25.2	33.0	25.6	20.7	28.3
15. Нав80 + РК – последствие	21.5	27.2	26.2	20.7	20.1	26.6	24.9	18.7	23.2
16. Нав80 + N60	25.4	32.6	33.3	21.7	24.2	33.3	26.2	20.3	27.1
17. Нав80 + N75	25.7	34.0	35.7	21.4	26.8	33.3	26.7	21.5	28.1
<i>HCP</i> ₀₅	2.0	4.2	2.8	1.6	2.0	2.6	3.2	1.1	2.4
Точность опыта, %	3.3	5.1	3.4	2.9	3.2	3.3	4.8	2.0	3.5

Примечание. Нав – навоз. То же в табл. 2–14.

ка) – травы 1-го года пользования–травы 2-го года пользования–яровая пшеница–ячмень на викоовсяной (горохоовсяной) смеси в 3–5-й ротациях. Стационарный опыт был заложен в 1991–1993 гг. в 3-х закладках (полях) [2, 4].

Почва опытных полей – серая лесная среднесуглинистая со следующей исходной характеристикой пахотного слоя: содержание гумуса – 2.6–3.7%. pH_{KCl} 5.1–5.5 ед., гидролитическая кислотность (H_T) – 3.2–3.5, сумма поглощенных оснований – 19.4–22.4 мг-экв/100 г, содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) – 130–200, обменного калия (по Масловой) – 150–180 мг/кг почвы.

В начале 1-й ротации было проведено известкование по полной гидролитической кислотности. На его фоне изучали влияние различных доз подстилочного навоза КРС (0, 40, 60 и 80 т/га), который вносили после уборки однолетних трав на сено, и влияние ежегодного применения минеральных удобрений (0, РК, NPK, 2NPK), их сочетания на урожайность полевых культур, изменение агрохимических свойств серой лесной почвы. Во 2–5 ротациях вели исследование

последствия известкования. Схема применения удобрений под травы приведена в табл. 1. В качестве минеральных удобрений использовали N_{aa} , которую вносили под предпосевную культувацию.

Агрохимические анализы почвы выполняли по методикам, изложенным в работе [8]. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ STAT VIUA и EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и 2 представлены данные влияния удобрений на урожайность однолетних трав за 8 опыто-лет. В зависимости от погодных условий урожайность трав без применения удобрений изменялась по годам исследования в 1.72 раза, с удобрениями – в 1.88 раза. Результаты исследования свидетельствовали об определяющей роли азотных минеральных удобрений на их урожайность. Получены достоверные прибавки и от последствия навоза КРС, внесенного в дозах 60 и

Таблица 2. Влияние удобрений на среднюю урожайность однолетних трав при последствии известкования за 8 опыто-лет, ц з.е./га (контроль – 19.7 ц з.е./га)

Последствие доз навоза, т/га	Применение минеральных удобрений				Среднее (навоз), $HCP_{05} = 1.2$ ц з.е./га
	0	последствие РК	N60	N75	
0	20.0	22.0	25.4	26.6	23.5
40	21.8	22.3	26.0	27.2	24.3
60	22.0	22.7	26.4	28.3	24.8
80	22.6	23.2	27.1	28.1	25.2
Среднее (минеральные удобрения), $HCP_{05} = 1.2$ ц з.е./га	21.6	22.6	26.2	27.6	

Таблица 3. Математические зависимости влияния удобрений на урожайность однолетних трав (среднее за 8 опыто-лет (Y , ц з.е./га))

Модели взаимосвязи	Уравнение взаимосвязи, $n = 17$	R^2
1	$Y = 20.5 + 0.025x_1 + 0.060x_2 + 0.021x_3$	0.982
2	$Y = 20.8 + 0.0256x_1 + 0.0737x_2$	0.964
3	$Y = 21.8 + 0.0755x_2$	0.883

Примечание. x_1 – последствие доз навоза, т/га, x_2 – действие доз азота NH_4NO_3 , x_3 – последствие РК-удобрений в расчете на P_2O_5 , кг/га.

80 т/га, отсутствие их для последствия РК-удобрений.

Математические зависимости по влиянию удобрений на урожайность однолетних трав в среднем за годы исследования (табл. 3) показали, что применение азота минеральных удобрений обеспечивало 88.3% общей вариации урожайности трав, последствие навоза – 8.1, последствие РК-удобрений – 1.8%.

1 кг азота аммиачной селитры в дозе N60 обеспечивал увеличение урожайности однолетних трав на 9.0 кг з.е., а по последствию навоза в дозах 40, 60 и 80 т/га – соответственно на 10.0, 10.7 и 11.8 кг з.е. Соответствующие показатели при применении N75 составили: 8.8, 9.6, 11.1 и 10.8 кг з.е. Они были близкими для обеих доз азота в форме NH_4NO_3 .

Следовательно, урожайность однолетних трав должна определяться содержанием и запасами в почве подвижных форм азота, т.к. последствие навоза в первую очередь влияло на их изменение.

В табл. 4 представлены данные о запасах $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации однолетних трав. Они резко возрастали при непосредственном применении аммиачной се-

литры. В работе [4] было установлено, что средняя продуктивность 8- и 7-польных севооборотов по степенной или гиперболической зависимостям возрастала с повышением запасов $N-NO_3$ в указанном слое, формирующихся именно в 1-й ранний срок наблюдений.

Проведенное изучение взаимосвязи урожайности однолетних трав с запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы в 1-й срок наблюдений также подтвердило их определяющую роль в повышении продуктивности трав (табл. 5). Очень высокая степень взаимосвязи ($R^2 > 0.80$) между указанными параметрами установлена в 3-й ротации 7-польного севооборота (2007–2009 гг.), когда величина гидротермического коэффициента по Селянинову была >1.05 , а также в 4-й ротации в 2015 г. при ГТК = 1.34. В 2021 г. в отсутствие осадков в критические периоды вегетации трав и близкой их урожайности при внесении азота и последствии навоза и РК-удобрений она была слабой, в остальные годы – на уровне высокой (>0.60 , но <0.80).

Максимальные запасы $N-NO_3$ в фазе всходов культур (Z_{max} , кг/га) зависели от погодных условий. Установлено, что они по квадратичной зави-

Таблица 4. Влияние удобрений на запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов под викоовсяной (горохо-овсяной) смесью в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	60.5	30.9	61.0	52.5	35.8	37.1	64.9	45.9	48.6
2. Известкование	53.1	46.8	43.1	63.6	52.6	37.9	81.8	45.4	53.0
3. Известкование	51.4	38.2	41.6	62.9	46.4	41.1	87.3	44.3	51.6
4. N60	92.8	171	120	119	134	82.2	148	229	137
5. N75	118	249	143	137	153	158	172	241	172
6. Навоз 40 т/га	54.8	32.7	54.3	52.6	43.6	40.1	57.8	54.6	48.8
7. Навоз 60 т/га	50.7	45.1	53.2	59.0	74.2	48.5	77.2	57.4	52.5
8. Навоз 80 т/га	54.3	42.5	47.9	46.1	53.8	42.7	56.5	73.9	52.2
9. Навоз 40 т/га	44.8	28.2	54.4	58.4	78.0	40.4	57.5	79.6	55.2
10. Нав40 + N60	120	191	109	106	134	110	145	207	140
11. Нав40 + N75	144	278	149	157	166	178	177	226	184
12. Нав60	70.1	39.6	62.7	85.8	52.0	38.6	82.4	76.6	63.5
13. Нав60 + N60	116	179	126	156	129	124	165	185	148
14. Нав60 + N75	128	245	191	216	166	166	176	204	186
15. Нав80	64.7	43.5	52.0	88.9	70.4	44.9	94.6	61.3	65.0
16. Нав80 + N60	113	226	118	138	134	129	161	186	151
17. Нав80 + N75	156	264	172	189	177	170	200	257	198
Среднее	87.8	126	94.0	105	100	87.6	118	134	106

Таблица 5. Взаимосвязь урожайности викоовсяной (горохоовсяной) смеси (ц з.е./га) с запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы в фазе всходов (Z, кг/га)

Год исследования	Уравнение взаимосвязи, n = 17	R ²	X = Z, уменьшенным на (кг/га)	Максимальная величина Z	ГТК
2007	$Y = 18.3 + 0.071x$	0.867	40	156	1.05
2008	$Y = 0.0357x + 25.6$	0.844	30	278	1.92
2009	$Y = 25.1 + 0.064x - 0.0001x^2$	0.866			
	$Y = 23.7x^{0.0568}$	0.746			
	$Y = 0.0949x + 24.5$	0.954	40	191	1.09
2014	$Y = 20.6x^{0.1052}$	0.798			
	$Y = 23.8 + 0.137x - 0.0003x^2$	0.969			
	$Y = 17.7 + 0.032x$	0.693	45	216	0.94
2015	$Y = 17.0 + 0.071x - 0.0003x^2$	0.787			
	$Y = 18.6 + 0.057x$	0.948	35	177	1.34
2016	$Y = 25.3 + 0.060x$	0.677	35	178	1.28
	$Y = 21.7x^{0.0862}$	0.784			
	$Y = 24.6 + 0.136x - 0.0006x^2$	0.731			
2021	Слабая взаимосвязь	<0.30	–	200	1.04
2022	$Y = 15.0x^{0.0564}$	0.718	40	257	0.54
	$Y = 16.8 + 0.043x - 0.0001x^2$	0.658			

Примечание. Z – запасы N-NO₃ в слое почвы 0–40 см, кг/га.

Таблица 6. Влияние удобрений на запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе уборки викоовсяной (горохоовсяной) смеси в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	22.3	19.2	10.6	20.9	20.4	8.1	8.1	29.7	17.4
2. Известкование	28.6	25.4	11.4	32.0	32.6	8.3	18.1	40.1	24.6
3. Известкование	19.7	21.6	11.7	34.5	29.0	6.7	22.6	48.6	24.3
4. N60	61.2	34.8	16.9	55.1	95.4	9.3	14.0	204	61.3
5. N75	74.6	43.6	25.9	49.5	92.8	11.4	52.7	260	76.3
6. Навоз 40 т/га	31.6	22.6	9.3	26.9	32.4	8.9	82.4	26.3	30.0
7. Навоз 60 т/га	20.5	28.7	13.6	28.7	38.7	9.3	14.7	25.2	22.4
8. Навоз 80 т/га	29.0	27.2	9.9	20.5	23.2	8.4	24.1	23.9	20.8
9. Навоз 40 т/га	24.1	18.6	8.1	25.0	31.8	11.8	25.2	27.7	21.5
10. Нав40 + N60	62.5	41.6	15.8	42.2	96.5	14.7	22.3	161	57.1
11. Нав40 + N75	58.1	49.4	17.6	43.5	94.3	9.1	63.1	221	69.5
12. Нав60	34.8	25.0	13.1	27.2	28.7	9.8	94.6	31.7	33.1
13. Нав60 + N60	72.0	36.0	23.4	38.7	95.5	8.9	25.7	202	62.8
14. Нав60 + N75	72.8	60.0	36.5	36.7	103	31.4	57.6	218	77.0
15. Нав80	33.4	31.2	12.3	33.6	26.6	9.2	93.8	55.7	37.0
16. Нав80 + N60	50.4	40.1	16.1	51.7	96.8	11.3	18.8	169	56.8
17. Нав80 + N75	72.0	52.6	24.0	58.4	92.5	19.7	55.5	237	76.5
Среднее	45.2	34.0	16.2	36.8	60.6	11.6	40.8	116	45.2

симости изменялись в зависимости от величины ГТК (x):

$$Z_{\max} = 450 - 445.6x + 184.8x^2,$$

$$n = 8, \quad R^2 = 0.860.$$

Минимальная величина параметра Z_{\max} (181 кг N-NO₃/га) отмечена при величине ГТК = 1.21. Рост его >1.21 (повышение увлажненности почвы) и засушливости вегетационного периода (ГТК < 1.21) повышал нитрификационную активность почвы. Резко возрастала она и при применении азота $N_{\text{аа}}$ (табл. 4). К уборке запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы за счет поглощения культурами снижались в 2 раза и более (табл. 6).

Запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в 3-й ротации (2007–2009 гг.) в 1-й срок наблюдений менялись от 95.2 до 276 кг/га, но резко снизились до 35.1–109 кг/га в 4-й ротации (2014–2016 гг.), т.е. в 2.4–2.7 раза (табл. 7). Высокие запасы N-NH₄ в 3-й ротации 7-польного севооборота были следствием избыточного применения азотных и органических удобрений на серых лесных почвах в конце 1980-х–начале 1990-х гг. [4]. В 2021–2022 гг. (5-я ротация) запасы N-NH₄ в 1-й срок наблюдения также увеличились с ростом интенсификации применения удобрений, но не превышали 109 кг/га.

В уборку (табл. 8) в 2007 г. (ГТК = 1.05) запасы N-NH₄ снизились со 145–258 до 67.6–178 кг/га, а в 2008 г. (ГТК = 1.92) они возросли с 95.2–258 до 140–346 кг/га. Достаточно высокое увлажнение в этот срок способствовало росту запасов как аммонийного, так и нитратного азота (табл. 5). В 2009 г. (ГТК = 1.09) в 1-й срок запасы N-NH₄ варьировали от 167 до 276 кг/га, а во 2-й – снизились до 115–164 кг/га.

В 4-й ротации в оба срока наблюдения запасы N-NH₄ были близкими (ГТК менялся от 0.94 до 1.34). В 2021 г. в 5-й ротации при ГТК = 1.04 при крайне неравномерном выпадении осадков в течение вегетации во 2-й срок наблюдения запасы N-NH₄ несколько снижались, а в 2022 г. (ГТК = 0.54) возросли с 28.5–107 до 112–256 кг/га. Как повышенное увлажнение, так и недостаток влаги и высокие температуры способствовали резкому возрастанию трансформации органических и органо-минеральных соединений азота почвы в аммонийную форму. Исходя же из определяющей роли запасов N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов (табл. 5) на урожайность трав, следует заключить, что аммонийный азот почвы в конечном счете трансформировался в нитратную форму, которую преимущественно и потребляли растения.

Таблица 7. Влияние удобрений на запасы N-NH₄ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов викоовсяной (горохоовсяной) смеси в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	167	182	204	39.3	50.6	58.8	69.2	28.5	100
2. Известкование	152	138	212	35.1	56.6	48.1	77.0	34.1	94.0
3. Известкование	145	108	209	51.2	54.0	46.8	74.3	29.4	89.7
4. N60	209	176	216	49.3	66.0	65.9	82.4	88.0	119
5. N75	247	141	178	43.0	76.9	67.0	89.5	73.9	115
6. Навоз 40 т/га	257	196	167	35.7	54.4	60.3	69.3	54.3	112
7. Навоз 60 т/га	245	132	216	35.4	62.7	58.2	91.3	41.0	110
8. Навоз 80 т/га	258	164	175	45.9	54.5	52.0	77.9	42.3	109
9. Навоз 40 т/га	255	162	232	43.0	71.5	60.5	85.0	41.3	119
10. Нав40 + N60	183	169	216	39.5	66.7	73.7	95.0	52.5	112
11. Нав40 + N75	156	219	216	46.0	66.6	64.2	106	52.9	116
12. Нав60	230	177	276	54.1	64.3	54.6	77.7	35.9	121
13. Нав60 + N60	162	188	270	67.1	63.0	63.1	94.5	57.9	121
14. Нав60 + N75	249	165	269	42.3	68.2	65.0	108	80.2	131
15. Нав80	211	95.2	245	41.0	50.3	60.4	93.9	49.5	106
16. Нав80 + N60	166	106	251	36.3	72.1	62.3	102	51.5	106
17. Нав80 + N75	253	258	248	56.2	69.6	58.1	109	107	145
Среднее	208	163	224	44.7	62.8	59.9	88.4	54.1	113

Таблица 8. Влияние удобрений на запасы N-NH₄ в слое 0–40 см в фазе уборки викоовсяной (горохоовсяной) смеси в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	88.6	248	124	49.0	40.7	57.6	58.2	132	99.8
2. Известкование	81.3	192	140	60.2	48.7	61.4	71.5	112	95.8
3. Известкование	67.6	140	134	59.0	47.2	63.2	66.2	159	92.0
4. N60	154	277	158	61.2	46.2	64.4	70.8	144	122
5. N75	152	299	144	72.5	51.8	68.0	79.0	256	140
6. Навоз 40 т/га	112	252	128	54.9	50.7	60.4	57.9	192	113
7. Навоз 60 т/га	117	246	149	52.0	52.0	58.4	72.8	168	114
8. Навоз 80 т/га	123	236	143	57.2	41.6	56.2	60.4	184	121
9. Навоз 40 т/га	148	229	130	61.4	50.0	69.7	65.4	201	119
10. Нав40 + N60	122	290	167	57.2	56.3	65.9	79.5	152	124
11. Нав40 + N75	80.5	279	115	58.2	52.8	68.2	97.6	192	118
12. Нав60	124	292	156	56.8	53.9	65.8	65.2	165	122
13. Нав60 + N60	90.2	334	164	47.0	47.7	67.6	81.8	152	123
14. Нав60 + N75	178	226	157	60.1	58.4	69.2	96.6	150	124
15. Нав80	97.3	346	143	55.5	52.3	63.0	83.6	159	125
16. Нав80 + N60	96.5	333	143	66.3	58.2	73.8	90.6	110	121
17. Нав80 + N75	139	284	148	61.9	51.2	68.8	88.0	200	130
Среднее	116	265	144	58.3	50.6	64.8	75.6	166	118

Таблица 9. Влияние удобрений на содержание аммонийного азота в почве и водной вытяжке 1 : 1 в слоях 0–20 и 20–40 см почвы в 2021 г., мг/100 г почвы

Вариант	Слой, см	1-й срок			2-й срок		
		N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %	N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %
1. Контроль	0–20	1.61	0.0299	1.9	1.04	0.0212	2.0
	20–40	0.95	0.0261	2.8	0.70	0.0106	1.5
2. Известкование (фон)	0–20	1.54	0.0394	2.6	1.23	0.0114	0.9
	20–40	1.25	0.0413	3.3	1.18	0.0104	0.9
3. Фон + РК – последнее действие	0–20	1.45	0.0267	1.8	1.03	0.0238	2.3
	20–40	1.27	0.0386	3.0	1.09	0.0180	1.6
4. Фон + NPK	0–20	1.65	0.0474	2.9	1.15	0.0180	1.6
	20–40	1.37	0.0386	2.8	1.02	0.0116	1.1
5. Фон + 2 NPK	0–20	1.79	0.0655	3.7	1.76	0.0485	2.8
	20–40	1.49	0.0442	3.0	0.79	0.0184	2.3
7. Нав60 – последнее действие	0–20	1.74	0.0386	2.2	1.18	0.0164	1.4
	20–40	1.60	0.0299	1.9	0.82	0.0128	1.6
12. Нав60 + РК – последнее действие	0–20	1.58	0.0735	4.6	0.98	0.0298	3.0
	20–40	1.27	0.0394	3.1	0.95	0.0273	2.9
13. Нав60 + NPK	0–20	2.04	0.0321	1.6	1.31	0.0232	1.8
	20–40	1.44	0.0386	2.7	1.22	0.0147	1.2
14. Нав60 + 2 NPK	0–20	2.10	0.104	5.0	1.92	0.0413	2.2
	20–40	1.86	0.0413	2.2	1.14	0.0368	3.2
Среднее	0–20	1.75	0.0460	2.6	1.30	0.0260	2.0
	20–40	1.44	0.0433	3.0	1.00	0.0180	1.8

В работах [4–7, 9] установлено, что на серых лесных почвах Ополья, характеризующихся высокой емкостью катионного обмена, основное количество N-NH₄ поглощалось почвенным поглощающим комплексом (ППК). Переходящая в жидкую фазу часть его, а также внесенного с удобрениями, нитрифицировалась. Уменьшение концентрации N-NH₄ в жидкой фазе смещало равновесие в сторону пополнения его за счет десорбции. На степень перехода N-NH₄ в жидкую фазу и трансформацию его в нитратную форму влияли содержание гумуса, рН_{KCl} почвы, емкость ее катионного обмена. Образовавшийся N-NO₃, полностью находящийся в жидкой фазе почвы, в основном участвовал в питании азотом возделываемых культур. Поэтому об участии N-NO₃ в питании растений нами было предложено судить по отношению содержания N-NO₃ в почве к содержанию N-NH₄ в водной вытяжке (1 : 1), определяемому с помощью ионоселективного электрода на ионы NH₄⁺.

В табл. 9 и 10 приведены данные по содержанию N-NH₄ в почве (солевая вытяжка) и водной вытяжке (1 : 1) в зависимости от примененных

удобрений в слоях 0–20 и 20–40 см почвы в фазах всходов и уборки.

Видно, что в фазе всходов культур в 2021 г. степень перехода N-NH₄ в жидкую фазу (W, %; водную вытяжку 1 : 1) в зависимости от уровня применения удобрений и глубины отбора образцов варьировала от 1.5 до 5.0%. Степень перехода (W) возрастала с повышением содержания N-NH₄ в почве и в среднем в 17-ти вариантах была более высокой в слоях 20–40 см почвы, чем в слоях 0–20 см, что совпадало с более высокой увлажненностью нижних слоев. В фазе уборки средние запасы N-NH₄ в слое 0–40 см снизились примерно на 16% (табл. 7 и 8), в большей мере происходило снижение степени перехода N-NH₄ в жидкую фазу в удобренных азотом вариантах и при последствии органических удобрений. В среднем в 17-ти вариантах уменьшилась и средняя концентрация N-NH₄ в жидкой фазе: с 0.0433–0.0466 до 0.0180–0.0260 мг/100 г почвы.

В 2022 г. степень перехода N-NH₄ в жидкую фазу в 1-й срок наблюдения в слое 0–40 см почвы варьировала от 1.0 до 5.9%, возрастала с уровнем интенсификации. В среднем в 17-ти вариантах

Таблица 10. Влияние удобрений на содержание аммонийного азота в почве и водной вытяжке 1 : 1 в слоях 0–20 и 20–40 см почвы в 2022 г., мг/100 г почвы

Вариант	Слой, см	1-й срок			2-й срок		
		N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %	N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %
1. Контроль	0–20	0.55	0.0132	2.4	1.41	0.0168	1.2
	20–40	0.50	0.0125	2.5	3.32	0.0143	0.4
2. Известкование (фон)	0–20	0.68	0.0153	2.2	2.09	0.0104	0.5
	20–40	0.57	0.0125	2.2	2.00	0.0073	0.4
3. Фон + РК – последствие	0–20	0.60	0.0164	2.7	2.82	0.0147	0.5
	20–40	0.48	0.0097	2.0	2.90	0.0062	0.2
4. Фон + NPK	0–20	2.41	0.143	5.9	4.04	0.111	2.8
	20–40	0.88	0.0321	3.6	1.36	0.0150	1.1
5. Фон + 2 NPK	0–20	2.19	0.112	5.1	5.75	0.161	2.8
	20–40	0.59	0.0101	1.7	3.68	0.0150	0.4
7. Нав60 – последствие	0–20	0.87	0.0180	2.1	3.60	0.0299	0.8
	20–40	0.64	0.0067	1.0	2.58	0.0119	0.5
12. Нав60 + РК – последствие	0–20	0.54	0.0261	4.8	2.94	0.0314	1.1
	20–40	0.76	0.0314	4.1	3.08	0.0161	0.5
13. Нав60 + NPK	0–20	1.55	0.0557	3.6	2.36	0.0433	1.8
	20–40	0.61	0.0161	2.6	3.14	0.0131	0.4
14. Нав60 + 2 NPK	0–20	2.19	0.140	6.4	3.56	0.0990	2.8
	20–40	0.81	0.0147	1.8	1.98	0.0168	0.8
Среднее	0–20	1.18	0.0465	3.9	3.34	0.0451	1.4
	20–40	0.70	0.0171	2.4	2.68	0.0161	0.6

она была более высокой в слое 0–20 см, чем в слое 20–40 см. Средние запасы N-NH₄ в жидкой фазе в слое 0–20 см почвы составили 0.0465, в слое 20–40 см – 0.0171 мг/100 г почвы. Во 2-й срок наблюдения они оказались близкими (0.0451 и 0.0161 мг/100 г почвы). При этом средние запасы N-NH₄ в почве в слое 0–40 см возросли примерно в 3 раза (с 54.1 до 166 кг/га) (табл. 7, 8). Но в условиях острого дефицита влаги и повышенных температур в мае и июне наблюдали высокое снижение степени перехода N-NH₄ почвы в жидкую фазу.

На основании данных содержания нитратов в слоях 0–20 и 20–40 см почвы и содержанию в них N-NH₄ в жидкой фазе (табл. 9 и 10) для 2021 и 2022 гг. в табл. 11 представлены данные их соотношения.

В фазе всходов в слое 0–20 см в 2021 г. средняя величина этого параметра составила 60.4, в 2022 г. – 64.2. В этом случае доля N-NH₄ в жидкой фазе почвы от суммы N-NO₃ и N-NH₄ в ней составляла соответственно 1.6 [100 : (60.4 + 1)] и 1.5% [100 : (64.2 + 1)]. Следовательно, в питании культур преимущественно участвовал N-NO₃ (на 98.4 и 98.5% соответственно). Низкие средние величи-

ны доли N-NH₄ в жидкой фазе почвы установлены и в слое 20–40 см в 2021 и 2022 г. в фазах всходов (3.1 и 1.1%) и уборки в обоих слоях (<2.4%).

Средний разностный коэффициент использования (КИ) применения дозы N60 за 8 опыто-лет составил 46.2%, по последствию навоза 40–80 т/га – 40.0–(40–44.5)%, дозы N75 – соответственно 48.9 и 41.3–47.6% (табл. 12). На серых лесных почвах Ополья как по окупаемости удобрений прибавкой (9.0–11.8 кг/кг N при дозе N60 и 8.8–11.1 кг/кг N при дозе N75), так и коэффициентам использования, применение доз N60 и N75 было в одинаковой мере эффективным приемом.

Так как урожайность трав определялась преимущественно их питанием нитратной формой азота, то была проведена оценка накопления этой формы азота в течение вегетационного периода культур.

Общие размеры нитрификационной способности почвы под травами за вегетационный период можно рассчитать по сумме выноса азота урожаем (сено и пожнивно-корневые остатки) и остаточным количеством азота нитратов в слое 0–40 см почвы в фазе уборки. По данным работы

Таблица 11. Соотношение N-NO₃ к N-NH₄ в жидкой фазе серой лесной почвы в зависимости от уровня интенсификации применения удобрений под однолетними травами

Вариант	Горизонт, см	Соотношение N-NO ₃ : N-NH ₄ в жидкой фазе			
		2021 г.		2022 г.	
		всходы	уборка	всходы	уборка
1. Контроль	0–20	50.5	16.5	81.1	35.7
	20–40	34.1	29.2	50.4	34.3
2. Известкование (фон)	0–20	42.1	43.8	69.9	77.9
	20–40	29.1	46.2	48.8	90.4
3. Фон + РК – последствие	0–20	69.7	12.2	64.0	98.0
	20–40	35.0	12.2	60.8	62.9
4. Фон + NPK	0–20	65.2	60.5	40.2	60.8
	20–40	34.2	111	86.0	65.3
5. Фон + 2 NPK	0–20	71.4	71.5	54.7	58.1
	20–40	39.4	70.1	180	38.0
7. Нав60 – последствие	0–20	56.7	16.5	83.9	18.1
	20–40	46.2	16.4	94.0	32.8
12. Нав60 + РК – последствие	0–20	13.7	16.8	71.3	26.4
	20–40	32.7	16.1	31.2	21.7
13. Нав60 + NPK	0–20	149	58.2	90.0	113
	20–40	37.3	53.1	118	196
14. Нав60 + 2 NPK	0–20	46.1	59.6	45.0	75.9
	20–40	38.2	50.5	95.9	46.4
Среднее (17 вариантов)	0–20	60.4	40.0	64.2	64.2
	20–40	31.6	41.4	89.0	73.3
Доля N-NH ₄ в жидкой фазе от суммы N-NH ₄ и N-NO ₃ , % (17 вариантов)	0–20	1.6	2.4	1.5	1.5
	20–40	3.1	2.4	1.1	1.3

[10], исходя из связи урожайности сена с размерами накопления пожнивно-корневых остатков (при условии близкого содержания в них азота), определили вынос азота сеном и пожнивно-корневыми остатками и общие размеры накопления N-NO₃ (табл. 13). По разнице между ними и запасами N-NO₃ в слое 0–40 см в фазе всходов оценивали прирост запасов N-NO₃ от всходов до уборки культур.

Общие размеры накопления N-NO₃ по сравнению с контролем и фоном известкования возрастали при применении азотных минеральных удобрений на 75–105 кг/га, их сочетания с последствием навоза – на 80–120, последствие органических – 20–30, сочетания последствие органических с РК-удобрениями – 25–40 кг/га.

Прирост запасов N-NO₃ от всходов до уборки трав был наиболее высоким в вариантах без применения минеральных удобрений (146 кг/га) и

при последствии фосфорно-калийных удобрений (150 кг/га) (табл. 14). Последствие органических удобрений повышало этот параметр, а действие минерального азота резко снижало его. Последнее было обусловлено его резким повышающим действием на нитрификационную активность почвы в ранний весенне-летний период (до всходов культур).

По соотношению выноса азота сеном и общего размера накопления N-NO₃ рассчитывали КИ накопленных за вегетацию запасов N-NO₃. Сравнение их с разностными КИ (табл. 12) в вариантах с внесением азотных минеральных удобрений показало их хорошее совпадение. По этим данным КИ накопленного за вегетацию культур N-NO₃ варьировали от 43 до 50%, а разностные КИ азота минеральных удобрений – от 40 до 49% (табл. 12, 13).

Следовательно, серые лесные почвы Ополя характеризуются высокой нитрификационной

Таблица 12. Вынос азота сеном викоовсяной (горохоовсяной) смеси (кг/га) и средний разностный коэффициент использования азота минеральных удобрений (КИ, %)

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее	КИ
1. Контроль	67.2	93.5	95.8	84.6	89.9	74.6	100	82.2	86.0	—
2. Известкование	71.5	94.8	90.0	91.4	87.0	78.2	100	85.2	87.3	—
3. Известкование	68.4	112	96.0	85.2	97.0	95.7	111	90.3	94.4	—
4. N60	93.7	118	119	132	129	108	118	102	115	46.2
5. N75	102	128	148	125	134	108	138	107	124	48.9
6. Навоз 40 т/га	73.5	102	93.0	98.6	92.2	88.9	118	96.3	95.3	—
7. Навоз 60 т/га	70.8	102	101	105	105	91.7	124	100	100	—
8. Навоз 80 т/га	76.1	109	95.2	106	103	94.5	117	115	102	—
9. Навоз 40 т/га	76.2	98.9	101	93.9	99.6	95.8	129	101	99.4	—
10. Нав40 + N60	101	121	129	124	130	112	143	117	122	44.5
11. Нав40 + N75	109	130	142	132	144	123	141	124	131	47.6
12. Нав60	78.2	108	98.7	114	101	80.8	136	102	102	—
13. Нав60 + N60	95.6	120	133	134	135	111	146	117	124	40.0
14. Нав60 + N75	112	145	152	140	137	109	138	114	131	41.3
15. Нав80	81.6	111	98.2	114	92.0	86.2	129	104	102	—
16. Нав80 + N60	111	126	134	130	132	117	146	113	126	40.0
17. Нав80 + N75	120	136	151	132	147	115	146	120	133	41.3
Среднее	88.7	115	116	114	115	99.4	128	105	110	

Таблица 13. Средние за 8 опыто-лет размеры накопления (кг/га) и использования N-NO₃ за вегетационный период однолетних трав (%)

Вариант	Вынос N травами		Запасы N-NO ₃ в фазе уборки (слой 0–40 см)	Общие размеры накопления N-NO ₃	Запасы N-NO ₃ в фазе всходов	Прирост запасов N-NO ₃ от всходов до уборки	КИ _{N-NO₃}
	надземная масса (сено)	сено + пожнивно-корневые остатки					
1. Контроль	86.0	155	17.4	172	48.6	123	50.0
2. Известкование	87.3	157	24.6	182	53.0	129	48.0
3. Известкование	94.4	170	24.3	194	51.6	142	48.7
4. N60	115	196	61.3	257	137	120	44.8
5. N75	124	211	76.3	287	172	115	43.2
6. Навоз 40 т/га	95.3	172	30.0	202	48.8	153	47.1
7. Навоз 60 т/га	100	180	22.4	202	52.5	150	49.5
8. Навоз 80 т/га	102	184	20.8	205	52.2	153	49.8
9. Навоз 40 т/га	99.4	179	21.5	201	55.2	146	49.4
10. Нав40 + N60	122	207	57.1	264	140	124	46.2
11. Нав40 + N75	131	223	69.5	293	184	109	44.7
12. Нав60	102	184	33.1	217	63.5	154	47.0
13. Нав60 + N60	124	211	62.8	274	148	126	45.2
14. Нав60 + N75	131	223	77.0	300	186	114	43.7
15. Нав80	102	184	37.0	221	65.0	156	46.2
16. Нав80 + N60	126	214	56.8	271	151	120	46.5
17. Нав80 + N75	133	226	76.5	302	198	104	44.0

Таблица 14. Влияние удобрений на прирост запасов N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в период от всходов до уборки трав, кг/га

Последствие доз навоза, т/га	Применение минеральных удобрений				Среднее (навоз)
	0	последствие РК	N60	N75	
0	129	142	120	115	126
40	153	146	124	109	133
60	150	154	126	114	136
80	153	156	120	104	133
Среднее (минеральные удобрения)	146	150	122	110	

Примечание. Прирост запасов N-NO₃ в период от всходов до уборки в контроле составил 123 кг/га.

активностью. В среднем за 8 опыто-лет она резко возрастала с повышением уровня применения азота минеральных удобрений в дозе N75 от 170–180 (без удобрений) до 300 кг/га. Продуктивность однолетних трав в большинстве случаев лимитировало отсутствие оптимального увлажнения в ранний весенне-летний период.

ВЫВОДЫ

1. В длительном полевом опыте за 8 опыто-лет урожайность однолетних трав (викоовсяной, горохоовсяной смесей) в контроле изменялась от 15.1 до 26.1 ц з.е./га, при применении доз N60 и N75 – от 18.2 до 37.2 ц з.е./га, т.е. в зависимости от погодных условий варьировала в 1.73–1.88 раза. При этом азот N_{аа} обеспечивал повышение прибавки их урожайности на 88.3% от общей вариации, последствие навоза КРС, внесенного в начале ротации, – на 8.1%, последствие РК-удобрений, примененных под 6 культур 7-польного севооборота, – 1.8%. 1 кг азота N_{аа} в дозах N60 и N75 обеспечивал увеличение урожайности трав на 9.0 и 8.8 кг з.е., при последствии навоза 40–80 т/га – 9.6–11.8 кг з.е.

2. Запасы нитратного азота в слое 0–40 см почвы в фазе всходов трав были максимальными. В вариантах с применением дозы N60 по сравнению с вариантами без удобрений в среднем за 8 лет они возрастали с 49–53 до 137–151 кг/га, дозы N75 – до 172–198 кг/га. К уборке за счет поглощения нитратного азота растениями его запасы в этом слое снижались в 2 раза и более. Запасы N-NH₄ в этом слое в вариантах опыта в фазах всходов и уборки трав были близкими. В удобренных вариантах по сравнению с неудобренными они увеличивались всего в 1.4–1.6 раза.

3. За 7 лет из 8-ми установлена высокая степень взаимосвязи урожайности трав с запасами

N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов. Наблюдалась линейную, квадратичную и степенную взаимосвязи. Полученные результаты свидетельствовали об определяющей роли нитратного азота в питании трав азотом.

4. За 8 лет, исходя из достоверной квадратичной взаимосвязи максимальных запасов N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов культур с гидротермическим коэффициентом (ГТК), установлена минимальная нитрификационная активность почвы при ГТК = 1.21. Повышение количества выпавших осадков, с одной стороны, так и температур в течение вегетационного периода, с другой, вело к увеличению запасов N-NO₃ в почве.

5. На серых лесных почвах Ополя, характеризующихся высокой емкостью катионного обмена, степень перехода N-NH₄ почвы в жидкую фазу (водную вытяжку 1 : 1) в 2021 г. не превышала 5.0, в 2022 г. – 5.9%. Она возрастала при применении азотных минеральных удобрений, изменялась от сроков (всходы, уборка) и глубины отбора (слои 0–20 и 20–40 см) образцов. Это вело к изменению содержания N-NH₄ в жидкой фазе почвы.

6. Предложено оценивать участие подвижных форм азота в питании возделываемых культур по величине соотношения содержания N-NO₃ в почве к содержанию N-NH₄ в водной вытяжке (1 : 1), т.к. нитратный азот полностью находится в жидкой фазе, а аммонийный азот почвы – частично. Указанное соотношение в 2021–2022 гг. варьировало от 12.2 до 184. Для этих величин доля N-NH₄ в жидкой фазе от суммы нитратного и аммонийного азота составляла соответственно 7.6 и 0.54%. Это подтвердило определяющую роль N-NO₃ в питании трав азотом.

7. Средние за 8 опыто-лет разностные коэффициенты использования (КИ) доз азотных удобрений составляли 40–49%, снижаясь с ростом уров-

ня применения удобрений. Величины разностных КИ азота N_{aa} достаточно хорошо совпадали с КИ накапливающегося $N-NO_3$ в течение вегетационного периода трав. Они варьировали от 43.2 до 50.0%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов А.Ф., Гатаулин А.М., Платонов И.Г. Системы земледелия / Под ред. Сафонова А.Ф. М.: КолосС, 2006. 447 с.
2. Окорков В.В. Удобрения и плодородие серых лесных почв Владимирского ополья. Владимир: ВООО ВОИ, 2006. 356 с.
3. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П. Агрохимия: Классич. универ. учеб-к для стран СНГ / Под ред. Минеева В.Г. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
4. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Серые лесные почвы Владимирского ополья и эффективность использования их ресурсного потенциала. Иваново: ПресСто, 2021. 188 с.
5. О влиянии удобрений, гумуса и физико-химических свойств серых лесных почв Ополья на подвижные формы азота // Владимир. земледелец. 2022. № 4. С. 22–31.
<https://doi.org/10.24412/2225-2584-2022-4-22-31>
6. Окорков В.В., Окоркова Л.А. Удобрения и питание азотом яровой пшеницы на серых лесных почвах // Агрохим. вестн. 2023. № 1. С. 35–42.
7. Окорков В.В., Шукин И.М., Окоркова Л.А., Шукина В.И., Козлов А.А. Изменение содержания подвижных форм азота в серых лесных почвах Ополья под влиянием ландшафтных особенностей агротехнологий // Агрохимия. 2023. № 1. С. 13–24.
8. Ягодин Б.А., Дерюгин И.П., Жуков Ю.П. Практикум по агрохимии / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
9. Окорков В.В., Окоркова Л.А. О влиянии удобрений, гумуса и физико-химических свойств серых лесных почв Ополья на подвижные формы азота // Владимирский. земледелец. 2022. № 4. С. 22–31.
10. Попов П.Д., Хохлов В.И., Егоров А.А. Органические удобрения: Справ-к. М.: Агропромиздат, 1988. 207 с.

Fertilization of Annual Grasses on Gray Forest Soils of the Vladimir Opole

V. V. Okorkov^{a,#}, L. A. Okorkova^a, and A. E. Lebedeva^a

^aVerkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center
d. Novaya, Vladimir region, Suzdal district 601261, Russia

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

In a long-term stationary experiment, the effect of fertilizers on the yield of annual grasses (vetch and pea mixtures) and the nitrifying activity of gray forest soils were studied. For 8 years, both without the use of fertilizers and with them, the yield of herbs changed by 1.72–1.88 times. It was found that the use of nitrogen of mineral fertilizers provided 88.3% of the total variation in their yield, the aftereffect of manure – 8.1, the aftereffect of PK fertilizers – 1.8%. For 7 out of 8 years, a high degree of correlation between the yield of grasses and the reserves of $N-NO_3$ in the 0–40 cm layer of soil in the phase of grass germination was revealed. At the same time, the minimum reserves of $N-NO_3$ were formed at a hydrothermal coefficient for the growing season equal to 1.21. The use of fertilizers, increased moisture content and temperatures during the growing season of grasses led to an increase in the nitrification activity of gray forest soil. It is proposed to evaluate the participation of mobile forms of nitrogen in plant nutrition in relation to the content of $N-NO_3$ in the soil to the content of $N-NH_4$ in the water extract (1 : 1). The values of this parameter in the phases of germination and harvesting of grasses confirmed the determining role of $N-NO_3$ reserves in the nutrition of annual grasses. The difference coefficients of the use of nitrogen N_{aa} in doses N60 and N75, which ranged from 40 to 49%, were calculated. An algorithm for calculating the size of the accumulation of $N-NO_3$ during the growing season of grasses is proposed. In nitrogen-fertilized variants, a good coincidence of the utilization coefficients of accumulating $N-NO_3$ reserves with the difference ones has been established.

Keywords: gray forest soils, Vladimir Opole, yield, nitrate and ammonium nitrogen reserves, the degree of transition of ammonium nitrogen of the soil to the liquid phase, removal of N by grasses, the ratio of $N-NO_3$ and $N-NH_4$ contents in the liquid phase of the soil.

УДК 631.82:631.871:631.41:631.559:633.521:631.582

ВЛИЯНИЕ ЗЕЛЕНОГО И МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВЫ И УРОЖАЙНОСТЬ ЛЬНОПРОДУКЦИИ В СЕВОБОРОТАХ С КОРОТКОЙ РОТАЦИЕЙ[§]

© 2023 г. Т. П. Сухопалова

Федеральный научный центр лубяных культур
170041 Тверь, Комсомольский просп., 17/56, Россия

E-mail: info.trk@fncl.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

В Центральном районе Нечерноземной зоны РФ на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с высоким содержанием фосфора изучали 4-польные севообороты с короткой ротацией, с возделыванием льна долгунца. Рассмотрены результаты изменений агрохимических показателей почвы и повышения урожайности льнопродукции при посеве льна-долгунца после новых предшественников, с использованием на удобрение зеленой массы поукосного посева горчицы белой, с учетом внесенных минеральных удобрений под культуры севооборотов. Отмечено положительное влияние биофунгицида Стернифага после уборки ячменя на урожайность льнопродукции. Установлено, что наибольшая урожайность льнотресты получена после предшественника горчицы белой на зеленый корм с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение в количестве 5.3 т/га, льносемян — 1 т/га, всего и трепаного льноволокна — 1.7 и 1.8 т/га с высокими показателями качества льнотресты, соответствовавшими номеру 2.5. Показано, что с помощью почвенного биофунгицида Стернифага (действующее вещество — споры гриба *Trichoderma harziannum* ВИЗР-18, титр 10^{10} КОЕ/г), предназначенного для разложения растительных остатков и подавления почвенных фитопатогенов, можно оздоровить почву. В севообороте, где высевали викоовсяную смесь на зеленый корм с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение урожайность тресты увеличилась на 0.5 т/га и составила 2.2 т/га, всего волокна — на 0.1, трепаного — на 0.2 т/га, улучшалось и качество тресты на 0.5 номера, повышалась продуктивность севооборота на 13% после предшественника ячменя с использованием биофунгицида по сравнению с севооборотом, где повторно 3 года подряд высевали лен-долгунец.

Ключевые слова: лен-долгунец (*Linum usitatissimum*), севооборот, короткая ротация, предшественник, промежуточная культура, зеленое удобрение, минеральное удобрение, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188123100137, **EDN:** LHCFFPM

ВВЕДЕНИЕ

Лен-долгунец рекомендовали высевать в 7–8-польных севооборотах с одним полем льна. При этом наблюдали эффективное снижение патогенной микрофлоры. Систематическое применение повышенных доз минеральных удобрений в севообороте способствовало накоплению в почве подвижных форм фосфора, калия, позволяло добиться повышения содержания гумуса в почве. Возделывание льна-долгунца после многолетних трав 1-го года пользования с повышенной дозой минеральных удобрений под его посев по ин-

тенсивной технологии позволяет разместить в 7-польном севообороте 2 поля со льном-долгунцом, обеспечить увеличение продуктивности севооборота в 2.2 раза [1, 2]. Установлено, что предшественники озимая рожь и овес обладают лучшим фунгистатическим действием [1, 2].

Выявили, что при повышении культуры земледелия ячмень, идущий после пласта многолетних трав, в качестве предшественника льна-долгунца по сравнению с многолетними травами имеет преимущество в снижении засоренности его посевов, что способствует увеличению урожайности льнопродукции [3].

Внесение органических удобрений в льняном севообороте является одним из факторов в сохранении запасов питательных веществ в поч-

[§] Работа выполнена в рамках государственного задания (№ FGSS-2019-0017) по программе Федерального научного центра лубяных культур на 2019–2023 гг. при поддержке Минобрнауки России.

ве. В 7-польном льняном севообороте с одним полем льна-долгунца при применении органоминеральной системы удобрения баланс элементов питания в почве составил: азота — +10.3, фосфора — +22.2, калия — +11.4 кг/га. Наиболее высокие показатели плодородия почвы и наибольшую агрономическую эффективность обеспечило внесение навоза в количестве 5.7 т/га + (NPK)120–170 [4, 5].

Лен-долгунец имеет слабо развитую корневую систему и очень чувствителен к недостатку в почве легкоусвояемых форм фосфора. Наибольшая прибавка урожайности льносоломы получена при содержании подвижного фосфора >50 мг/кг и слабокислой или близкой к нейтральной реакции почвенного раствора. При высоком содержании подвижного фосфора вклад фосфорных удобрений в урожайность льна-долгунца снижался на 20–30% [6].

Лен-долгунец относится к калийлюбивым культурам. Эффективность калийных удобрений зависит от величины рН и содержания подвижного калия в почве. На вклад калийных удобрений в урожайность льна-долгунца большое влияние оказывал гранулометрический состав почвы [6]. Роль азотных удобрений в формировании урожайности льна-долгунца понижалась по мере увеличения гумусированности почвы [7].

Лен-долгунец отрицательно реагирует на повторный посев его на одном и том же поле несколько лет подряд. При этом отмечено накопление специфических для этой культуры болезней, вредителей и сорняков, в частности, такого вредного сорняка как пырей ползучий [8].

В последнее время в Нечерноземной зоне РФ сократились площади под зерновыми, снизилось внесение на поля органических удобрений, нарушились традиционные севообороты. В результате лен-долгунец приходится возвращать на одно и то же поле раньше рекомендуемых 7 лет.

Возникла необходимость восстановления плодородия почв за счет внесения на удобрение зеленой массы горчицы белой и минеральных удобрений под лен-долгунец и предшественники [8]. Существует необходимость замены традиционных предшественников под лен-долгунец на новые.

Возделывание на зеленое удобрение горчицы белой способствует сокращению количества стеблей пырея ползучего в посевах льна-долгунца и внесению дополнительных питательных веществ в почву [8]. Установлено, что с увеличением нормы посева горчицы белой возрастает ее конкурентная устойчивость к сорнякам [9].

Необходимо отметить, что при выращивании горчицы белой в 7-польном севообороте в занятом пару с внесением торфо-навозного компоста 70 т/га, разложение в почве зеленой массы сидерата обеспечивало образование веществ кислотной природы, и известкованная почва подкислялась на 0.4 ед. рН без снижения суммы поглощенных оснований. Это способствовало увеличению подвижности микроэлементов и некоторому накоплению в почве водорастворимого бора и подвижного цинка [10]. По объему поступления калия сидерация была равноценна запашке торфо-навозного компоста 54 т/га и увеличивала содержание подвижного калия в почве в среднем на 20 мг/кг. Этот прием, повышая биологическую активность почвы, способствовал увеличению степени подвижности фосфатов почвы и повышал содержание подвижного фосфора в среднем на 22 мг/га [10].

Цель работы — выявление изменения агрохимических показателей почвы при выращивании однолетних предшественников на зеленый корм с использованием зеленой массы поукосной промежуточной культуры горчицы белой на удобрение с учетом внесения минеральных удобрений под посев предшественников и льна-долгунца для повышения урожайности льнопродукции в севооборотах с короткой ротацией.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в центральном районе Нечерноземной зоны РФ (Тверская обл.) в период с 2016 по 2019 г. на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с реакцией почвенного раствора от слабокислой до сильнокислой (по ГОСТ 26257-97) (pH_{KCl} 4.4–5.4). Перед посевом льна-долгунца почва опытных участков характеризовалась очень высоким содержанием (по ГОСТ 26907-91) подвижного фосфора (270–452 мг/кг), повышенным и высоким содержанием калия (84–256 мг/кг). Содержание гумуса было равно 1.5–1.6% (по ГОСТ 26213). Полевой опыт был однофакторным. Изучали 3 севооборота с короткой ротацией. В первый год высевали предшественники льна-долгунца. В первом севообороте был посеян ячмень сорта Владимир на зерно, с нормой посева 5 млн всхожих семян/га с полной дозой минеральных удобрений N45P80K80, во 2-м и в 3-м севооборотах — на корм викоовсяная смесь и горчица белая сорта Луговская с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение (табл. 1). Перед посевом предшественника горчицы белой на зеленый корм вносили минеральные удобрения из расчета N35P0K60, перед

Таблица 1. Схема севооборотов с короткой ротацией

Севооборот	Чередование культур в севообороте			
1-й	Ячмень	Лен-долгунец	Лен-долгунец	Лен-долгунец
2-й	Викоовсяная смесь с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение	Лен-долгунец	Ячмень с внесением Стернифага	Лен-долгунец
3-й	Горчица белая с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение	Лен-долгунец	Ячмень	Лен-долгунец

посевом викоовсяной смеси, как предшественника на зеленый корм, – N30P0K70. Горчицу белую на зеленое удобрение после уборки горчицы белой и викоовсяной смеси на зеленый корм выращивали без внесения минеральных удобрений, высевали с нормой высева 4.5 млн всхожих семян/га.

На 2-й год после предшественников во всех севооборотах высевали лен-долгунец сорта Тверской. Его высевали с нормой высева 22 млн всхожих семян/га, с внесением минеральных удобрений под культивацию в дозе N10P22K80 по общепринятой технологии.

В следующем году в севообороте (ячмень–лен-долгунец–лен-долгунец–лен-долгунец) повторно высевали лен-долгунец, во 2-м и 3-м севооборотах с возделыванием поукосно горчицы белой на зеленое удобрение был посеян ячмень, во 2-м севообороте с применением почвенного биофунгицида Стернифага (80 г/га) добавляли в раствор N_{aa}12 для разложения растительных остатков и подавления почвенных фитопатогенов. Биофунгицид Стернифаг вносили после уборки ячменя и заделывали в почву с помощью культивации. В конце ротации 4-польных севооборотов высевали лен-долгунец сорта Тверской.

Зеленая масса горчицы белой была запахана на удобрение в количестве 13.6 т/га после предшественника горчицы белой и 14.3 т/га – после предшественника викоовсяной смеси в начале ротации 4-польных севооборотов со льном-долгунцом. В зеленой массе горчицы белой содержалось: N – 5, P₂O₅ – 1.6, K₂O – 4% на абсолютно сухое вещество, в почву с зеленой массой горчицы белой в среднем поступило: азота – 70, фосфора – 22 и калия – 56 кг/га.

Для борьбы с сорной растительностью в фазе “елочка” посеvy льна-долгунца обрабатывали баковой смесью гербицидов, включавшей Секатор Турбо – 75 мл/га, Лонтрел – 250 мл/га, Миура – 1 л/га, Гербитокс Л – 600 мл/га. Общая площадь делянки полевого опыта составляла 88 м², учетная – 66.5 м². Повторность опыта трехкратная. В качестве контрольного варианта использовали сево-

оборот (ячмень–лен-долгунец–лен-долгунец–лен-долгунец) с посевом льна-долгунца после предшественника ячменя 3 года подряд.

В период вегетации предшественников температура воздуха и погодные условия благоприятно влияли на повышение урожайности ячменя, вико-овсяной смеси и горчицы белой. ГТК по Селянинову был равен 1.6. В следующем году в период роста и развития растений льна-долгунца было влажно и тепло, ГТК также был равен 1.6. Благоприятные погодные условия способствовали получению высокой урожайности льна-долгунца. Метеорологические условия следующего года были не совсем благоприятными для роста и развития растений льна-долгунца. После посева и во время всходов льна погода характеризовалась засушливыми условиями с минимальным количеством осадков и температурами, которые превышали средние многолетние показатели, ГТК был равен 0.83.

В конце ротации метеорологические условия были неблагоприятными для развития растений льна-долгунца. После посева и до конца фазы “елочка” количество осадков было минимальным, ГТК = 0.74. Во 2-й декаде апреля осадки отсутствовали, в 3-й декаде апреля осадков выпало всего 8% от нормы. Средняя суточная температура воздуха в мае была выше средних многолетних показателей на 3°C. В июле, во время цветения и созревания количество осадков превышало средние многолетние показатели, температура воздуха была меньше средней многолетней нормы, что отрицательно сказалось на количестве семян в коробочках из-за плохого опыления и завязываемости.

Учет урожая определяли поделочно, сплошным методом, с приведением урожайных данных к стандартной влажности и чистоте. Данные урожайности льнопродукции обработаны методом дисперсионного анализа [11]. Наблюдения и исследования проводили в соответствии с методическими указаниями по проведению полевых опытов со льном-долгунцом [12].

Таблица 2. Изменение агрохимических показателей почвы перед посевом культур в севооборотах с короткой ротацией

Год посева предшественников и льна-долгунца	Возделываемая культура	Агрохимические показатели почвы		
		pH _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O
			мг/кг почвы (по Кирсанову)	
1-й севооборот				
1-й	Ячмень	5.1	370	110
2-й	Лен-долгунец	4.5	296	170
4-й	Лен-долгунец	5.2	270	220
2-й севооборот				
1-й	Викоовсяная смесь с поукосным посевом горчицы белой	5.0	434	84
2-й	Лен-долгунец	4.5	298	134
4-й	Лен-долгунец	5.1	330	244
3-й севооборот				
1-й	Горчица белая с поукосным посевом горчицы белой	5.0	452	92
2-й	Лен-долгунец	4.4	298	150
4-й	Лен-долгунец	5.0	296	132

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лен-долгунец резко реагирует на изменение содержания элементов питания в почве. Перед посевом предшественников викоовсяной смеси и горчицы белой на зеленый корм в начале закладки опыта почва характеризовалась среднекислой реакцией почвенного раствора, а в севообороте (ячмень—лен-долгунец—лен-долгунец—лен-долгунец) перед посевом ячменя — слабокислой. Почва перед посевом предшественников характеризовалась очень высоким содержанием фосфора и средним — калия.

Перед посевом льна-долгунца после возделывания предшественников в 4-польных севооборотах с короткой ротацией произошли изменения содержания питательных веществ в почве. Кислотность почвы снизилась до сильнокислой. Содержание фосфора осталось очень высоким, но абсолютная величина его показателей снизилась в 1.2 раза по сравнению с показателями перед посевом предшественников (табл. 2). В севооборотах с использованием на удобрение зеленой массы поукосного посева горчицы белой содержание фосфора в почве снизилось на 136–154 мг/кг почвы, тогда как в севообороте, где возделывали ячмень, только на 74 мг/кг почвы. Содержание фосфора в почве было в 1.5–2.0 раза больше, чем калия. Однако по литературным данным [10], для

получения хорошего качества льноволокна содержание калия должно превышать содержание фосфора в почве. Обеспеченность почвы калием для повышения урожайности льнопродукции улучшилась после использования на зеленое удобрение горчицы белой. Содержание калия со среднего увеличилось до повышенного. Биологическая активность почвы в посевах льна-долгунца была высокой и составляла после предшественника ячменя 61%, после двойного посева горчицы белой с использованием ее зеленой массы на корм и удобрение увеличилась на 4%. Высокая биологическая активность почвы свидетельствовала о достаточной обеспеченности почвы азотом, при этом в почве активнее происходили процессы окисления клетчатки.

Биологическая активность почвы в повторных посевах льна-долгунца в следующем году снижалась, в основном из-за сухих погодных условий и составила 16%, что свидетельствовало о недостаточном количестве азота в почве.

На 4-й год перед посевом льна-долгунца в конце ротации в севооборотах (ячмень—лен-долгунец—лен-долгунец—лен-долгунец) и (викоовсяная смесь на зеленый корм с горчицей белой на зеленое удобрение (лен-долгунец—ячмень—лен-долгунец) почва была слабокислой, содержание фосфора оставалось очень высоким, но абсолют-

Таблица 3. Изменение урожайности льна-долгунца и качества льнопродукции в севооборотах с короткой ротацией

Севооборот	Урожайность льнопродукции, т/га				№ льнотресты
	льнотреста	льносемена	льноволокно		
			всего	трепаное	
1-й год посева льна-долгунца					
1-й	5.04	0.89	1.79	1.58	2.5
2-й	5.14	0.82	1.76	1.63	2.5
3-й	5.30	1.04*	1.84	1.73	2.5
<i>HCP</i> ₀₅ , т/га	1.20	0.21	0.44	0.15	—
4-й год посева льна-долгунца					
1-й	1.74	0.19	0.52	0.32	1.0
2-й	2.24*	0.24	0.60*	0.48*	1.5
3-й	2.12*	0.20	0.55*	0.49*	1.5
<i>HCP</i> ₀₅ , т/га	0.03	$F_{\phi} < F_{05}$	0.01	0.01	

*Достоверно на 5%-ном уровне значимости.

Таблица 4. Продуктивность 4-польных севооборотов с короткой ротацией

Количество зерновых единиц (з.е.) (среднее за 4 года), ц з.е./га		
1-й севооборот (ячмень—лен-долгунец—лен-долгунец—лен-долгунец)	2-й севооборот (вико-овсяная смесь с поукосным посевом горчицы белой—лен-долгунец—ячмень—лен-долгунец)	3-й севооборот (горчица белая с поукосным посевом горчицы белой—лен-долгунец—ячмень—лен-долгунец)
28.6	41.6	36.5

ные показатели уменьшились в 1.2–1.5 раза, содержание калия было высоким.

В севообороте (горчица белая на зеленый корм с горчицей белой на зеленое удобрение (лен-долгунец)—ячмень—лен-долгунец) почва имела реакцию раствора среднекислую, содержание фосфора было очень высокое, но абсолютные показатели уменьшились в 1.5 раза, содержание калия оставалось повышенным.

Растения льна-долгунца в основном поражались антракнозом в 1-й и 2-й степени как в период полных всходов, так и в раннюю желтую спелость. Больших различий по увеличению степени развития антракноза по годам не наблюдали. В период полных всходов распространенность антракноза в 1-й степени составила 100%.

На повышение урожайности льнопродукции после посева однолетних предшественников на зеленый корм оказали влияние благоприятные погодные условия. Урожайность льнотресты после предшественника викоовсяной смеси с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение была получена в количестве 5.0 т/га, а

после предшественника горчицы белой с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение — 5.3 т/га, льносемян — по 1 т/га, всего и трепаного льноволокна — 1.7 и 1.8 т/га соответственно с высокими показателями качества льнотресты — 2.5 номера (табл. 3).

Урожайность льнопродукции на 4-й год посева после ячменя во 2-м севообороте (викоовсяная смесь на зеленый корм с горчицей белой на зеленое удобрение—лен-долгунец—ячмень—лен-долгунец) была невысокой, но достоверно увеличивалась по сравнению с первым севооборотом (ячмень—лен-долгунец—лен-долгунец—лен-долгунец), где лен-долгунец высевали повторно. Улучшалось и качество льнопродукции на 0.5 номера при посеве льна-долгунца после ячменя.

В среднем за 4 года исследования продуктивность 2-го севооборота при возделывании льна-долгунца после предшественника викоовсяной смеси с использованием промежуточного посева горчицы белой и применения Стернифага возросла в среднем на 13 з.е. по сравнению с первым севооборотом, где повторно 3 года высевали лен-долгунец (табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при возделывании льна-долгунца в 4-польных севооборотах с короткой ротацией на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с повышенным содержанием фосфора в качестве предшественников лучше выбирать викоовсяную смесь или горчицу белую на зеленый корм с использованием промежуточного поукосного посева горчицы белой на зеленое удобрение взамен предшественника ячменя.

Урожайность льнотресты после предшественника викоовсяной смеси была получена в количестве 5.0 т/га, а после предшественника горчицы белой с поукосным посевом горчицы белой на зеленое удобрение — 5.3 т/га, льносемян — по 1 т/га, всего и трепаного льноволокна по — соответственно 1.8 и 1.7 т/га с высокими показателями качества льнотресты, соответствующими 2.5 номера.

С помощью использования почвенного биофунгицида Стернифага (действующее вещество — споры гриба *Trichoderma harziannum* ВИЗР-18, титр 10^{10} КОЕ/г), предназначенного для разложения растительных остатков и подавления почвенных фитопатогенов, можно оздоровить почву. После ячменя с использованием биофунгицида во 2-м севообороте в конце ротации урожайность тресты увеличивалась на 0.5 т/га и составила 2.2 т/га, всего волокна — на 0.1, трепаного — на 0.2 т/га, улучшалось и качество тресты на 0.5 номера, повышалась продуктивность севооборота на 13% по сравнению с повторным посевом льна-долгунца.

Установлено, что при возделывании льна-долгунца в севооборотах с короткой ротацией на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с высоким содержанием подвижного фосфора происходили изменения агрохимических показателей почвы. Перед посевом льна-долгунца после предшественников викоовсяной смеси и горчицы белой с внесением перед их посевом азотных и калийных удобрений, с поступлением азота, фосфора и калия с зеленой массой горчицы белой, запаханной на удобрение, увеличилась кислотность почвы до сильнокислой. Содержание калия в почве увеличилось до повышенного и высокого. Содержание фосфора во всех севооборотах осталось очень высоким.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рысев М.И., Кострова Г.А., Рысева Т.А., Уткина С.В., Романова Н.В. Влияние предшественников и концентрации посевов льна-долгунца в севообороте

на урожайность и качество льнопродукции // Изв. Великолук. ГХСА. 2019. № 2. С. 2–13.

2. Рысев М.И., Степин А.Д., Кострова Т.А., Уткина С.В. Влияние предшественников, концентрации посевов льна-долгунца в севообороте на различных фонах минерального питания на урожайность севооборотов и плодородие почвы // Международ. науч.-исслед. журн. 2019. № 11 (89). Ч. 2. С. 21–30. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.89.11.038>
3. Труш М.М., Сергеев А.Н., Марченков А.Н. Справочник льновода / Сост. М.М. Труш, Ф.М. Карпунин. Л.: Агропромиздат, Ленинград. отд.-е, 1985. 240 с.
4. Кузьменко Н.Н. Влияние различных уровней удобрений на урожайность льна-долгунца и культур льняного севооборота // Агрохимия. 2022. № 8. С. 17–21. <https://doi.org/10.31857/S0002188122080105>
5. Кузьменко Н.Н. Влияние насыщенности севооборота органическими и минеральными удобрениями на плодородие, урожайность и качество льнопродукции // Плодородие. 2022. № 1. С. 29–32. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.124.08>
6. Шафран С.А. Вклад минеральных удобрений в формировании урожайности полевых культур. Сообщение. 2. Фосфорные и калийные удобрения // Агрохимия. 2021. № 8. С. 9–16. <https://doi.org/10.31857/S0002188121080123>
7. Шафран С.А. Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур. Сообщение 1. Азотные удобрения // Агрохимия. 2021. № 7. С. 27–35. <https://doi.org/10.31857/S0002188121070097>
8. Сухопалова Т.П. Засоренность посевов льна-долгунца в севооборотах с короткой ротацией // Аграрн. наука. 2021. Т. 348. № 4. С. 79–82. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-348-4-79-82>
9. Ростова Е.Н., Изотов А.М. Засоренность и продуктивность посевов горчицы белой (*Sinapis alba* L.) в зависимости от нормы высева и дозы азота // Таврич. вестн. аграрн. науки. 2021. № 1 (25). С. 195–204. <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2021-1-25-195-204>
10. Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю., Кузьменко Н.Н., Нечушкин С.М. Усовершенствованная система применения удобрений в льняном севообороте. Торжок: ООО “Фирма “Вариант”, 2005. 79 с.
11. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
12. Методические указания по проведению полевых опытов со льном-долгунцом / Под общ. ред. Б.С. Долгова и В.Б. Ковалева. Торжок: Ржевская типография, 1978. 72 с.

Influence of Green and Mineral Fertilizers on Agrochemical Indicators of the Soil and the Yield of Flax Products in Crop Rotations with Short Rotation

T. P. Sukhopalova

*Federal Research Center of Bast Fiber Crops
Komsomolsky prosp. 17/56, Tver 170041, Russia
E-mail: info.trk@fnclk.ru*

In the Central region of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation, on sod-podzolic medium loamy soil with a high phosphorus content, 4-field crop rotations with short rotation, with the cultivation of long-leg flax, were studied. The results of changes in agrochemical indicators of the soil and an increase in the yield of flax products during the sowing of flax after new precursors, with the use of a green mass for fertilizing by sowing white mustard, taking into account the mineral fertilizers applied for crop rotation crops, are considered. The positive effect of biofungicide *Sternifaga* after harvesting barley on the yield of flax products was noted. It was established that the highest yield of flax seed was obtained after the predecessor of white mustard for green feed with sowing of white mustard for green fertilizer in the amount of 5.3 t/ha, flax seed – 1 t/ha, total and tattered flax fiber – 1.7 and 1.8 t/ha with high quality indicators of flax seed corresponding to number 2.5. It has been shown that with the help of the soil biofungicide *Sternifaga* (the active substance is the spores of the fungus *Trichoderma harziannum* VISR-18, titer 10^{10} CFU/g), intended for the decomposition of plant residues and the suppression of soil phytopathogens, it is possible to improve the soil. In the crop rotation, where the vico–oatmeal mixture was sown for green fodder with a lean sowing of white mustard for green fertilizer, the yield of trusts increased by 0.5 t/ha and amounted to 2.2 t/ha, total fiber – by 0.1, trepan – by 0.2 t/ha, the quality of trusts improved by 0.5 numbers, crop rotation productivity increased by 13% after the predecessor of barley using biofungicide compared to the crop rotation, where flax was sown repeatedly for 3 years in a row.

Keywords: long-legged flax (*Linum usitatissimum*), crop rotation, short rotation, predecessor, intermediate crop, green fertilizer, mineral fertilizer, yield.

УДК 632.952:633.11“321”

КОМБИНИРОВАННЫЕ ТРИАЗОЛЬНЫЕ ПРОТРАВИТЕЛИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ПРОРОСТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ[§]

© 2023 г. А. Ю. Кекало^{1,*}, С. С. Халиков², М. М. Ильин²,
Н. Д. Чкаников², Н. Ю. Заргарян¹

¹Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН
620142 Екатеринбург, Свердловская обл., ул. Белинского, 112а, Россия

²Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
119334 Москва, ул. Вавилова, 28, стр. 1, Россия

*E-mail: alena.kekalo@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 12.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Протравливание семян фунгицидами является определяющим звеном в системе защиты растений, и наилучший эффект дают системные препараты. Поэтому очень важна разработка научных основ приготовления комплексных препаратов с низкой нормой расхода действующего вещества и включением регуляторов роста растений, усиливающих ростовые процессы и урожайность основной культуры. В последние годы перспективны направления модификации известных и практикуемых фунгицидов различными методами, в том числе методами механохимии. Остается актуальной проблема создания как новых субстанций, так и их эффективных рецептур. Учитывая перспективность и высокую эффективность триазольных фунгицидов в системе комплексной защиты растений, предложено создание поликомпонентных протравителей семян зерновых культур. Целью настоящего исследования была разработка препаратов на основе тебуконазола (ТБК) и пропиконазола (ППК) в виде твердых дисперсий (ТД) и изучение их биологической активности на растениях яровой пшеницы в условиях Зауралья. При этом также изучили ретардантный эффект этих триазолов с помощью отечественного регулятора роста Флороксан. Применение новых препаратов на яровой пшенице позволило добиться снижения поражения культуры корневой гнилью на 85–87%, продуктивная кустистость возрастала на 6–11% по сравнению с контролем без обработки. Достоверная прибавка урожайности культуры 2,2 ц/га или 14% получена при использовании препарата 2 (ТД состава ТБК : ППК : АГ : силика = 1 : 1 : 7 : 1 + Флороксан при включении в композицию полисахарида (АГ) и вспомогательного вещества силика). Включение в состав протравочной смеси регулятора роста Флороксан снижало ретардантное действие тебуконазола и стимулировало рост и развитие проростков пшеницы. Было доказано, что такой биологический эффект достигнут в условиях засухи разной интенсивности в период вегетации 2021–2022 гг.

Ключевые слова: протравители семян, тебуконазол, пропиконазол, регулятор роста Флороксан, механохимия, многокомпонентные препараты, биологическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188123100071, **EDN:** LFAQPW

ВВЕДЕНИЕ

Семенной материал является жизненно важным вкладом в устойчивый рост сельского хозяйства, т.к. >90% продуктов питания, производимых из урожая сельскохозяйственных культур, выращивают из семян [1]. Одним из основных этапов в технологии производства зерна является подготовка семян к посеву и защита сельскохозяйственных культур от болезней и вредителей.

Протравливание семян фунгицидами является определяющим звеном в системе защиты растений, и наилучший эффект, как правило, дают системные препараты [2]. Поэтому исследования по разработке инновационных препаратов являются актуальными и практически значимыми. К таким перспективным препаратам относятся производные триазола [3]. Но триазольные фунгициды при обработке ими семян зерновых влияют на рост и развитие всходов, уменьшая длину coleoptilya,

[§] Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по направлению 0532-2021-0002.

первого листа и междоузлий, а также при определенных условиях могут негативно влиять на развитие корневой системы [4, 5]. Для нивелирования ретардантного эффекта триазолов важно использовать инновационные составы, содержащие ростстимулирующие препараты. В борьбе с почвенно-семенными инфекциями ученые активно изучают возможности использования пестицидов с лучшим проникновением в растительные ткани, с пониженной нормой расхода, а также новых модификаций препаративных форм, природных биополимеров и экстрактов, комплексов с биологическими и химическими индукторами [6–11].

Традиционной формой для протравителей основных мировых производителей служит концентрат суспензии (КС), где размер частиц действующего вещества в препаратах составляет от 2 до 5 мкм [12]. Препараты на основе тебуконазола (ТБК), полученные методом его механохимической модификации с полисахаридами [13] в виде твердых дисперсий (ТД) и обладающие более высокой степенью водорастворимости, проявляли высокую фунгицидную активность против возбудителей корневой гнили (*Helminthosporium* spp., *Fusarium* spp.) и других видов грибов (в частности, *Penicillium* spp.) при более низких нормах расхода тебуконазола по сравнению с применяемыми на практике препаратами. При этом препараты были не только экономически более выгодными, но и менее токсичными. Образующие в воде из этих ТД супрамолекулярные комплексы способны успешно регулировать численность конидий патогена в ризосфере зерновых культур, выращиваемых в условиях центрально-лесостепного агроландшафтного района Западной Сибири на черноземе выщелоченном [14].

Препаративные формы ТБК в виде суспензионных концентратов [15], полученные без использования традиционных структурообразующих и формообразующих компонентов, показали синергизм биологических свойств, проявляющихся в ускорении роста растений и длины их корневой системы, снижения развития семенных болезней и перспективность использования таких форм ТБК.

Учитывая собственные данные эффективности суспензионных форм ТБК, изучения факторов, влияющих на проникновение протравителей через растительные мембраны в присутствии полисахаридов [16], а также литературные данные [13] об инновационных препаративных формах, нами получены 2- и 3-компонентные протравители, как в виде ТД, так и в виде суспензионного концентрата (СК). Продолжением этих работ являются исследования по созданию многокомпо-

нентных препаратов с включением 2-х триазольных фунгицидов [17].

Цель работы – разработка технологии получения комбинированных препаратов на основе тебуконазола и пропиконазола (ППК) в виде ТД и изучение их биологической активности на растениях яровой пшеницы в условиях Зауралья. При этом также была поставлена задача контроля ретардантного эффекта этих триазолов с помощью отечественного регулятора роста Флороксан.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Тебуконазол (ТБК) – [(RS)-1p-хлорфенил-4,4-диметил-3-(1H-1,2,4-триазол-1-ил-метил)пентан-3-ил] – системный фунгицид, используемый для обработки семян зерновых культур. Относится к триазолам 3-го поколения, проявляет системное действие, эффективен в борьбе с фитопатогенами, передающимися с семенами.

Пропиконазол (ППК) – [(+/-)-1-[2-(2,4-дихлорфенил)-4-пропил-1,3-диоксолан-2-илметил]-1H-1,2,4-триазол] – защитный и лечащий системный фунгицид из класса триазолов. Обладает широким спектром внутрирастительного действия. Применяется в сельском хозяйстве для борьбы с болезнями зерновых культур.

Флороксан (ФЛ) – гидрохлорид N-метил-4-(1 гидроксикарбонметокситрифторэтил)анилина. Регулятор роста ряда видов растений [18].

Получение твердых дисперсий на основе ТБК и ППК проводили по ранее описанной методике [13] с использованием полисахарида (АГ) и вспомогательного вещества (силика), как компонентов твердофазной механохимической модификации ТБК и ППК.

Растворимость полученных твердых дисперсий ТБК и ППК определяли методом ВЭЖХ [13]. Результаты представлены в табл. 1. Показано, что при увеличении времени механообработки растворимость компонентов незначительно уменьшалась, что, видимо, было связано с частичным оплавлением ППК, это затрудняло растворение обоих компонентов (ТБК и ППК) при увеличении времени механообработки >1 ч.

Были приготовлены для передачи на испытания 2 препарата в количестве 300 г:

– препарат 1 – ТД состава ТБК : ППК : АГ : силика = 1 : 1 : 7 : 1, в который был добавлен эмульгатор додецилсульфосукцинат натрия (ДССН) в количестве 0.25%. В этом препарате содержание действующих веществ (ДВ) было равно: ТБК – 10, ППК – 10%, увеличение их растворимости было соответственно, в 1.8 и 1.3 раза. Такое увели-

Таблица 1. Динамика растворимости ТД на основе ТБК и ППК с АГ и силикой (содержание ТБК – 10, ППК – 10%)

Образец, № (состав, условия Получения)	Растворимость (ТБК/ППК)	
	Абсолютная, мг/мл	Увеличение, раз
ТБК исходный	36.0	
ППК-исходный	110.0	
Образец 1 (ТД состава ТБК : ППК : АГ : силика = 1 : 1 : 7 : 1 после 1 ч м/о)	58/119	1.61/1.08
Образец 2 (ТД состава ТБК : ППК : АГ : силика = 1 : 1 : 7 : 1 после 3 ч м/о)	56/115	1.56/1.04
Образец 3 (ТД состава ТБК : ППК : АГ : силика = 1 : 1 : 7 : 1 после 5 ч м/о)	52/112	1.44/1.02

Примечание. ТБК – тебуконазол, ППК – пропиконазол, АГ – полисахарид, силика – вспомогательное вещество, ТД – твердая дисперсия, м/о – механическая обработка. То же в табл. 2–7.

чение, по-видимому, можно объяснить поверхностно-активными свойствами ДССН;

– препарат 2 – ТД состава ТБК : ППК : АГ : силика = 1 : 1 : 7 : 1, в который был добавлен регулятор роста Флороксан в количестве 0.25%. В этом препарате, содержащем по 10% ТБК и ППК, существенного увеличения их растворимости не было (соответственно в 1.6 и 1.1 раза).

Условия и методика проведения полевого эксперимента. Для обработки семян яровой пшеницы использовали препарат 1 с добавлением ДССН и препарат 2 с добавлением Флороксана. Обработку проводили ручным способом с расходом рабочего раствора 10 л/т.

Схема опыта включала следующие варианты: контроль без обработки, препарат 1, 0.3 г/т; препарат 2, 0.3 г/т; коммерческий препарат Бункер 0.5 л/га в качестве эталона.

Полевые эксперименты проводили на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ – филиала УрФАНИЦ УрО РАН в 2021–2022 гг. Испытания проводили во 2-м поле 3-польного зернопарового севооборота. Сорт яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) – Омская 36. Площадь опытных делянок – 20 м², повторность четырехкратная, размещение делянок систематическое.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный маломощный малогумусный тяжелосуглинистый. Предпосевную культивацию почвы проводили культиватором КПС-4 непосредственно перед посевом, посев – дисковой селекционной сеялкой ССФК-6. Норма высева семян – 5.0 млн всхожих зерен/га, глубина посева – 5–6 см. Срок посева – 19–22 мая. После посева почву прикатывали катками ЗККШ-6. Уборку проводили напрямую комбайном “Sampro-130”. Наблюдения

и учеты вели по общепринятым в РФ методам [19–21].

Погодные условия вегетации 2021 г. характеризовались крайне неравномерным распределением гидротермических ресурсов и в целом были малоблагоприятными для роста и развития растений. В мае и июне практически не было продуктивных осадков (ГТК 0.02 и 0.14 соответственно), что привело к значительному угнетению поста пшеницы. За период вегетации выпало всего 84.8 мм осадков (43% от нормы). Гидротермический коэффициент за май–август составил 0.34, что характеризовало погодные условия как острозасушливые.

В период вегетации 2022 г. погодные условия характеризовались как умеренная засуха летнего типа (ГТК_{05–08} = 0.77). В мае 2022 г. они были близкими к среднегодовым показателям. Июнь отличался недобором тепла, колебаниями дневных и ночных температур воздуха и хорошим увлажнением (82.6 мм или 169% от нормы, ГТК = 1.6). В июле наступила жаркая, с малым количеством осадков погода (ГТК = 0.3). Август также был знойным с недостаточным увлажнением (ГТК = 0.4). Период развития пшеницы от фазы всходов до начала колошения (май–июнь) проходил в достаточно благоприятных условиях, а в период с колошения до начала созревания пшеницы – при жаркой влагодефицитной погоде, что негативно сказалось на наливе зерна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Появление всходов пшеницы в контроле и в вариантах с обработкой семян протравителями имело отличия. Отмечена задержка их появления

Таблица 2. Влияние препаратов 1 и 2 на полевую всхожесть и пораженность растений пшеницы корневой гнилью в фазе кушения

Показатель	Год	Варианты			
		контроль без обработки	препарат 1 (ТД, ТБК : ППК : АГ : : силика = 1 : 1 : 7 : 1)	препарат 2 (ТД, ТБК : ППК : АГ : : силика = 1 : 1 : 7 : 1 + Флороксан 0.25%	бункер (эталон), ВСК ТБК 60 г/л
Полевая всхожесть, %	2021	69	72	76	72
	2022	67	67	67	68
	Среднее	68	70	72	70
Развитие корневой гнили, %	2021	12.3	1.5	1.7	2.2
	2022	6.5	0.9	1.1	0.3
	Среднее	9.4	1.2	1.4	1.3
Биологическая эффективность препарата, %	2021	—	88	86	82
	2022	—	86	83	95
	Среднее	—	87	85	89
Распространенность корневой гнили, %	2021	36	8	10	16
	2022	62	33	33	14
	Среднее	49	21	22	15

при обработке семян препаратом 2 и эталоном на 1 сут, а в варианте с препаратом 1 – на 2-е сут.

Плотность всходов пшеницы в острозасушливом 2021 г. составила 312–340 шт./м², полевая всхожесть пшеницы – от 69 в контроле до 72–76% – в вариантах с протравителями. Препарат 2 с Флороксаном повышал густоту всходов на 28 шт./м² или на 9% относительно контроля. В 2022 г. полевая всхожесть пшеницы составила 67–68% без значимых отличий между вариантами опыта (табл. 2).

Учет поражения растений яровой пшеницы корневой гнилью был проведен в фазе кушения по методике Чулкиной [22]. В лабораторных условиях определили, что возбудителями болезни являлись грибы рода *Fusarium* spp. и *Bipolaris sorokiniana* при явном преобладании первых. Поражение растений гелиминтоспориозно-фузариозными корневыми гнилями в фазе кушения в 2021 г. было умеренным: в контрольном варианте развитие болезни составило 12.3, распространенность – 36%, в 2022 г. уровень развития заболевания не превышал порога вредоносности (6.5%), однако признаки поражения наблюдали у 62% растений, что было больше сигнального уровня, равного 40% (табл. 2).

Биологическая эффективность изученных протравителей в отношении данного заболевания пшеницы была высокой, составив 85–87%, что было близким к уровню действия эталона.

Параллельно с полевым экспериментом в лабораторных условиях семена пшеницы, обработанные изученными протравителями, были протестированы, и определено влияние препаратов на рост и развитие проростков [23]. Полученные результаты свидетельствовали о том, что длина корней проростков в вариантах с мерами защиты была меньше, чем в контроле, на 1.0–2.3 см, угнетающее действие было несколько слабее при использовании тебуконозола с флороксаном (препарат 2) (табл. 3).

При использовании в практике растениеводства протравителей семян азольного ряда у пшеницы часто отмечают укорачивание coleoptily (подземного междоузлия), что крайне важно учитывать при определении глубины посева обработанных семян. Это рострегулирующее действие отмечалось и в нашем опыте. Подземное междоузлие формировалось значительно короче в вариантах с препаратом 1 и эталоном. При использовании для обработки семян препарата 2 этого не наблюдали. Некоторое отставание в росте было отмечено и у проростков пшеницы в вариантах с препаратом 1 и эталоном: на 1.3–1.5 см короче в сравнении с контролем без обработки семян.

Для определения влияния протравителей на рост и развитие пшеницы в полевых условиях были отобраны растения и определены их биометрические параметры в фазе кушения культуры (табл. 4, 5).

Таблица 3. Влияние препаратов на биометрические параметры проростков и корневой системы пшеницы яровой в лабораторных условиях

Вариант	Корень		Колоопить		Проросток	
	количество, шт.	длина, см	длина, см	+/- к контролю	длина, см	+/- к контролю
Контроль без обработки	4.5	7.4	5.4	—	9.5	—
Препарат 1	4.3	5.1	3.4	-2.0	8.0	-1.5
Препарат 2	4.3	6.4	5.7	+0.3	9.1	-0.4
Бункер (эталон)	4.5	5.6	3.3	-2.1	8.2	-1.3
<i>HCP</i> ₀₅	0.9	2.0	1.3		1.0	

Корневая система пшеницы в вариантах с обработкой семян изученными препаратами формировалась с меньшей длиной, чем в контроле, на 0.7–1.9 см. На массу корней протравители оказали положительное действие, особенно эталонный препарат (+9.7%).

Параметры надземных органов проростков пшеницы в вариантах опыта имели отличия. При использовании изученного препарата без регулятора роста отмечено снижение высоты растений на 1.3 см или на 11% относительно контроля, также листья формировались меньшей длины. В эталонном варианте растения были выше на 1.7 см, чем в контроле. Масса надземных органов была больше на 1–6% в вариантах с мерами защиты, особенно при использовании препарата 2 (табл. 5).

В целом пшеница яровая в годы исследования развивалась в условиях дефицита влаги, отмечали почвенную и воздушную засуху (от острой в 2021 г. до умеренной в 2022 г.). Отзывчивость растений в подобных условиях на защитные мероприятия часто бывает невысокой, а агрессивность почвенных инфекций усиливается. Следует отметить, что в вариантах с активным стимулированием и защитой растений в начале вегетации (обработка семян протравителями) в дальнейшем наблюдали большее взаимное угнетение побегов кушения вследствие конкуренции за дефицитный ресурс.

Наблюдения за прохождением пшеницей фенологических фаз развития показало отсутствие отличий между вариантами опыта с начала фазы кушения. На первичном этапе роста и развития (прорастание–3-й лист) несколько отставали растения в вариантах с обработкой семян, взшедшие, как отмечали выше, чуть позднее контроля.

Отбор снопового материала для определения элементов структуры урожая был проведен в фазе полной спелости пшеницы. Высота яровой пшеницы к уборке была небольшой в острозасушли-

вом 2021 г., составив 49–52 см, несколько больше она была в варианте обработки препаратом 2. В условиях умеренной засухи 2022 г. растения пшеницы достигали высоты 92–94 см, также на 2 см больше длина соломины с колосом была в варианте с регулятором роста Флороксан (табл. 6).

Плотность стояния растений была на уровне 295–309 шт./м², несколько гуще – в вариантах с протравителями. Пшеница кустилась слабо в 2021 г. из-за недостатка влаги в июне, а в июле после прошедших дождей процесс формирования дополнительных побегов возобновился, но вызреть они не успели (подгон и подсед). В 2022 г. период кушения проходил в относительно благоприятных условиях, дефицит влаги наблюдали позднее в периоды колошения и налива зерна.

Более густой продуктивный стеблестой (+6–11% к контролю) формировался в вариантах применения изученных препаратов, особенно при обработке семян протравителем, включающим регулятор роста Флороксан (препарат 2). Длина колосьев пшеницы была небольшой, составив в среднем 6.2–6.7 см, показатель был невысоким из-за условий 2021 г., когда в период закладки ор-

Таблица 4. Влияние протравителей семян на параметры корневой системы пшеницы яровой в фазе кушения (2021–2022 гг.)

Вариант	Длина корней, см	Масса корней 1-го растения	
		г	% к контролю
Контроль без обработки семян	8.4	0.567	—
Препарат 1	7.7	0.592	4.4
Препарат 2	6.5	0.577	1.8
Бункер (эталон)	7.0	0.622	9.7

Таблица 5. Влияние протравителей семян на рост и развитие надземных органов пшеницы в фазе кущения (2021–2022 гг.)

Вариант	Высота проростка, см	Длина листа средняя, см	Ширина листа средняя, см	Масса надземных органов, г	% к контролю общей массы растений
Контроль без обработки семян	31.5	17.7	0.55	0.883	—
Препарат 1	30.2	15.8	0.50	0.900	2
Препарат 2	31.5	17.8	0.55	0.935	6
Бункер (эталон)	33.2	17.2	0.50	0.891	1

Таблица 6. Структура урожая яровой пшеницы в фазе полной спелости зерна

Вариант	Год	Число растений	Число стеблей	Число продуктивных стеблей	Высота растений	Длина колоса	Число зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г
Контроль без обработки	2021	300	386	296	49	5.3	12.5	35.0
	2022	290	354	324	92	7.1	20.5	37.4
	Среднее	295	370	310	71	6.2	16.5	36.2
Препарат 1	2021	314	412	318	50	5.3	13.6	34.3
	2022	292	374	340	93	8.1	20.0	37.8
	Среднее	303	393	329	72	6.7	16.8	36.1
Препарат 2	2021	312	418	338	52	5.1	13.1	34.2
	2022	306	368	352	94	7.7	19.8	38.0
	Среднее	309	393	345	73	6.4	16.5	36.1
Бункер (эталон)	2021	306	376	336	49	5.2	12.2	34.3
	2022	304	408	340	92	7.1	19.5	37.0
	Среднее	305	392	338	71	6.2	15.9	35.7

гана погодные условия были стрессовыми. На уступе колоса завязалось и налилось в среднем 1.6–1.7 зерен, что было меньше биологического минимума для пшеницы, остальные цветы редуцировались (высокие температуры в период цветения и отсутствие осадков оказали негативное влияние).

Озерненность колосьев в условиях влагодефицита составила только 12.2–13.6 шт. в 2021 г. и 19.5–20.5 шт. – в 2022 г., существенных различий в вариантах опыта не отмечали. Полновесность зерновок пшеницы (масса 1000 зерен) составила в среднем за годы испытания 35.7–36.1 г, и разница показателя в вариантах была несущественной.

Уборка урожая яровой пшеницы была проведена прямым комбайнированием поделночно. Полученные результаты свидетельствовали о том, что обработка семенного материала экспериментальными протравителями в виде твердой дисперсии, содержащими эффективные фунгициды

ТБК и ППК, позволила сохранить 1.0–2.2 ц/га или 7–14% урожайности культуры, произрастающей в засушливых условиях.

Достоверный уровень прибавки урожайности пшеницы яровой получили только в варианте с

Таблица 7. Влияние протравителей семян на урожайность пшеницы яровой (2021–2022 гг.)

Вариант	Урожайность фактическая		
	ц/га	+/- к контролю	% к контролю
Контроль без обработки	15.2	—	—
Препарат 1	16.5	1.3	9
Препарат 2	17.4	2.2	14
Бункер (эталон)	16.2	1.0	7
<i>HCP</i> ₀₅	1.4		

обработкой препаратом 2, в составе которого помимо вышеобозначенных фунгицидов содержался регулятор роста растений Флороксан (+14% к контролю), что было в 2 раза больше, чем в варианте с эталоном (табл. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с целью получения комбинированных препаратов с полифункциональным спектром действия была использована механохимическая технология, суть которой заключается в совместной механообработке действующих веществ фунгицидов и регулятора роста с полимерами. Были получены препараты в виде твердых дисперсий с незначительно повышенной растворимостью компонентов – тебуконазола и пропиконазола.

Биологическая эффективность экспериментальных препаратов для обработки семян составила 85–87% (объектом контроля была фузариозно-гельминтоспориозная корневая гниль), что было на уровне эффективности коммерческого препарата, взятого за эталон. Кроме этого, значительно уменьшалось число больных растений в вариантах с мерами защиты. За счет применения протравителей были получены прибавки урожайности яровой пшеницы 9–14%, статистически достоверными они были только в варианте применения препарата 2 ТД состава ТБК : ППК : АГ : силика = 1 : 1 : 7 : 1 + Флороксан 0.25%. Основным элементом структуры урожая, положительно реагирующим на меры защиты, было число продуктивных стеблей (+ 6–11% к контролю).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwinn F. Seed treatment, progress, and prospects. Proceedings of a symposium organised by the British Crop Protection Council and the Pesticides Group of the Society of Chemical Industry and held at the University of Kent, Canterbury on 5–7 January 1994. Published 1994 by British Crop Protection Council in Farnham, Surrey, UK. 1994. 482 p.
2. Edgington L.V., Martin R.A., Bruin G.C., Parsons I.M. Systemic fungicides: a perspective after 10 years // Plant Disease. 1980. № 64 (1). P. 20–23.
3. Montfort F., Klepper B.L., Smiley R.W. Effects of two triazole seed treatments, triticonazole and triadimenol, on growth and development of wheat // Pest Manag. Sci. 1996. № 46. P. 299–306.
4. Korsukova A.V., Gornostai T.G., Grabeinych O.I., Dorofeev N.V., Pobezhimova T.P., Sokolova N.A., Dudareva L.V., Voinikov V.K. Tebuconazole regulates fatty acid composition of etiolated winter wheat seed lings // J. Stress Physiol. Biochem. 2016. № 12 (2). P. 72–79.
5. Горина И.Н. Имазалилсодержащие протравители для зерновых культур // Защита и карантин раст. 2013. № 4. С. 55–57.
6. Малюга А.А., Чуликова Н.С., Халиков С.С. Эффективность инновационных препаратов на основе тебуконазола, тирама и карбендазима против болезней картофеля // Агрохимия. 2020. № 7. С. 57–67.
7. Volova T.G., Prudnikova S.V., Zhila N.O. Fungicidal activity of slow-release P(3НВ)/ТЕВ formulations in wheat plant communities infected by *Fusarium moniliforme* // Environ. Sci. Pollut. Res. 2018. V. 25. I. 1. P. 552–561.
8. Asrar J., Ding Y., La Monica R.E., Ness L.C. Controlled release of tebuconazole from a polymer matrix micro-particle: release kinetics and length of efficacy // J. Agric. Food Chem. 2004. № 52. P. 4814–4820. <https://doi.org/10.1021/jf0306385>
9. Banik S., Pérez-de-Luque A. In vitro effects of copper nanoparticles on plant pathogens, beneficial microbes and crop plants // Span. J. Agricult. Res. 2017. V. 15. I. 2. e1005. <https://doi.org/10.5424/sjar/2017152-10305>
10. Власенко Н.Г. К вопросу об агротехнологиях вообще и фитосанитарных технологиях в частности // Вестн. защиты раст. 2008. № 2. С. 3–10.
11. Кекало А.Ю., Немченко В.В., Заргарян Н.Ю., Филиппов А.С. Фитосанитарные проблемы пшеничного поля и эффективность средств защиты от болезней // Агрохимия. 2020. № 10. С. 45–50. <https://doi.org/10.31857/S0002188120100038>
12. Каракотов С.Д., Сараев П.В. Препаративные формы современных пестицидов // Адаптивно-интегрированная защита растений. М.: Печатный год, 2019. 628 с.
13. Халиков С.С., Душкин А.В., Давлетов Р.Д., Евсеев В.И. Создание инновационных фунгицидных средств на основе тебуконазола с привлечением механохимических процессов // Фундамент. исслед.-я. 2013. № 12 (10). С. 2695–2700.
14. Теплякова О.И., Власенко Н.Г., Душкин А.В., Халиков С.С. Влияние обработки семян механокомпозициями тебуконазола на накопление спор *Bipolaris sorokiniana* Shoem. в черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2018. № 5. С. 33–38. <https://doi.org/10.7868/S0002188118050058>
15. Vlasenko N.G., Khalikov S.S., Burlakova S.V. Flexible technology of protectants for grain seeds // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 548 082003. P. 10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082003>
16. Selyutina O.Y., Khalikov S.S., Polyakov N.E. Arabinogalactan and glycyrrhizin based nanopesticides as novel delivery systems for plant protection // Environ. Sci. Pollut. Res. 2020. V. 27. P. 5864–5872. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07397-9>
17. Халиков С.С., Теплякова О.И., Власенко Н.Г. Влияние препаративных форм тебуконазола на фитосанитарное состояние обработанных семян, рост и развитие проростков яровой пшеницы // Агрохимия, 2022. № 2. С. 45–55. <https://doi.org/10.31857/S0002188122020065>

18. Чкаников Н.Д., Свиридов В.Д., Кадыров А.А., Спиридонов Ю.Я. Композиция для обработки семян, обладающая рострегулирующим действием: Пат. РФ № 2369094, опубл. 10.10.2009 // Б.И. 2009. № 28.
19. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве. СПб.: ВИЗР, 2009. 378 с.
20. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1989. 239 с.
21. Экологический мониторинг и методы совершенствования защиты зерновых культур от вредителей, болезней и сорняков: метод. рекоменд. / под ред. В.И. Танского. СПб.: ВИЗР, 2002. 76 с.
22. Торопова Е.Ю. Экологические основы защиты растений от болезней в Сибири. Новосибирск, 2005. 370 с.
23. ГОСТ 12044-93 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. Методы анализа: Сб. ГОСТов. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 55 с.

Combined Triazole Disinfectants and Their Influence on the Growth and Development of Spring Wheat Seedlings

A. Yu. Kekalo^{a,#}, S. S. Khalikov^b, M. M. Ilyin^b, N. D. Chkanikov^b, and N. Yu. Zargaryan^a

^aUral Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the RAS
ul. Belinskiy 112a, Ekaterinburg 620142, Russia

^bA.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the RAS
ul. Vavilova 28/1, Moscow 119334, Russia

[#]E-mail: alena.kekalo@mail.ru

Seed treatment with fungicides is a crucial link in the plant protection system, and systemic drugs give the best effect. Therefore, it is very important to develop scientific foundations for the preparation of complex preparations with a low rate of consumption of the active substance and the inclusion of plant growth regulators that enhance growth processes and the yield of the main crop. In recent years, the directions of modification of known and practiced fungicides by various methods, including methods of mechanochemistry, have been promising. The problem of creating both new substances and their effective formulations remains urgent. Taking into account the prospects and high efficiency of triazole fungicides in the system of complex plant protection, the creation of multicomponent seed protectants of grain crops is proposed. The purpose of this study was to develop preparations based on tebuconazole (TBC) and propiconazole (PPC) in the form of solid dispersions (SD) and to study their biological activity on spring wheat plants in the conditions of the Trans-Urals. At the same time, the retardant effect of these triazoles was also studied with the help of the domestic growth regulator Floroxan. The use of new preparations on spring wheat made it possible to reduce the damage to the culture by root rot by 85–87%, productive bushiness increased by 6–11% compared to the control without treatment. A reliable increase in crop yield of 2.2 c/ha or 14% was obtained using preparation 2 (TD of the composition TBC : PPC : AG : silica = 1 : 1 : 7 : 1 + Phloroxane when the polysaccharide (AG) and the auxiliary substance of silica are included in the composition). The inclusion of the growth regulator Floroxan in the composition of the mordant mixture reduced the antioxidant effect of tebuconazole and stimulated the growth and development of wheat seedlings. It was proved that such a biological effect was achieved in conditions of drought of varying intensity during the growing season of 2021–2022.

Keywords: seed protectants, tebuconazole, propiconazole, growth regulator Floroxan, mechanochemistry, multicomponent preparations, biological efficacy.

УДК 631.871:595.772:631.524.821:633.31/.37

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БИОГУМУСА ЛИЧИНОК МУХИ ЧЕРНАЯ ЛЬВИНКА (*Hermetia illucens*) ПРИ ПРОРАСТАНИИ СЕМЯН ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР[§]

© 2023 г. К. А. Баштовенко¹, С. И. Лоскутов¹, Д. С. Рябухин^{1,*}¹Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН 191014 Санкт-Петербург, Литейный просп., 55, Россия

*E-mail: rdms@bk.ru

Поступила в редакцию 13.03.2023 г.

После доработки 20.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Самым перспективным и популярным насекомым в области переработки органических отходов является муха черная львинка (*Hermetia illucens*), личинки которой неприхотливы в еде и условиях выращивания. В качестве корма им подходит большинство видов органических отходов, которые после переваривания личинкой обогащаются различными питательными веществами и микроорганизмами, полезными для роста и развития растений. Экскременты личинок являются ценным и экологически чистым органическим удобрением (биогумусом) для выращивания растений. С целью проверить эффективность влияния биогумуса личинок черной львинки на процесс прорастания семян в лабораторных условиях, получали жидкие экстракты биогумуса путем экстрагирования дистиллированной водой и соединениями гидроксида калия (КОН) и пиррофосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Самым эффективным способом экстракции оказался метод обработки щелочью и пиррофосфатом натрия, при котором получена наиболее концентрированная вытяжка с концентрацией 2.44%. Все виды вытяжек биогумуса прошли биотестирование на прорастание семян гороха посевного (*Pisum sativum* L.) и люпина белого (*Lupinus albus* L.). По сравнению с показателями контрольных вариантов с дистиллированной водой все экстракты биогумуса оказали стимулирующее действие на прорастание семян, ускоряя их рост и развитие. Наиболее высокие показатели наблюдали в растворах щелочно-пиррофосфатного экстракта с величиной рН 6.7–6.8 в концентрациях 0.01 и 0.05%.

Ключевые слова: органические удобрения, муха черная львинка (*Hermetia illucens*), личинки, биогумус, зернобобовые культуры, горох, люпин.

DOI: 10.31857/S0002188123100046, **EDN:** QGUUQX

ВВЕДЕНИЕ

Личинки мухи черная львинка (*Hermetia illucens*) из семейства Львинок (*Stratiomyidae*) в процессе своего питания перерабатывают органические отходы, в результате чего их объем уменьшается более чем на 50% [1]. Эти переработанные отходы становятся ценным, экологически чистым биогумусом, практически лишенным патогенных бактерий, таких как, например, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. и др. [2], богатым доступными для растений питательными веществами, в основном соединениями с гумусовыми кислотами. Согласно работе [3], анализ данных химиче-

ского состава и свойств биогумуса от 22-х производителей баланс элементов в составе биогумуса мухи черная львинка (БЧЛ) менялся в зависимости от субстрата, на котором выращивали насекомых. Отмечено, что содержание азота составляло в среднем 3.39% сухого вещества с коэффициентом вариации (CV) = 0.2, P_2O_5 – 2.85% (CV = 0.36), K_2O – 3.47% (CV = 0.34).

БЧЛ можно использовать как органическое биоудобрение и регулятор роста растений, что показано в ряде исследований. Первое упоминание о тестировании биогумуса в качестве удобрения связано с выращиванием базилика и сорго [4], также описаны опыты со спаржевой фасолью [5], кукурузой [6], листьями салата и райграса [7], луком [8]. Зачастую в исследованиях использовали сухой биогумус в составе смесей с торфом,

[§] Работа выполнена в рамках тем НИР FGUS 2022-0017 и FGUS 2022-0017 государственного задания ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН.



Рис. 1. Внешний вид биогумуса личинок мухи черная львинка.

почвой и т.д. в различных пропорциях [4, 5, 7], либо водную вытяжку в пропорциях 1 : 10, 1 : 100, 1 : 1000 по массе [9, 10].

Известно, что предпосевная обработка семян растений регуляторами роста, особенно содержащими гуминовые кислоты, значительно улучшает посевные качества семян, ускоряет их всхожесть, рост и обеспечивает иммунитет к вредителям и патогенам. Цель работы – оценка агрономического потенциала концентрированных и разбавленных экстрактов БЧЛ как органического удобрения и проведение биотестирования полученных растворов на тест-растениях гороха посевного (*Pisum sativum* L.) и люпина белого (*Lupinus albus* L.) в лабораторных условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом данного исследования являлся БЧЛ (*Hermetia illucens*), полученный от ООО “Экобелок”, Московская обл., Шелковский р-н, п. Фряново. Биогумус имел вид сыпучей мелкогранулированной массы темно-коричневого цвета со специфическим запахом аммиака (рис. 1).

В состав биогумуса в основном входят различные соединения гуминовых кислот, поэтому, основываясь на работе [11], в качестве экстрагентов использовали нестерильную дистиллированную воду, КОН (АО “ВЕКТОН”, Россия), $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (ООО “Компонент-Реактив”, Россия), NaClO (ООО “АКВАХИМ”, Россия). Семена гороха посевного (*Pisum sativum* L.) сорта Софья и люпина белого (*Lupinus albus* L.) сорта Дега предоставлены к.б.н., старшим научным сотрудником и заведующей отделом сельскохозяйственной микробиологии НИИСХ Крыма А.И. Якубовской.

Экстракция биогумуса водой. Для получения водных вытяжек смешивали БЧЛ с дистиллированной водой в пропорциях 1 : 19 и 1 : 9. Через 1 сут осадок отфильтровывали через бумажный фильтр (красная линия), 100 мл водного раствора упаривали в вакууме ротационного испарителя для определения концентрации растворенного субстрата. В первом варианте концентрация растворимой в воде части биогумуса составила 0.54, во втором – 1.99%.

Экстракция биогумуса щелочным раствором. В мерной колбе смешивали 5.6 г КОН, 25 г биогумуса и доводили дистиллированной водой до 1 л, раствор настаивали 24 ч и далее отфильтровывали и упаривали в вакууме ротационного испарителя. Концентрация растворенного биогумуса в щелочной вытяжке была равна 1.15%, с вычетом растворенного в воде гидроксида калия.

Экстракция биогумуса раствором щелочи и пиррофосфата натрия. Для данного опыта в мерную колбу объемом 500 мл добавляли 2.8 г КОН, 15 г $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, 25 г влажного зоогумуса, дистиллированной водой доводили до метки 500 мл. Настаивали данный раствор 24 ч, затем фильтровали и упаривали в вакууме ротационного испарителя. Концентрация биогумуса в щелочно-пиррофосфатной вытяжке составила 2.44%, после вычета соответствующих количеств гидроксида калия и пиррофосфата натрия.

Определение влажности образцов. Определение влажности проводили по ГОСТ 16483.7-71 с некоторыми изменениями. Навеску БЧЛ весом 1 г сушили в сушильном шкафу при температуре $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$, добиваясь сходимости постоянной массы. Измерения проводили в 3-х повторностях.

Влажность пробы (W) (в %) вычисляли по формуле (1):

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

где m_0 – масса бюкса, г;

m_1 – масса бюкса с пробой до высушивания, г;

m_2 – масса бюкса с пробой после высушивания, г.

Определение зольности образцов. Определение зольности проводили по ГОСТ Р 56888-2016 с изменениями. Навеску 1 г БЧЛ в фарфоровом тигле сжигали в муфельной печи при температуре $(600 \pm 5)^\circ\text{C}$ до достижения постоянной массы. Охлаждали в эксикаторе до комнатной температуры. Измерение проводили в 3-х повторностях.

Таблица 1. Показатели прорастания гороха в опыте с кипячением водной вытяжки БЧЛ

Раствор	Повторность				Итого	
	1-я		2-я		Всхожесть, %	Длина корней, см
Всхожесть, %	Длина корней, см	Всхожесть, %	Длина корней, см	Всхожесть, %		
Водная вытяжка БЧЛ	65	3.41 ± 0.74	40	1.88 ± 0.64	52.5 ± 12.5	2.83 ± 0.61
Контроль	30	1.63 ± 0.94	25	1.56 ± 0.60	27.5 ± 2.5	1.60 ± 0.55

Зольность пробы (в %) вычисляли по формуле (2):

$$\text{Зольность} = \frac{W_2 - W_c}{W_1 - W_c} \times 100\%, \quad (2)$$

где W_c – масса пустого тигля, г;

W_1 – масса тигля с исходной навеской пробы, г;

W_2 – масса тигля с золой, г.

Биотестирование зоогумуса. Все вышеупомянутые вытяжки проходили проверку на эффективность как активаторы роста растений. Для этого семена гороха посевного (*Pisum sativum* L.) сорта Софья и люпина белого (*Lupinus albus* L.) сорта Дега предварительно стерилизовали в 1.8%-ном растворе гипохлорита натрия в течение 15 мин, промывали в дистиллированной воде по 5 мин не менее 4-х раз и помещали в стерильные чашки Петри с небольшим количеством изучаемого раствора. На каждый опыт приходилось по 2 повторности по 20–30 семян растений в каждой чашке Петри. Семена проращивали в сухом темном месте в течение 3–5 сут. По истечении времени у семян фиксировали всхожесть и длину отросших зародышевых корней. Контролем служила дистиллированная вода.

Всхожесть семян определяли по формуле (3):

$$X = \frac{n}{N} \times 100\%, \quad (3)$$

где X – всхожесть семян, %;

n – количество проросших семян;

N – общее количество семян.

Статистическую обработку данных, полученных в ходе исследования, проводили в программе Microsoft Office Excel 2007.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность водного экстракта. В результате водной экстракции зоогумуса получены 2 раствора с концентрацией 0.54% (соотношение БЧЛ : вода = 1 : 19, вариант 1) и 1.99% (соотноше-

ние БЧЛ : вода = 1 : 9, вариант 2). С использованием вытяжки варианта 1 провели 2 опыта на проращивание семян. В первом случае семена гороха замачивали в растворе, полученном после фильтрации водной вытяжки. В результате наблюдали подавление прорастания семян с последующим брожением, разрушением целостности семени и по истечении 5 сут превращение в кашеобразную массу содержимого чашки Петри.

Для следующего опыта отфильтрованную водную вытяжку кипятили в течение 5 мин на электрической плитке, охлаждали до комнатной температуры и смачивали семена гороха на чашках Петри. Показатели определяли на 5-е сут проращивания (табл. 1).

Показано, что водная вытяжка БЧЛ после ее нагревания оказывала стимулирующее действие на прорастание семян, ускоряя их рост и развитие.

Для определения степени насыщенности раствора водной вытяжки, подходящего как удобрение для растений, в опыте 3 использовали водную вытяжку варианта 2, которую разводили дистиллированной водой для получения растворов разных концентраций (0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.0%). Растворы проходили предварительную стерилизацию в сушильном шкафу при температуре (120 ± 5)°C в течение 3-х ч, после чего их охлаждали до комнатной температуры, смачивали семена гороха в чашках Петри и проращивали в течение 5-ти сут, затем определяли морфометрические показатели всхожести семян (рис. 2).

Среди изученных вариантов с концентрациями биогумуса наибольшая всхожесть семян гороха была в варианте с концентрацией 0.50%, в котором было 90% проросших семян. Длина зародышевых корней была больше всего при концентрации 0.10% и составила в среднем 1.59 ± ± 0.34 см. Однако эти растворы по показателям всхожести уступали дистиллированной воде, в которой взойшло 95% семян со средней длиной корней проростков 1.71 ± 0.42 см.

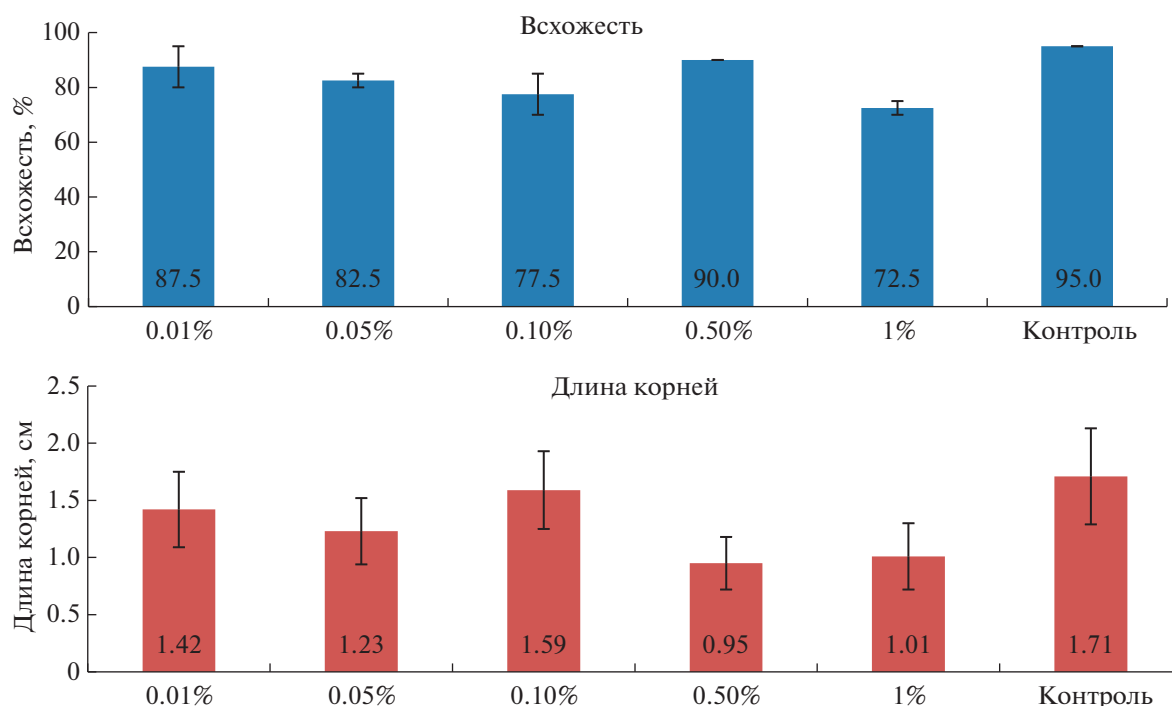


Рис. 2. Показатели прорастания семян гороха в опыте с использованием растворов водной вытяжки различных концентраций.

Эффективность щелочного экстракта. Вытяжка, полученная при щелочной экстракции БЧЛ, имела концентрацию растворенного биогуруса 1.15%, что по содержанию сухого остатка превосходило извлечение водой. Для данного опыта из щелочной вытяжки путем разбавления дистиллированной водой получали растворы меньших концентраций (0.02, 0.05, 0.20, 0.50%), которые добавляли в чашки Петри к семенам гороха. Показатели всхожести семян, которые определяли на 5-е сут после начала проращивания, показаны на рис. 3. Наивысшими показателями всхожести семян и средней длиной зародышевых корней обладал вариант с концентрацией 0.05%, что составили $83.70 \pm 6.30\%$ и 2.09 ± 0.33 см соответственно.

Эффективность щелочно-пирофосфатного экстракта. Экстракция биогуруса щелочью КОН и пирофосфатом натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ оказалась самым эффективным способом, показав наибольшую концентрацию веществ, перешедших из твердой фазы биогуруса в жидкую фазу раствора – 2.44%. Также стоит отметить, что в результате экстракции был нейтрализован неприятный запах биогуруса. С использованием щелочно-пирофосфатной вытяжки было проведено 3 эксперимента: опыт с растворами разных концентраций, опыт с нейтральными растворами различных концентраций, опыт с растворами разных концентраций в стерильных условиях. В первом опыте из вытяжки с добавлением дистиллированной воды го-

Таблица 2. Показатели прорастания семян при использовании растворов щелочно-пирофосфатной вытяжки БЧЛ различных концентраций

Вариант	Концентрация, %							
	0.01		0.05		0.50		1.0	
	1	2	11	2	1	2	1	2
Вытяжка БЧЛ	75 ± 5	2.54 ± 0.61	57.5 ± 2.5	1.49 ± 0.62	7.50 ± 2.50	0.87 ± 0.86	0	0
Контроль	1				1			
	57.5 ± 17.5				2.71 ± 0.51			

Примечание. В графе 1 – всхожесть, %; 2 – длина корней, см. То же в табл. 4.

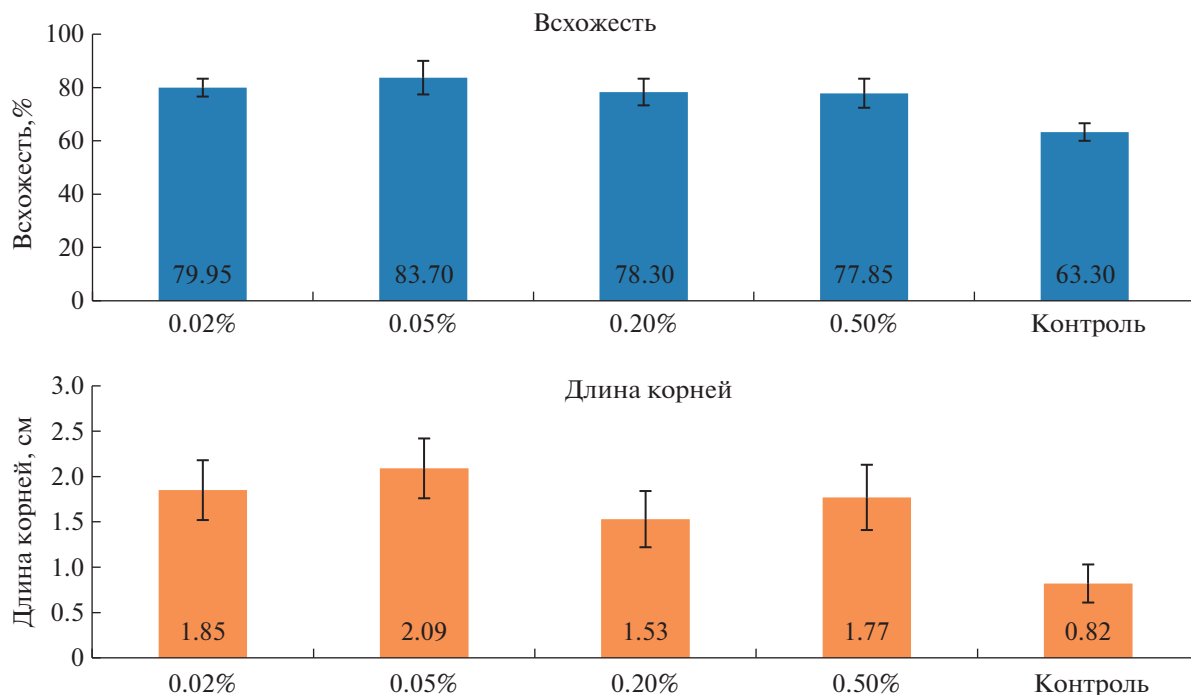


Рис. 3. Показатели прорастания семян гороха в опыте с использованием растворов БЧЛ щелочной вытяжки различных концентраций.

товили растворы различных концентраций (0.01, 0.05, 0.50, 1.0%). Их доливали в чашки Петри к семенам люпина и оставляли на проращивание на 3-е сут (табл. 2).

По итогам опыта показано, что чем больше была в питательном растворе концентрация выделяемых веществ, тем меньше было прорастание семян люпина, т.к. в растворе с концентрацией 0.01% проросло $75 \pm 5\%$ семян со средней длиной корней 2.54 ± 0.61 см, тогда как в растворе с концентрацией 0.05% эти показатели были равны $57.50 \pm 2.5\%$ проросших семян с длиной корней 1.49 ± 0.62 см соответственно.

Показатели pH исходной вытяжки и разведенных растворов были сильнощелочными (табл. 3). Известно, что большинство растений, в том числе и семейство Бобовые (*Fabaceae*), к которым относятся люпин и горох, предпочитают слабокислую или нейтральную кислотность почвы (pH 6.5–

7.0). Поэтому в опыте 2 готовили растворы, аналогичные по концентрации, но с нейтральной кислотностью среды (pH 6.7–6.8). Для опыта брали семена люпина и гороха, которые проращивали в течение 4-х сут (рис. 4).

Нейтрализация примененных растворов щелочно-пирофосфатной вытяжки положительно повлияла на прорастание семян, т.к. увеличились показатели их всхожести и средней длины корней, а в тех вариантах растворов, где в прошлом опыте не взошло ни одного семени, появились проростки. Как и ранее, наибольший эффект на прорастание семян люпина оказал раствор с концентрацией 0.01%, в котором доля всхожих семян составила $82.5 \pm 2.5\%$ и длина корней в среднем равнялась 3.25 ± 0.51 см.

Для прорастания семян гороха самыми благоприятными оказались растворы БЧЛ с концентрациями 0.01 и 0.05%, в которых доля всхожих семян составила 75.0 ± 1.7 и $76.7 \pm 10\%$ семян, а средняя длина корней – 2.71 ± 0.31 см и 2.01 ± 0.28 см соответственно.

Третий опыт с данной вытяжкой проводили в ламинарном боксе в асептических условиях с использованием растворов с нейтральной реакцией pH (6.7–6.8 ед.) в 2-х концентрациях 0.01 и 0.05%, которые отличались наилучшими результатами в предыдущих опытах. Растворы предварительно

Таблица 3. Величина pH щелочно-пирофосфатной вытяжки БЧЛ

pH	Концентрация, %				Маточный раствор (2.44%)
	0.01	0.05	0.5	1.0	
	9.7	10.2	10.9	11.0	11.2

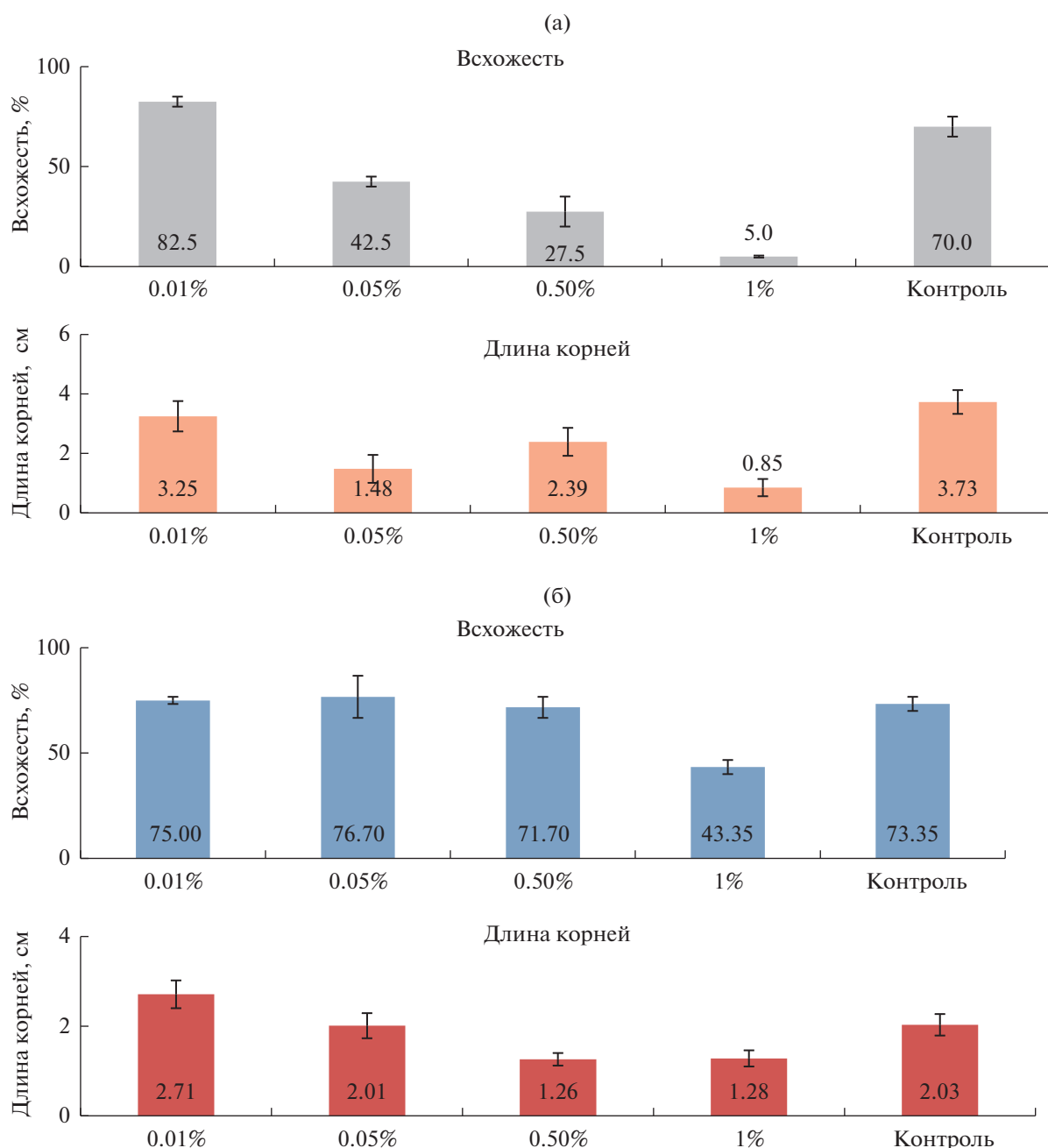


Рис. 4. Показатели прорастания семян люпина в опыте с использованием растворов БЧЛ щелочно-пирофосфатной вытяжки: (а) – различных концентраций, (б) – при нейтрализации данных растворов.

стерилизовали в автоклаве под давлением 2 атм, охлаждали до комнатной температуры и добавляли в стерильные чашки Петри к семенам гороха и люпина, которые проращивали 3 сут (табл. 4).

Показано, что обе концентрации оказались удачными для проращивания семян. В случае с проращиванием семян гороха наилучшая всхожесть зафиксирована в растворе с концентрацией 0.05% и была равна $91.7 \pm 5.0\%$, а наибольшая средняя длина корней в растворе с концентраци-

ей 0.01% составила 2.26 ± 0.79 см. Результаты проращивания семян люпина оказались противоположными, т.к. в варианте с концентрацией 0.01% была зафиксирована наибольшая всхожесть семян, равная $60 \pm 5\%$, а в варианте с концентрацией 0.05% отмечена самая большая длина корней, которая в среднем составила 2.31 ± 0.64 см.

Определение влажности и зольности образцов. Влажность образцов исходного и экстрагированного биогумуса различалась незначительно, при

Таблица 4. Показатели всхожести в стерильных условиях с использованием нейтральных растворов БЧЛ различных концентраций щелочно-пирофосфатной вытяжки

Растение	Раствор	Концентрация, %			
		0.01		0.05	
		1	2	1	2
Горох	Вытяжка БЧЛ	86.7 ± 6.7	2.26 ± 0.79	91.7 ± 5.0	2.01 ± 0.21
	Контроль	1		2	
		91.7 ± 1.7		1.69 ± 0.19	
Люпин	Вытяжка БЧЛ	60 ± 5	1.94 ± 0.43	45 ± 15	2.31 ± 0.64
	Контроль	1		2	
		45.0 ± 5.0		1.46 ± 0.52	

этом большее значение влажности образцов экстрагированного биогумуса объясняется его предшествующим насыщением водой при экстрагировании (табл. 5). Величина зольности образцов исходного биогумуса была больше, из чего можно предполагать, что при экстрагировании некоторая часть соединений перешла в водную фазу вытяжки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были рассмотрены 3 способа экстрагирования биогумуса мухи черная львинка (БЧЛ) и проведено биотестирование полученных вытяжек на семенах гороха посевного (*Pisum sativum* L.) и люпина белого (*Lupinus albus* L.). Самым эффективным способом экстракции оказался метод обработки гидроксидом калия и пирофосфатом натрия, при котором из небольшого количества материалов была получена наиболее концентрированная вытяжка с 2.44% сухого остатка.

По сравнению с водным контролем экстракты БЧЛ оказывали явное стимулирующее действие на прорастание семян тест-растений, ускоряя их рост и развитие. При сравнении результатов влияния экстрактов биогумуса на прорастание семян наиболее высокие показатели наблюдали в рас-

творах щелочно-пирофосфатного экстракта с рН 6.7–6.8 в концентрациях 0.01 и 0.05.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Антюфеева Е.С. Использование пищевых отходов для выращивания личинок мухи *Hermetia illucens* (краткий обзор зарубежной литературы) // Эконом. строит-ва и природопольз-я. 2020. № 4 (77). С. 17–30.
2. Setti L., Francia E., Pulvirenti A., Gigliano S., Zaccardelli M., Pane C. et al. Use of Black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), *Diptera: Stratiomyidae*) larvae processing residue in peat-based growing media // Waste Manag. 2019. V. 95. P. 278–288.
3. Gärtling D., Schulz H. Compilation of Black soldier fly frass analyses // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2022. V. 22. № 1. P. 937–943.
4. Newton L., Sheppard C., Watson D.W., Burtle G., Dove R. Using the Black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure // Animal Poultry Waste Manag. Cent. North Carolina State University, Raleigh, NC, 2005. V. 17. № 2005. 18 p.
5. Anggraeni D. The Effect of bioconversion fertilizer palm kernel meal (BFPKM) as fertilizer for the growth of *Vigna unguiculata* L. Walp (Yard Long Bean) var. *Mutiara*: Diss. Thesis for S2 graduation. University of Indonesia, 2010. 95 p.
6. Alattar M.A., Alattar F.N., Popa R. Effects of microaerobic fermentation and Black soldier fly larvae food scrap processing residues on the growth of corn plants (*Zea mays*) // Plant Sci. Today. 2016. V. 3. № 1. P. 57–62.
7. Kebli H., Sinaj S. Potential agronomique d'un engrais naturel à base de digestats de larves de mouches // Recherche agronomique suisse. 2017. V. 8. № 3. P. 88–95.
8. Zahn N.H., Quilliam R. The effects of insect frass created by *Hermetia illucens* on spring onion growth and soil fertility // Univ. Stirl. 2017. P. 1–65.

Таблица 5. Показатели влажности и зольности образцов БЧЛ

Образец	Влажность	Зольность
	%	
Исходный биогумус	16.2 ± 0.6	3.95 ± 0.85
Биогумус после экстракции	17.0 ± 0.204	2.88 ± 0.63

9. Гончарова Е.Н., Василенко М.И., Кузнецова О.И. Выращивание горчицы белой с использованием фитостимулятора из зоокомпоста // Инновации в АПК: пробл. и перспект. 2020. № 4 (28). С. 137–144.
10. Гончарова Е.Н., Василенко М.И., Кузнецова О.И., Курзнев И.Р., Кучерова Ю.О. Фитостимулятор из отходов культивирования мухи Черная львинка // Chem. Bul. 2021. Т. 4. № 3. С. 95–105.
11. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / Под ред. Е.И. Ермакова. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 248 с.

Effectiveness of the Use of Vermicompost Larvae of the Black Lion Fly (*Hermetia illucens*) when Germinating Seeds of Leguminous Crops

K. A. Bashtovenko^a, S. I. Loskutov^a, and D. S. Ryabukhin^{a, #}

^aAll-Russia Research Institute for Food Additives –
Branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS
St. Petersburg, Liteyny prosp. 55, 191014, Russia

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

The most promising and popular insect in the field of organic waste processing is the black lion fly (*Hermetia illucens*), whose larvae are unpretentious in food and growing conditions. As a feed, most types of organic waste are suitable for them, which, after being digested by the larva, are enriched with various nutrients and microorganisms useful for the growth and development of plants. Larval excrement is a valuable and environmentally friendly organic fertilizer (biohumus) for growing plants. In order to test the effectiveness of the effect of biohumus of black lion larvae on the process of seed germination in laboratory conditions, liquid extracts of biohumus were obtained by extraction with distilled water and compounds of potassium hydroxide (KOH) and sodium pyrophosphate (Na₄P₂O₇). The most effective extraction method turned out to be the method of treatment with alkali and sodium pyrophosphate, in which the most concentrated extract with a concentration of 2.44% was obtained. All types of extracts of vermicompost have been biotested for germination of seeds of seed peas (*Pisum sativum* L.) and white lupin (*Lupinus albus* L.). Compared with the indicators of the control variants with distilled water, all extracts of vermicompost had a stimulating effect on seed germination, accelerating their growth and development. The highest rates were observed in solutions of alkaline pyrophosphate extract with a pH value of 6.7–6.8 at concentrations of 0.01 and 0.05%.

Keywords: organic fertilizers, black lion fly (*Hermetia illucens*), larvae, vermicompost, legumes, peas, lupin.

УДК: 631.811.93:631.559:635.64

ВЛИЯНИЕ АМОРФНОГО КРЕМНЕЗЕМА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО ТОМАТОВ[§]

© 2023 г. Е. А. Бочарникова^{1,*}, А. А. Касацкий², В. В. Матыченков¹

¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

²ООО “Экопроект”

115551 Москва, Шипиловский пр., 39 корп. 1, помещ. 1, офис 6, Россия

*E-mail: mswk@rambler.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 29.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Томаты относятся к одним из наиболее популярных овощей, улучшение их вкусового и биохимического качества возможно в результате снижения содержания нитратов и увеличения содержания сахара. В вегетационных экспериментах изучали влияние аморфного тонкодисперсного кремнезема на продуктивность и качество томатов. Кремнезем вносили в смесь серой лесной почвы и промытого песка в дозах 0.1, 0.2 и 0.3 г/сосуд, что соответствовало 100, 200 и 300 кг/га, на фоне внесения комплексных минеральных удобрений. Показали, что улучшение кремниевого питания томатов существенно повысило их урожайность на 52–70%. Также было установлено улучшение качества плодов в результате снижения содержания нитратов на 20–40% и увеличения содержания сахара на 12.9–50.9%. Статистический анализ полученных данных выявил, что концентрация монокремниевой кислоты в обработанных диоксидом кремния грунтах тесно положительно коррелировала с урожайностью томатов, а также содержанием сахара в плодах и отрицательно коррелировала с содержанием нитратов.

Ключевые слова: аморфный кремнезем, продуктивность, качество, томаты.

DOI: 10.31857/S0002188123100058, **EDN:** EOZLGC

ВВЕДЕНИЕ

Томаты являются вторым наиболее распространенным после картофеля овощем в мире и занимают площадь >2.2 млн га [1]. Популярность томатов обусловлена высокой урожайностью, относительной простотой возделывания, хорошей адаптированностью к разным климатическим условиям и высокой пищевой ценностью. Присутствующий в их составе ликопин является мощным антиоксидантом и обладает противоопухолевым действием.

Широко распространенное в современном растениеводстве интенсивное применение химических удобрений приводит к ряду негативных последствий, включая снижение качества продукции, в частности, из-за чрезмерного содержания нитратов [2]. Поэтому в настоящее время остро встает проблема качества выращиваемых томатов [3].

Качество томатов определяется множеством параметров и зависит от комплекса факторов, таких как практика возделывания, генетические особенности, условия окружающей среды и другие. Наиболее часто товарное качество томатов определяют по внешней привлекательности плодов (цвету, форме, размеру, крепости, текстуре и др.) [3, 4]. Однако сейчас все большее значение для потребителя приобретают биохимические показатели качества томатов, определяющие их пищевую ценность, такие как содержание сахаров, витаминов, важных макро- и микроэлементов [4].

Многочисленные исследования, проведенные в последние 2 десятилетия, свидетельствуют о перспективности применения кремниевых препаратов для повышения урожайности сельскохозяйственных растений, а также качества плодов, включая томаты [5, 6]. Было показано, что помимо роста урожайности Si-содержащие препараты обеспечивают увеличение содержания сахара и витаминов в томатах и снижение в плодах тома-

[§] Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6.

тов содержания нитратов [6, 7]. Хотя результаты исследований свидетельствуют об улучшении качества и урожайности томатов при внесении кремниевых препаратов, эти данные не являются систематическими и часто положительное действие Si-содержащих препаратов объясняют присутствием примесей, таких как кальций, железо, калий и др. Цель работы – исследование влияния аморфного диоксида кремния на качество томатов при выращивании в условиях теплицы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вегетационный опыт проводили в теплице с использованием в качестве грунта верхнего горизонта серой лесной среднесуглинистой почвы на покровных суглинках (содержание углерода – 1.25%, рН 6.4, емкость поглощения – 15 мг-экв/100 г почвы, общее содержание фосфора – 725 мг/кг, общее содержание калия – 203 мг/кг) и промытого кварцевого песка. Эксперименты проводили в пластиковых сосудах объемом 1 л.

Перед посадкой семян в грунт вносили следующие минеральные удобрения: азот в форме нитрата аммония (NH_4NO_3) в дозе 114 кг/га, фосфор в форме двойного суперфосфата ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) в дозе 110 кг/га и калий в форме хлорида калия в дозе 71.7 кг/га. В качестве кремниевого удобрения использовали тонкодисперсный диоксид кремния (производство Салаватского катализаторного завода, Башкортостан) с содержанием SiO_2 98.6–99.2%, Na – 0.30–0.41%, удельной поверхностью – 160–180 м²/г, рН_{Н₂О} 7.7. Дозы внесения SiO_2 составляли 0, 100, 200 и 300 кг/га или 0, 0.1, 0.2 и 0.3 г/сосуд.

Семена томатов (*Solanum lycopersicum*, сорт Аврора) замачивали в 0.1%-ном растворе пероксида водорода в течение 10 мин, затем раствор заменили на дистиллированную воду и семена проращивали в течение 24 ч при температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$, после чего высаживали в сосуды. Растения выращивали при естественном освещении и ежедневном поливе дистиллированной водой для поддержания влажности грунта 20–25%. Опыт проводили в пятикратной повторности.

Сбор урожая начали через 1.5 мес. после посадки и проводили в течение 2-х мес. В плодах, собранных в конце эксперимента, анализировали содержание растворимых углеводов (сахаров) с помощью рефрактометра (КН-512АТС, Kehang, Китай) и нитратов ионометром (Twin NO_3^- , В-343, Ногіба, Japan).

После уборки урожая отбирали образцы почвы. Во влажных почвенных образцах определяли

Таблица 1. Влияние аморфного кремнезема на урожайность томатов

Доза SiO_2 , кг/га	Масса томатов, кг/растение	Количество плодов, шт./растение	Средняя масса 1-го томата, г
Серая лесная почва			
0	2.5	9.4	266
100	2.8	9.8	286
200	3.2	9.9	323
300	3.8	11.3	336
Кварцевый песок			
0	1.7	9.1	187
100	2.0	9.5	211
200	2.6	9.9	263
300	2.9	10.4	279
<i>НСР</i> ₀₅	0.2	0.9	21

содержание монокремниевой кислоты. В пластиковую пробирку на 50 мл помещали навеску 6 г и заливали 30 мл дистиллированной воды. Суспензию встряхивали в течение 1 ч и центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. Полученный раствор немедленно анализировали на содержание монокремниевой кислоты по методу Маллин–Райли, который позволяет избежать мешающее влияние фосфора [17]. В высушенных почвенных образцах измеряли содержание кислоторастворимых форм кремния и фосфора. В колбу на 50 мл помещали 2 г почвы и заливали 20 мл 0.1 н. HCl . Суспензию встряхивали в течение 1 ч и центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. В полученном растворе измеряли концентрацию кремния и фосфора с использованием методов Маллин–Райли и Кирсанова соответственно [8, 9]. Все анализы проводили в трехкратной повторности. Для расчетов наименьшей существенной разницы при 5%-ном уровне значимости использовали программу Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В среднем урожайность томатов на серой лесной почве была больше на 32%, чем на песке (табл. 1). Это связано с более высоким уровнем плодородия серой лесной почвы по сравнению с песком, а также с более интенсивным выносом питательных элементов из сосудов с песком. Внесение аморфного кремнезема существенно увеличило урожайность томатов, при этом наблюдали увеличение как количества плодов на одном кусте, так и средней массы плода. На серой лесной почве максимальное увеличение урожайности

Таблица 2. Влияние аморфного кремнезема на содержание нитратов и углеводов в томатах

Доза SiO ₂ , кг/га	NO ₃ ⁻	Углеводы
	мг/кг	
Серая лесная почва		
0	96.4	38.5
100	71.3	43.5
200	65.8	44.8
300	55.3	49.5
Кварцевый песок		
0	87.4	30.2
100	69.4	35.8
200	65.9	40.5
300	57.8	45.6
<i>HCP</i> ₀₅	4.5	4.0

сти составило 52, на песке — 70%. Это соответствовало литературным данным, которые показали, что на более бедных почвах эффективность применения кремниевых препаратов больше [10].

Внесение диоксида кремния также обеспечило улучшение качества томатов, которое выразилось в снижении содержания нитратов в плодах и увеличении содержания углеводов (табл. 2). Впервые способность кремниевых препаратов влиять на накопление нитратов в растениях была отмечена в 1976 г. [11]. Авторы установили, что в условиях дефицита азотного питания применение силиката натрия увеличило содержание нитратов в пшенице, однако при избытке азотного питания наблюдали уменьшение содержания нитратов под действием кремниевого препарата. В нашем эксперименте оба грунта характеризовались высоким содержанием азота благодаря внесению нитрата аммония, и внесение диоксида кремния привело к уменьшению содержания нитратов на 26–40 и на 20–34% в томатах, выращенных на серой лесной почве и кварцевом песке соответственно. Механизмы, обуславливающие влияние кремниевых препаратов на содержание нитратов в плодах и листьях растений, изучены плохо. Можно предположить, что действие кремния было связано с универсальной способностью его активных форм регулировать транспорт неорганических и органических молекул по апопласту и симпласту [12, 13].

Влияние кремниевых препаратов на содержание в растениях сахаров известно давно [14]. Было показано, что улучшение кремниевого питания приводит к увеличению содержания сахаров в сахарном тростнике, сахарной свекле, яблоках,

Таблица 3. Влияние аморфного кремнезема на содержание водо- и кислоторастворимого кремния и кислоторастворимого фосфора в грунте

Доза SiO ₂ , кг/га	Водо- растворимый Si	Кислото- растворимый Si	Кислото- растворимый P ₂ O ₅
	мг/кг		
Серая лесная почва			
0	14.5	245	58.4
100	19.7	267	64.3
200	23.5	278	73.2
300	24.8	283	75.3
Кварцевый песок			
0	5.8	187	34.4
100	12.8	202	38.3
200	19.6	213	41.4
300	20.5	224	43.3
<i>HCP</i> ₀₅	1.4	20	4.2

клубнике и томатах [6, 7, 15–17]. Согласно нашим данным, внесение диоксида кремния позволило увеличить содержание углеводов на 12.9–28.5% в томатах на серой лесной почве и на 18.5–50.9% — на кварцевом песке. В настоящее время механизм, ответственный за увеличение содержания углеводов в растениях при оптимизации кремниевого питания, неизвестен. Можно предположить, что дополнительное кремниевое питание растений стимулирует активность метаболических процессов, в том числе синтез углеводов. Как указывали выше, активные формы кремния также могут влиять на транспортную систему растений, возможно, включая транспорт углеводов [12, 13]. Доказательство этих гипотез требует проведения специальных фундаментальных исследований.

Содержание водорастворимого кремния и кислоторастворимых форм Si и P в грунте представлено в табл. 3. Внесение аморфного кремнезема привело к увеличению содержания водорастворимого Si от 14.5 до 24.8 мг/кг и от 5.8 до 20.5 мг/кг в серой лесной почве и кварцевом песке соответственно. Кроме того, увеличилось содержание кислоторастворимых форм кремния.

Также в почве отмечено увеличение доступно для растений фосфора, что могло быть обусловлено 2-мя процессами. Во-первых, монокремниевая кислота может реагировать с трудно-растворимыми фосфатами, вытесняя фосфат-анион в почвенный раствор [16]. Скорее всего данный механизм обеспечил увеличение содер-

Таблица 4. Коэффициенты корреляции (r) между содержанием водорастворимого и кислоторастворимого кремния в грунте и количественными и качественными показателями томатов

Параметр	Водорастворимый Si	Кислоторастворимый Si
Серая лесная почва		
Урожайность	0.919	0.900
Количество плодов с одного куста	0.783	0.772
Средний вес одного плода	0.973	0.951
Содержание нитратов	-0.977	-0.988
Содержание углеводов	0.947	0.949
Содержание кислоторастворимого фосфора в грунте	0.986	0.969
Кварцевый песок		
Урожайность	0.966	0.982
Количество плодов с одного куста	0.943	0.992
Средний вес одного плода	0.974	0.974
Содержание нитратов	-0.953	-0.973
Содержание углеводов	0.962	0.998
Содержание кислоторастворимого фосфора в грунте	0.987	0.996

жания кислоторастворимого фосфора в серой лесной почве. Во-вторых, при увеличении концентрации монокремниевой кислоты улучшаются сорбционные свойства почв, что приводит к снижению выноса фосфора [17]. Благодаря этому механизму, по-видимому, произошло увеличение доступного для растений фосфора в кварцевом песке.

При внесении аморфного кремнезема в серую лесную почву и кварцевый песок изменялось содержание монокремниевой кислоты и кислоторастворимого кремния. Кислоторастворимый кремний является интегрированным показателем, характеризующим содержание как соединений кремния (моно- и поликремниевых кислот) в почвенном растворе, так и твердых соединений кремния с относительно высокой растворимостью [8]. С целью определения, какой из данных параметров преимущественно влияет на продуктивность и качество томатов, были вычислены коэффициенты корреляции (табл. 4).

Проведенные вычисления показали тесную корреляцию между содержанием монокремниевой кислоты и кислоторастворимого кремния в почве и такими параметрами как урожайность, средний вес одного плода, содержание сахара в плодах, а также содержание кислоторастворимого фосфора в серой лесной почве и кварцевом песке. Содержание водорастворимого кремния лучше коррелировало с количеством плодов с одного растения, выращенного на песке, чем в растениях на серой лесной почве. Зависимость между содержанием нитратов в плодах томатов и

содержанием монокремниевой кислоты и кислоторастворимого кремния в обоих грунтах характеризовалась отрицательными коэффициентами корреляции. Во всех вариантах концентрация монокремниевой кислоты лучше коррелировала с исследованными параметрами по сравнению с концентрацией кислоторастворимого кремния. Отсюда можно сделать вывод, что именно монокремниевая кислота является основным фактором, влияющим на продуктивность и качественные характеристики томатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что улучшение кремниевого питания томатов существенно повысило их урожайность на 52–70%. Также было установлено улучшение качества плодов в результате снижения содержания нитратов на 20–40% и увеличения содержания сахара на 12.9–50.9%. Статистический анализ полученных данных выявил, что концентрация монокремниевой кислоты в обработанных диоксидом кремния почвах тесно положительно коррелировала с урожайностью томатов, а также содержанием сахара в плодах и отрицательно коррелировала с содержанием нитратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Villareal R.L.* Tomatoes in the tropics. CRC Press, 2019 p.
2. *Ye L., Zhao X., Bao E., Li J., Zou Z., Cao K.* Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization im-

- proves soil fertility and enhances tomato yield and quality // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–11.
3. Bertin N., Génard M. Tomato quality as influenced by preharvest factors // *Sc. Horticult.* 2018. V. 233. P. 264–276.
 4. Coyago-Cruz E., Corell M., Moriana A., Mapelli-Brahm P., Hernanz D., Stinco C.M., Meléndez-Martínez A.J. Study of commercial quality parameters, sugars, phenolics, carotenoids and plastids in different tomato varieties // *Food Chem.* 2019. V. 277. P. 480–489.
 5. Sayed E.G., Mahmoud A.W.M., El-Mogy M.M., Ali M.A., Fahmy M.A., Tawfic G.A. The effective role of nano-silicon application in improving the productivity and quality of grafted tomato grown under salinity stress // *Horticulturæ.* 2022. V. 8. № 4. P. 293.
 6. Khomyakov D.M., Wei Xiao, Xiong Ying, Bocharnikova E.A., Matichenkov V.V. Nature-like agricultural chemicals in food safety and soil fertility // *Mosc. Univ. Soil Sci. Bul.* 2020. V. 75. № 2. P. 87–93.
 7. Matichenkov V., Bocharnikova E. Si in horticultural industry // *Plant mineral nutrition and pesticide management.* Amsterdam: Elsevier, 2004. V. 2. P. 217–228.
 8. Матыченков В.В. Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // *Агрохимия.* 2007. № 7. С. 22–27.
 9. Рябинина О.В., Матвеева Н.В. Химические, физические и биологические методы исследования почв. Иркутск: ИрГАУ им. А.А. Ежовского, 2017. 129 с.
 10. Prakash N.B., Savant N.K., Sonar K.R. Silicon in Indian agriculture. New Delhi: West Publishing House, 2018. 198 p.
 11. Wallace A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake // *Soil Sci.* 1989. V. 147. № 6. P. 457–460.
 12. Mehrabanjoubani P., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R., Aghdasi M. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants // *Pedosphere.* 2015. V. 25. № 2. P. 192–201.
 13. Wei W., Ji X., Saihua L., Bocharnikova E., Matichenkov V. Effect of monosilicic and polysilicic acids on Cd transport in rice, a laboratory test // *J. Plant Growth Regul.* 2022. V. 41. P. 818–829.
 14. Anderson D.L., Jones D.B., Snyder G.H. Response of a rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols // *Agron. J.* 1987. V. 79. № 3. P. 531–535.
 15. Artyszak A. Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality – A literature review in Europe // *Plants.* 2018. V. 7. № 3. P. 54.
 16. Soppelsa S., Kelderer M., Testolin R., Zanotelli D., Andreotti C. Effect of biostimulants on apple quality at harvest and after storage // *Agronomy.* 2020. V. 10. № 8. P. 1214.
 17. Elkhatib H., Gabr S.M., Roshdy A.H., Al-Haleem A., Mostafa M. The impacts of silicon and salicylic acid amendments on yield and fruit quality of salinity stressed tomato plants // *Alexandria Science. Exchange J.* 2017. V. 38. P. 933–939.
 18. Матыченков И.В., Пахненко Е.П. Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния // *Вестн. Ульяновск. ГСХА.* 2013. № 3. С. 24–28.
 19. Matichenkov V., Bocharnikova E., Campbell J. Reduction in nutrient leaching from sandy soils by Si-rich materials: Laboratory, greenhouse and field studies // *Soil Till. Res.* 2020. V. 196. 104450.

Effect of Amorphous Silicon Dioxide on Productivity and Quality of Tomato

E. A. Bocharnikova^{a, #}, A. A. Kasatskii^b, and V.B. Matichenkov^a

^a*Institute of Basic Biological Problems, RAS
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b*LLC “Ecoproject”
Shipilovsky prosp. 39 bldg. 1, room/ 1, office 6, Moscow 115551, Russia*

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

Tomatoes are one of the most popular vegetables, improving their taste and biochemical quality is possible as a result of reducing the content of nitrates and increasing the sugar content. The effect of amorphous fine silica on the productivity and quality of tomatoes was studied in vegetation experiments. Silica was introduced into a mixture of gray forest soil and washed sand in doses of 0.1, 0.2 and 0.3 g/vessel, which corresponded to 100, 200 and 300 kg/ha, against the background of complex mineral fertilizers. It was shown that the improvement of silicon nutrition of tomatoes significantly increased their yield by 52–70%. There was also an improvement in fruit quality as a result of a 20–40% reduction in nitrate content and an increase in sugar content by 12.9–50.9%. Statistical analysis of the obtained data revealed that the concentration of monosilicon acid in soils treated with silicon dioxide was closely positively correlated with the yield of tomatoes, as well as the sugar content in fruits and negatively correlated with the content of nitrates.

Keywords: amorphous silica, productivity, quality, tomatoes.

УДК 631.811.93:631.588.5

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ ПОРИСТЫХ НАНОЧАСТИЦ SiO₂, СОДЕРЖАЩИХ 9,10-ДИФЕНИЛАНТРАЦЕН, В АГРОФОТОНИКЕ[§]

© 2023 г. Б. М. Гареев^{1,*}, Г. Л. Шарипов¹, О. В. Ласточкина²

¹Институт нефтехимии и катализа — обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450075 Уфа, просп. Октября, 141, Россия

²Институт биохимии и генетики — обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 71, Россия

*E-mail: gareev-bulat@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Ультразвуковым диспергированием получена водная коллоидная суспензия наночастиц пористого диоксида кремния, содержащая органический люминофор 9,10-дифенилантрацен. Средний размер наночастиц суспензии — 15–25 нм. Данная суспензия обладает характерным спектром поглощения для дифенилантрацена в области от 345 до 420 нм и спектром фотолюминесценции в области от 400 до 550 нм. Полученная суспензия использована для полива при выращивании луковичных растений (лук репчатый, лилии и гладиолусы) в условиях короткого светового периода с дополнительным освещением фитолампой на основе светодиодов с красным и синим спектрами свечения. Установлено, что применение этой суспензии с наночастицами, попадающими в растения в качестве искусственного фотосинтетического пигмента, ускорило рост луковичных растений в среднем на 15–20% по сравнению с контрольными образцами при одинаковых условиях освещения.

Ключевые слова: свет, LED-лампы, суспензия наночастиц, диоксид кремния, фотолюминесценция, 9,10-дифенилантрацен, рост, лук репчатый, лилия, гладиолус.

DOI: 10.31857/S000218812310006X, **EDN:** TKWBDS

ВВЕДЕНИЕ

Освещение играет ключевую роль в ходе вегетативного роста растений в природе [1–4]. При недостатке света происходит замедление всех биологических процессов, вплоть до остановки роста [5]. Например, такую картину можно наблюдать при выращивании овощей и цветов в теплицах в зимний период, когда световой день не превышает 7–9 ч. Для устранения дефицита света применяют различные дополнительные источники света, такие как натриевые и более экономичные светодиодные лампы [6]. Быстрое развитие технологий освещения с использованием светоизлучающих диодов (LED) привело к увеличению применения этой технологии для освещения в закрытых садоводческих системах [7, 8]. Системы LED освещения имеют важные преимущества перед традиционным освещением (т.е. люминесцентными или натриевыми лампами)

благодаря своему спектральному составу, долговечности, специфике длины волны, низкому тепловому излучению и энергоэффективности [9–12]. Кроме того, в системах выращивания растений светодиоды позволяют модифицировать спектр в соответствии с требованиями разных видов растений. Влияние состава светового спектра на продукционные свойства и на содержание биологически активных соединений в овощах общеизвестно [13–15]. Однако реакция растений на свет различается в зависимости от условий освещения, времени года, генотипа, методов выращивания и многих других факторов [7, 8].

Искусственное освещение при недостатке естественного освещения ускоряет процесс фотосинтеза, что благоприятно влияет на рост растений [12, 16]. Свет поглощается растительными пигментами. Хлорофиллы *a* и *b* являются основными фотосинтетическими пигментами растений. Они в основном поглощают синие и красные длины волн светового спектра. Для процес-

[§] Работа выполнена в рамках государственного задания FMRS-2022-0077.

сов фотосинтеза и роста растений наиболее эффективны красный, синий и совместно красный и синий цвета светодиодных ламп [17], поскольку они являются основными источниками энергии для фотосинтетической ассимиляции углекислого газа растениями. В процессе фотосинтеза молекула хлорофилла поглощает световую энергию, которая затем используется в фотохимической реакции взаимодействия углекислого газа и воды с образованием органических веществ [18]. После передачи поглощенной энергии на запуск реакций фотосинтеза молекула хлорофилла возвращается в исходное состояние. Хотя максимум непрерывного спектра солнечного излучения расположен в “зеленой” области 550 нм, поглощается хлорофиллом преимущественно синий, частично красный, свет из солнечного спектра. Растения могут использовать и свет с теми длинами волн, которые слабо поглощаются хлорофиллом. Энергию фотонов при этом улавливают другие фотосинтетические пигменты, которые затем передают энергию хлорофиллу.

Для ускорения фотосинтеза используют и достижения нанотехнологий. В работе американских исследователей показано, что за счет внедрения углеродных нанотрубок в хлоропласты, у растений на 30% возросла способность к фотосинтезу, а также появилась чувствительность к газам, загрязняющим окружающую среду [19].

В данной работе в качестве искусственного фотосинтетического пигмента использован органический люминофор 9,10-дифенилантрацен (ДФА) [20]. Этот выбор обусловлен тем, что для ДФА квантовый выход люминесценции равен единице, т.е. весь поглощенный свет будет переизлучаться, но главное — это характерная для ДФА полоса фотолюминесценции (ФЛ) в области 430 нм. Хлорофилл в данной области имеет интенсивную полосу поглощения. Мы предположили, что фотоны света, поглотившись ДФА в той части спектра, которая не очень интенсивно поглощается хлорофиллом, но будучи переизлученными в область максимального его поглощения, будут способствовать более интенсивному фотосинтезу. Однако ДФА плохо растворим в воде, и при простом смешивании с водой он не будет попадать в клетки растений через корневую систему. Чтобы решить эту проблему, была применена апробированная нами ранее методика приготовления водных коллоидных суспензий поронасыщенных наночастиц диоксида кремния, содержащих молекулы люминофора. Подробная методика приготовления таких суспензий описана в работе [21].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Микро- и мезопористый порошок SiO_2 синтезирован по методике, описанной в работе [22]. Насыщение пор диоксида кремния 9,10-дифенилантраценом проводили пропиткой из раствора. Для этого ДФА (х.ч., $m = 0.14$ мг) растворяли в 5 мл хлороформа (х.ч.), добавляли в раствор порошок SiO_2 ($m = 0.2$ г), далее растворитель удаляли вакуумированием. Для получения водной суспензии наночастиц сухой порошок SiO_2 с нанесенным ДФА засыпали в термостатируемую ($T_{\text{раств}} = 10\text{--}15^\circ\text{C}$) кювету с 40 мл бидистиллированной воды. Далее сонодиспергированием этой взвеси на аппарате для многопузырькового сонолиза УЗДН-2Т под действием ультразвука ($f = 22$ кГц, $P = 30$ Вт, $t = 1$ ч) была приготовлена водная суспензия. Фильтрацией через мембранный фильтр МФАС-Б-1 с размером пор 0.05 мкм (Владипор, Россия) выделяли нанодисперсную фракцию этой суспензии. Измерение размеров наночастиц SiO_2 в воде после пропускания через фильтр было проведено методом лазерного рассеяния на приборе Salid-7101 (Shimadzu, Япония).

Для дополнительного освещения растений использовали светодиодную фитолампу Т8 “Фито” мощностью 9 Вт, фирмы TDM Electric (Китай), излучающую свет в красно-синей областях спектра, с длиной волны красного спектра 640 нм и синего спектра — 450 нм. Использовали также синюю светодиодную ленту Ареугоп (Китай) мощностью 14.4 Вт/м ($\lambda = 400$ нм) и красную светодиодную ленту Ареугоп (Китай) мощностью 8 Вт/м ($\lambda = 630$ нм). Спектры фотолюминесценции суспензий, а также спектральный состав излучения светодиодов регистрировали спектрофлуориметром Fluorolog-3 (Horiba Jobin Yvon, Франция). Фотографии наночастиц на твердой подложке были получены с помощью электронного сканирующего микроскопа Hitachi Regulus SU 8220 (Япония). Для проращивания лукович растений использовали готовый торфяной грунт универсальный (ООО “Сокол”, Россия) с нейтральным рН 6.5. Кислотность почвы определяли цифровым рН-метром рН-150М (“Теплоприбор”, Россия). Объектами исследования служили лук репчатый (*Allium cepa* L.) сорта Столовый, гладиолус (*Gladiolus*) сортов Sunshine и Мадагаскар и лилии (*Lilium asiatic*) сорта Розеллас дрим. Луковичи растений были приобретены в специализированной торговой точке. Исследование по выращиванию растений под фитолампой на основе светодиодных излучателей с синим и красным спектрами света (К + С, 50% красный (560–700 нм) + 50% синий (400–500 нм)), отдельно синим спектром (С)

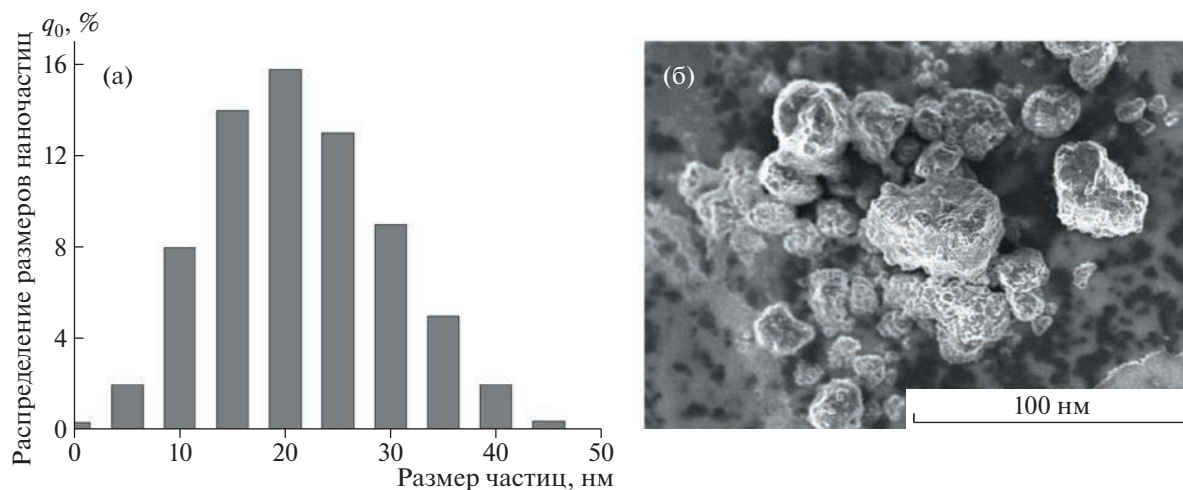


Рис. 1. Морфологические характеристики наночастиц SiO₂ с нанесенным ДФА: (а) – в водной суспензии, (б) – на твердой подложке.

(560–700 нм) и красным спектром (К) (400–500 нм) проводили в закрытом помещении без доступа солнечного света. В качестве контрольного варианта использовали естественное комнатное освещение. Во всех вариантах выращивания интенсивность света или плотность потока фотосинтетических фотонов (photon flux density, *PPFD*) составляла $250 \pm 10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Все растения подвергали одинаковым контролируемым условиям, т.е. 15-часовой фотопериод, температура воздуха 18–22°C, относительная влажность воздуха 60–70%. Измерения температуры и влажности воздуха проводили гигрометром ВИТ-1 (Стеклоприбор, Россия). Ростовые параметры растений (в т.ч. длину стеблей и корней) оценивали классическими методами [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ультразвуковым диспергированием нами были получены водные суспензии наночастиц SiO₂ с дифенилантраценом (ДФА). Морфологические характеристики наночастиц представлены на рис. 1а. Средний размер наночастиц в водной суспензии составил 15–25 нм. Фотография данных наночастиц в сухом виде представлена на рис. 1б. Спектр поглощения разбавленной в 100 раз водной суспензии наночастиц SiO₂ с ДФА представлен на рис. 2а. Данная суспензия имела полосу поглощения, характерную для ДФА в истинных растворах в области от 330 до 420 нм с максимумами при 345, 364, 384 и 406 нм [20]. На рис. 2б приведен спектр возбуждения ФЛ суспензии при длине волны в максимуме полосы люминесценции 438 нм. Полученный спектр содержит 4 мак-

симумы при 405, 380, 360 и 345 нм. На рис. 2в приведены спектры ФЛ суспензии наночастиц SiO₂ с ДФА в зависимости от длины волны возбуждающего света. Наибольшую интенсивность ФЛ наблюдали при облучении светом 380 и 405 нм.

Полученные спектры ФЛ суспензии представляют собой полосы от 400 до 550 нм с характерными максимумами при 417, 438, 464 и 496 нм. В этой области спектра у хлорофилла есть полоса интенсивного поглощения [24]. Таким образом, можно предположить, что наночастицы суспензии при успешном попадании в клеточную мембрану, будут работать как природный светосинтетический пигмент. Эксперименты по апробации данной гипотезы были проведены на луковицах столового лука. Для этого в 3-х прозрачных пластиковых стаканах объемом 0.5 л, заполненных торфяным грунтом, засеивали луковицы и первый образец (контроль) поливали дистиллированной водой, 2-й образец поливали водной суспензией наночастиц SiO₂, 3-й образец поливали суспензией наночастиц SiO₂ с ДФА. В остальное время все варианты поливали только дистиллированной водой (рис. 3). Перед посадкой у всех луковиц были срезаны верхние части, диаметр среза составил 2–3 см. Данный срез облегчает доступ кислорода к чешуям, вследствие чего ускоряется распад накопленных сахаров, луковица просыпается быстрее и интенсивнее выпускает перо. Глубина посадки составила $\frac{1}{4}$ от высоты луковицы (1 см). Данный эксперимент был проведен 10 раз для исключения случайных отклонений. В ходе вегетативного роста измерения длины прорастающих луковых перьев проводили на 3-х наиболее длинных луковых побегах, в табл. 1 представлены

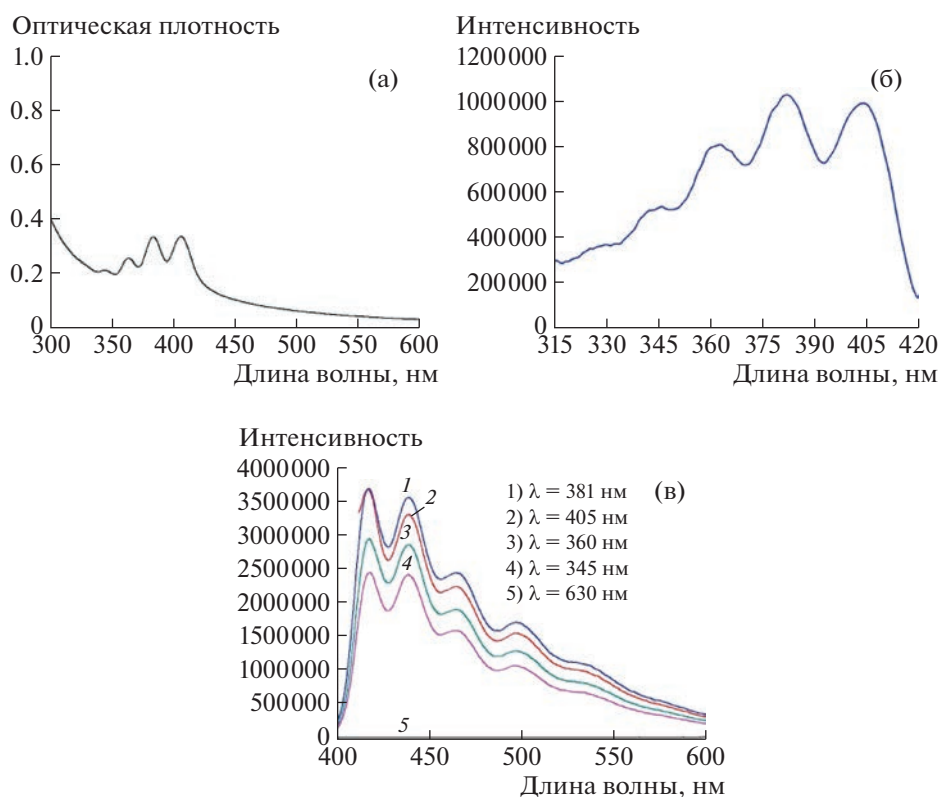


Рис. 2. Спектрофотометрические характеристики водной суспензии наночастиц SiO₂ с ДФА: (а) – спектр поглощения ($l = 1$ см), (б) – спектр возбуждения ФЛ ($\lambda_{ФЛ} = 438$ нм), (в) – интенсивность спектров ФЛ в зависимости от длины волны возбуждающего света.

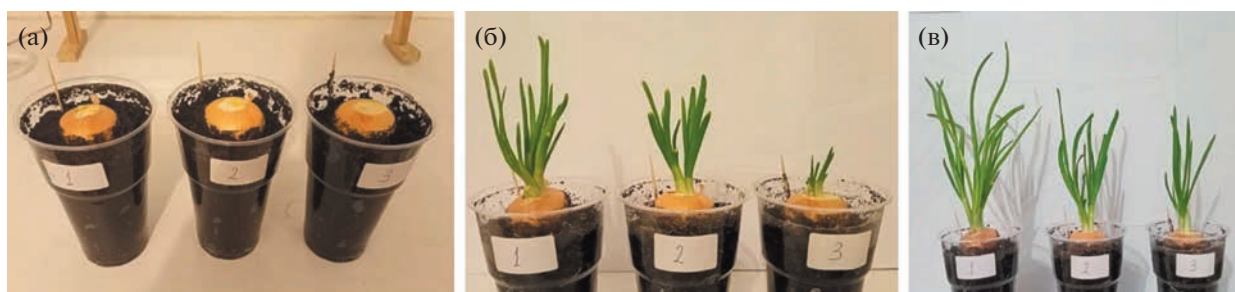


Рис. 3. Прорастание лукович столового лука в зависимости от обработки, варианты: 1 – H₂O + SiO₂ + ДФА, 2 – H₂O + SiO₂, 3 – H₂O; (а) – 1-е сут, (б) – 10-е сут, (в) – 15-е сут.

средние величины. Наблюдение за развитием корневой системы проводили визуально через стенки прозрачного стакана с почвой. Для более детального контроля роста корневой системы отдельно проращивали луковичцы в стаканах с чистой водой (контроль), SiO₂ и SiO₂ с ДФА.

В процессе проращивания луковичцы дополнительно досвечивали фитолампой (К + С) 3 ч – утром, 4 ч – вечером, в сумме, с учетом естественного дневного света, общее время освещения составило 15 ч. Данное время досвечивания выбра-

но для приближения уровня освещенности к естественному летнему, когда средняя продолжительность светового дня составляет 14–16 ч. Спектр свечения фитолампы представляет собой 2 полосы, в синей области от 400 до 500 нм с максимумом при 455 нм и полосу от 560 до 700 нм с максимумом при 625 нм в красной области спектра (рис. 4). Выявлено, что досветка прорастающих лукович ускоряла рост побегов растений лука (табл. 1). Представлены средние данные 10-ти экспериментов с интервалом в 4 сут по проращива-

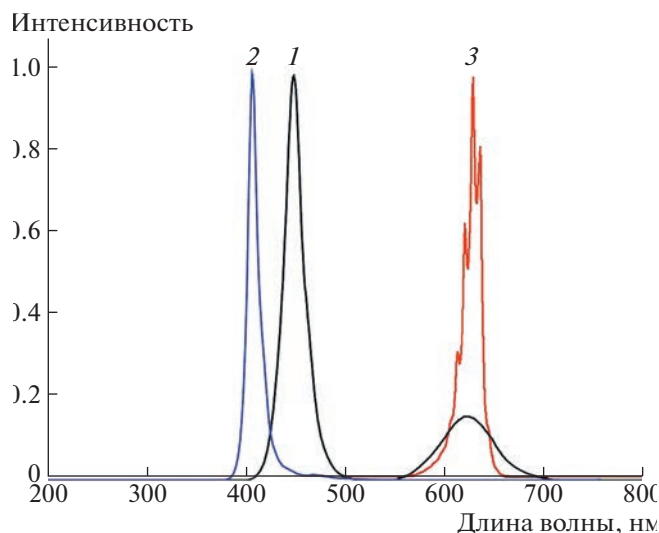


Рис. 4. Спектры свечения: 1 – фитолампа (К + С), 2 – синие светодиоды (С), 3 – красные светодиоды (К).

ванию лука в почве, которую поливали суспензией наночастиц SiO_2 + ДФА, либо только SiO_2 , и контроля, политого только дистиллированной водой. Обнаружено, что в период первых 4–6 сут происходил интенсивный рост корневой системы лукович в вариантах, политых суспензиями. Однако луковичы, почва которых была обработана SiO_2 + ДФА начинали прорастать на 2 сут раньше по сравнению с контролем. Далее длина стрелок увеличивалась, и к концу эксперимента (через 20 сут) разница в длине побегов лука, обработанных наночастицами SiO_2 + ДФА, либо только водой, достигала в среднем 20–30%.

Для подтверждения проникновения водной суспензии наночастиц SiO_2 с ДФА внутрь лукович через корневую систему, в конце эксперимента из лукович, обработанных суспензией наночастиц SiO_2 с ДФА, были приготовлены микропрепараты. Для этого тонкую пленку отделяли от кожицы лука и помещали на подложку из кварцевого стекла. Полученный микропрепарат облучали светом с длиной волны 345 нм. В отраженном свете наблюдали фотолюминесценцию наночастиц с ДФА в области спектра от 400 до 500 нм с характерными пиками при 417, 438, 464 и 496 нм (рис. 5).

После отработки методики обработки водными суспензиями наночастиц с ДФА почвы и контроля (концентрация суспензии, время полива, влажность воздуха, уровень освещенности) эта методика была применена для исследования роста лукович лилии и гладиолуса.

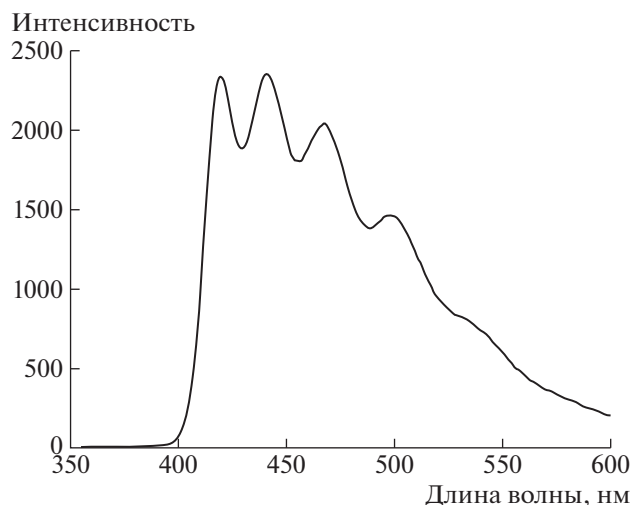


Рис. 5. Спектр фотолюминесценции микропрепарата кожицы лука, $\lambda_{\text{возб}} = 345$ нм.

В табл. 2 приведены усредненные данные 5-ти экспериментов по выращиванию лукович азиатской лилии в течении 25 сут. Фотографии одного из 5-ти экспериментов в процессе прорастания, роста и цветения лилии приведены на рис. 6.

Далее аналогичные эксперименты были проведены с луковичами гладиолуса. В табл. 3 приведены усредненные данные из 5-ти экспериментов по выращиванию гладиолусов сорта Мадагаскар. Фотографии в процессе прорастания и цветения растений приведены на рис. 7.

Для того чтобы выяснить, что именно ДФА положительно влиял на скорость прорастания лукович и рост растений на протяжении всей вегетации, были поставлены эксперименты с луковичами гладиолусов и лука при непрерывном освещении.

Таблица 1. Влияние обработки SiO_2 и SiO_2 + ДФА на длину корней и побегов растений лука

Время, сут	Длина побегов, см		
	Контроль H_2O	$\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{ДФА}$
1	0 ^a	0 ^a	0 ^a
5	0 ^b	0 ^b	1.6 ^a
10	1.4 ^b	2.7 ^b	5.4 ^a
15	5.3 ^b	6.5 ^b	13.3 ^a
20	12.1 ^b	15.2 ^b	23.5 ^a
25	18.5 ^b	22.4 ^b	27.8 ^a

Примечания. 1. Представлены средние 10-ти экспериментов ($n = 3$). 2. Разные буквы обозначают существенную разницу между вариантами. То же в табл. 2–4.

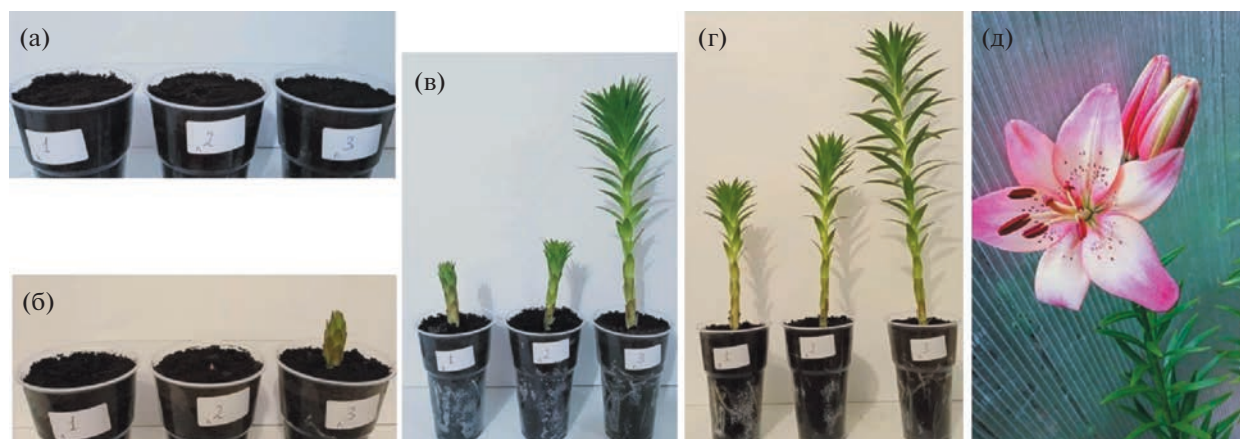


Рис. 6. Рост лилии в зависимости от обработки, варианты: 1 – H₂O, 2 – H₂O + SiO₂, 3 – H₂O + SiO₂ + ДФА. Лилии выращивали при обычном дневном свете с досвечиванием фитолампой (красный + синий спектр) в утреннее и вечернее время; (а) – 1-е сут, (б) – 7-е сут, (в) – 16-е сут, (г) – 21-е сут, (д) – 57-е сут.

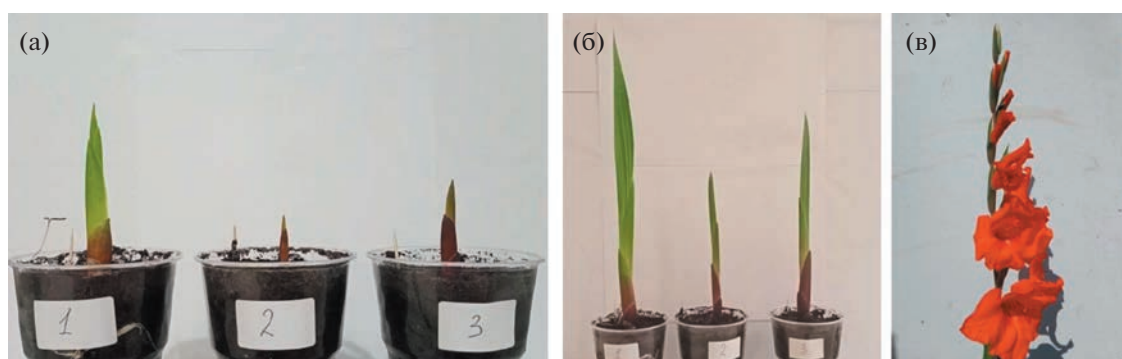


Рис. 7. Прорастание луковиц гладиолуса сорта Мадагаскар, варианты обработки: 1 – H₂O + SiO₂ + ДФА, 2 – H₂O, 3 – H₂O + SiO₂. Луковицы гладиолуса выращивали при обычном дневном свете с досвечиванием фитолампой (красный + синий спектр); (а) – 10-е сут, (б) – 16-е сут, (в) – 75-е сут.

щении растений светодиодами синего и красного свечения. Спектр синего светодиода содержит узкую полосу свечения от 375 до 450 нм с пиком при 405 нм (рис. 4). Данный пик совпадает с одним из

максимумов поглощения суспензии SiO₂ с ДФА при 406 нм (рис. 2а). На рис. 8 приведены фотографии в процессе проращивания луковиц лука и гладиолусов при освещении красными и синими

Таблица 2. Влияние обработки SiO₂ и SiO₂ + ДФА на длину побегов и корней лилий

Время, сут	Длина корней			Длина побегов		
	см					
	Контроль H ₂ O	H ₂ O + SiO ₂	H ₂ O + SiO ₂ + ДФА	Контроль H ₂ O	H ₂ O + SiO ₂	H ₂ O + SiO ₂ + ДФА
1	0.6 ^а	0.6 ^а	0.6 ^а	0 ^а	0 ^а	0 ^а
4	2.5 ^{бв}	2.6 ^б	2.9 ^а	0 ^а	0 ^а	0 ^а
8	4.8 ^б	5.3 ^б	6.7 ^а	0 ^б	1.8 ^б	3.7 ^а
12	7.3 ^б	8.1 ^б	10.5 ^а	3.9 ^б	6.3 ^б	8.5 ^а
16	11.6 ^б	13.5 ^б	14.7 ^а	9.6 ^б	13.2 ^б	17.6 ^а
20	15.4 ^б	17.2 ^б	18.5 ^а	14.8 ^б	18.7 ^б	24.4 ^а

Примечание. Приведены усредненные данные 5-ти экспериментов (n = 3). То же в табл. 3, 4.

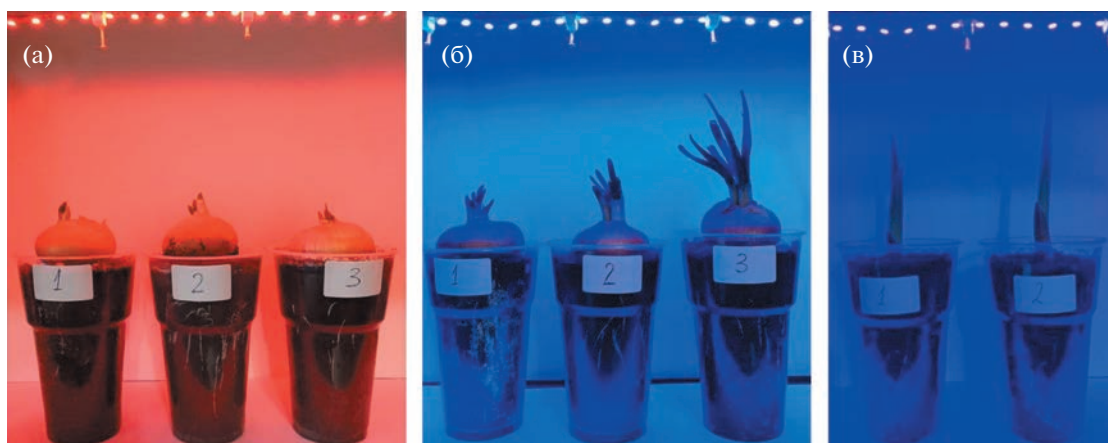


Рис. 8. Рост луковиц лука и гладиолуса при освещении красными и синими светодиодами: (а) – лук (красный светодиод), варианты обработки: 1 – H_2O , 2 – $H_2O + SiO_2$, 3 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$, (б) – лук (синий светодиод), варианты: 1 – H_2O , 2 – $H_2O + SiO_2$, 3 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$, (в) – гладиолус (синий светодиод), варианты: 1 – $H_2O + SiO_2$, 2 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$.

светодиодами. В табл. 4 более подробно приведены данные прорастания побегов гладиолуса и лука в течение 20 сут при освещении светодиодами красного и синего свечения.

Выявлено, в обоих случаях луковицы лука и гладиолуса, обработанные суспензиями наночастиц диоксида кремния, содержащих дифенилан-

трацен, росли быстрее, чем контрольные группы луковиц, обработанные только водой и водной суспензией наночастиц SiO_2 при освещении светодиодами синего свечения.

При освещении светодиодами красного свечения луковицы во всех вариантах проросли одинаково, изменения скорости прорастания под

Таблица 3. Изменение длины побегов растений гладиолуса сорта Мадагаскар при обработке SiO_2 и $SiO_2 + ДФА$

Время, сут	Длина побегов, см		
	Контроль H_2O	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$
1	0 ^a	0 ^a	0 ^a
5	0 ^b	0.3 ^b	1.2 ^a
10	2.3 ^b	3.6 ^b	7.8 ^a
15	9.6 ^b	15.7 ^b	17.4 ^a
20	15.5 ^b	18.4 ^b	24.3 ^a
25	26.2 ^b	31.1 ^b	35.6 ^a

Таблица 4. Влияние красного и синего светодиода на длину побегов растений лука и гладиолуса

Время, сут	Длина побегов, см							
	Красный светодиод			Синий светодиод				
	Лук			Лук			Гладиолус	
	Контроль H_2O	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$	Контроль H_2O	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$
1	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a
5	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^b	0.4 ^b	1.3 ^a	0 ^b	0.5 ^a
10	3.4 ^a	3.5 ^a	3.5 ^a	4.7 ^b	6.4 ^b	8.5 ^a	3.1 ^b	6.3 ^a
15	6.7 ^a	7.3 ^a	7.2 ^a	7.5 ^b	12.1 ^b	15.6 ^a	10.6 ^b	15.4 ^a
20	12.3 ^a	13.8 ^a	13.6 ^a	13.4 ^b	16.8 ^b	20.2 ^a	14.2 ^b	19.7 ^a

влиянием ДФА не было обнаружено (рис. 8а, табл. 4). Так как излучение красных светодиодов расположено в области 630 нм, при данной длине волны не наблюдали спектр фотолуминесценции ДФА, способного влиять на хлорофилл (рис. 2в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучены морфологические и оптические свойства пористых наночастиц диоксида кремния с нанесенным дифенилантраценом (ДФА) в водных суспензиях. Показано, что использование таких наночастиц при проращивании луковичных растений ускоряет рост стеблей и тем самым сокращает время до цветения. Досвечиванием светодиодами синего и красного излучения показано, что именно содержание дифенилантрацена в наночастицах оказывало положительное влияние на рост растений. Полученные результаты могут быть использованы при выращивании декоративных комнатных растений и цветов в условиях недостатка естественного света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh S., Agrawal S.B., Agrawal M. Role of light in plant development // *Inter. J. Plant Environ.* 2015. V. 53. P. 43–56.
2. Kyriacou M.C., Rouphael Y., Di Gioia F., Kyriacou A., Serio F., Renna M., De Pascale S., Santamaria P. Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens // *Trend. Food Scitechnol.* 2016. V. 57. P. 103–115.
3. Kim Y.J., Kim H.M., Jeong B.R., Lee H.J., Hwang S.J. Iceplant growth and phytochemical concentrations are affected by light quality and intensity of monochromatic light-emitting diodes // *Hortic. Environ. Biot.* 2018. V. 59. P. 529–536.
4. Monostori I., Heilmann M., Kocsy G., Rakszegi M., Ahres M., Altenbach S.B., Szalai G., Pál M., Toldi D., Sarkadi L.S., Harnos N., Galiba G., Darko E. LED lighting – modification of growth, metabolism, yield and flour composition in wheat by spectral quality and intensity // *Front. Plant Sci.* 2018. V. 9. P. 605.
5. Deepika A., Ankit S.S., Amarjeet S. Dark-induced hormonal regulation of plant growth and development // *Front. Plant Sci.* 2020. V. 11. 581666.
6. Евлаков П.М., Бычков А.А., Заплетин В.Ю. Воздействие светодиодных и натриевых облучателей на рост и развитие растений, выращенных методом клонального микроразмножения (*in vitro*) // *Вестн. ВГУ. Сер.: хим., биол., фармация.* 2020. № 4. С. 43–49.
7. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. USA: Academic Press, 2015. 438 p.
8. Lastochkina O., Aliniaiefard S., Seifikalhor M., Bosacchi M., Maslennikova D., Lubyanova A. Novel approaches for sustainable horticultural crop production: advances and prospects // *Horticulturae.* 2022. V. 8. P. 910.
9. Tennessen D.J., Singaas E.L., Sharkey T.D. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research // *Photosynthes. Res.* 1994. V. 39. P. 85–92.
10. Kim S.J., Hahn E.J., Heo J.W., Paek K.Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro // *Sci. Horticulturae.* 2004. V. 101. P. 143–151.
11. Breive K., Tamulaitis G., Duchovskis P., Bliznikas Z., Ulinskaite R., Brazaityte A., Novickovas A., Zukauskas A. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation // *J. Physic. D: Appl. Physic.* 2005. V. 38. P. 3182–3187.
12. Bayat, L., Arab M., Aliniaiefard S., Seif M., Lastochkina O., Li T. Effects of growth under different light spectra on the subsequent high light tolerance in rose plants // *AoB Plants.* 2018. V. 10. № 5. P. 52.
13. Samuolienė G., Viršilė A., Brazaitytė A., Jankauskienė J., Sakalauskiene S., Vaštakaitė V., Novickovas A., Viskeliene A., Sasnauskas A., Duchovskis P. Blue light dosage affects carotenoids and tocopherols in microgreens // *Food Chem.* 2017. V. 228. P. 50–56.
14. Hasan M.M., Bashir T., Ghosh R., Lee S.K., Bae H. An overview of LEDs' effects on the production of bioactive compounds and crop quality // *Molecule.* 2017. V. 22. P. 1–12.
15. Ferrón-Carrillo Carrillo F., Guil-Guerrero J.L., González-Fernández M.J., Lyashenko S., Battafarano F., da Cunha-Chiamolera T.P.L., Urrestarazu M. LED enhances plant performance and both carotenoids and nitrates profiles in lettuce // *Plant Foods Human Nutrit.* 2021. V. 76. № 2. P. 210–218.
16. Paradiso R., Proietti S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: the state of the art and the opportunities of modern LED systems // *J. Plant Growth Regul.* 2022. V. 41. P. 742–780.
17. Di Q., Li J., Du Y., Wei M., Shi Q., Li Y., Yang F. Combination of red and blue lights improved the growth and development of eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings by regulating photosynthesis // *J. Plant Growth Regul.* 2021. V. 40. № 4. P. 1477–1492.
18. Rabinowitch E.I., Govindjee G. The role of chlorophyll in photosynthesis // *Sci. Amer.* 1965. V. 213. № 1. P. 74–83.
19. Giraldo J.P., Landry M.P., Faltermeier S.M., McNicholas T.P., Iverson N.M., Boghossian A.A., Reuel N.F., Hilmer A.J., Sen F., Brew J.A., Strano M.S. // Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing // *Nature Mater.* 2014. V. 13. № 4. P. 400–408.
20. Berlman I.B. Handbook of fluorescence spectra of aromatic molecules. N.Y.: Academic Press, 1971. 473 p.
21. Sharipov G.L., Abdrakhmanov A.M., Gareev B.M., Tukhbatullin A.A. Porous SiO₂ nanoparticles containing ruthenium or sulfur compounds: sonochemical producing and sonoluminescence in aqueous suspensions // *Ultrasonics Sonochem.* 2020. V. 61. P. 104842.
22. Agliullin M.R., Danilova I.G., Faizullin A.V., Amaratov S.V., Bubennov S.V., Prosochkina T.R., Grigor'eva

- N.G., Paukshtis E.A., Kutepov B.I.* Sol-gel synthesis of mesoporous aluminosilicates with a narrow pore size distribution and catalytic activity thereof in the oligomerization of dec-1-ene // *Microporous Mesoporous mater.* 2016. V. 230. P. 118–127.
23. *Mokronosova A. T.* Small workshop on plant physiology. Moscow: Moscow State University, 1994. 184 p.
24. *Hedayatifar L., Irani E., Mazarei M., Rasti S., Azar Y.T., Rezakhani A., Mashaghi A., Shayeganfar F., Anvari M., Heydari T., Tabar A.R., Nafari N., Vesaghi M., Asgari R., Tabar M.R.R.* Optical absorption and electronic spectra of chlorophylls a and b // *RSC Adv.* 2016. V. 6. P. 109778–109785.

Aqueous Suspension of Porous SiO₂ Nanoparticles, Containing 9,10-diphenylanthracene, in Agrophotonics

B. M. Gareev^{a,#}, G. L. Sharipov^a, and O. V. Lastochkina^b

^a*Institute of Petrochemistry and Catalysis – a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Center of the RAS
prosp. Oktyabrya 141, Ufa 450075, Russia*

^b*Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
prosp. Oktyabrya 71, Ufa 450054, Russia*

[#]*E-mail: gareev-bulat@yandex.ru*

An aqueous colloidal suspension of porous silicon dioxide nanoparticles containing an organic phosphor 9,10-diphenylanthracene was obtained by ultrasonic dispersion. The average size of suspension nanoparticles is 15–25 nm. This suspension has a characteristic absorption spectrum for diphenylanthracene in the region from 345 to 420 nm and a photoluminescence spectrum in the region from 400 to 550 nm. The resulting suspension was used for irrigation when growing bulbous plants (lilies and gladiolus) under conditions of a short light period with additional lighting with LEDs-based phytolamps with red and blue spectra. It has been established that the use of this suspension with nanoparticles that enter plants as an artificial photosynthetic pigment accelerates the growth of bulbous plants by an average of 15–20% compared to control samples under the same lighting conditions.

Keywords: light, LED lamps, nanoparticle suspension, silicon dioxide, photoluminescence, 9,10-diphenylanthracene, growth, lilies, gladiolus.

УДК 631.416.7:631.445.24:631.442.2

ПОТЕРИ КАЛЬЦИЯ ИЗ МЕЛИОРИРУЕМОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ РАЗНОМ УРОВНЕ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ

© 2023 г. А. В. Литвинович^{1,2}, А. В. Лаврищев^{2,*}, В. М. Буре^{1,3}, И. В. Салаев^{1,2}¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург–Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

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

Поступила в редакцию 25.03.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

В 10-летнем лабораторном опыте на колонках проведено изучение миграционной подвижности кальция, остающегося в мелиорированной доломитом дерново-подзолистой почве после уборки культур. Выявлен “фонд” способных к миграции соединений кальция в годы со среднемноголетним, избыточным и недостаточным уровнями увлажнения. Установлено, что увеличение объема дренируемой влаги способствовало росту непроизводительных потерь кальция. Чем выше доза при-менения доломита и меньше размер частиц, тем элювиальные потери кальция были больше. Показано, что основная масса способного к миграции кальция удалялась из почвы на начальном этапе промывания. В течение всего периода изучения миграционные потери кальция после уборки гороха превосходили потери после возделывания горчицы. Разработаны эмпирические зависимости, описывающие потери кальция из почвы, произвесткованной доломитом в широком интервале доз. Проведено ранжирование различных вариантов опыта по масштабу потерь кальция. Показано, что за 10 лет наблюдений максимальные потери кальция в результате миграции были характерны для варианта опыта, произвесткованного доломитовой мукой, рассчитанной по полной дозе гидролитической кислотности. Потери кальция из почвы, мелиорированной частицами доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозах, равных 3 и 5 H_T , были меньше.

Ключевые слова: дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, влагообеспеченность почвы, химическая мелиорация, элювиальные потери кальция, эмпирические модели процесса миграции.

DOI: 10.31857/S0002188123100095, **EDN:** VTGLUF

ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории мелиорации почв АФИ длительное время проводят исследования удобрительной ценности и мелиоративных свойств отсева доломита, используемого для дорожного строительства. В работах [1, 2] представлены результаты изучения химического и гранулометрического составов отсева, установлена скорость растворения частиц доломита размером <0.25, 0.25–1, 1–3 и 3–5 мм. Приведены данные динамики изменения различных форм почвенной кислотности, содержания обменных катионов Са и Mg и подвижности Mn и Fe в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в процессе проведения длительного полевого опыта с частицами отсева [3–6].

В настоящее время изучают мелиоративные свойства, удобрительную ценность и скорость растворения фракций размером 5–7 и 7–10 мм, внесенных в заведомо завышенных дозах [7–11]. Теоретической предпосылкой проводимых исследований является известный факт, что при увеличении дозы внесенного мелиоранта, влияние тонины помола снижается.

Одним из главных направлений работы является установление миграционных потерь кальция и магния из почв, мелиорируемых отсевом. Ранее проведенные исследования [12–27] позволили установить, что подвижность макро- и микроэлементов в почвах под действием ирригационных мероприятий и влаги атмосферных осадков зависят от гранулометрического состава и количества

Таблица 1. Миграция кальция за 10 опыто-лет (каждый год с увлажнением меньше среднееголетнего уровня), мг

Сроки	1. НРК (фон)	2. Фон + ДМ 1 H _г	3. Фон + М (5–7 мм) 1 H _г	4. Фон + М (5–7 мм) 3 H _г	5. Фон + М (5–7 мм) 5 H _г	6. Фон + М (7–10 мм) 1 H _г	7. Фон + М (7–10 мм) 3 H _г	8. Фон + М (7–10 мм) 5 H _г	9. Фон + ***ЕСМ 1 H _г	10. Фон + ЕСМ 3 H _г
1	13.9 (6.0)*	473 (61.5)	93.3 (23.1)	192 (40.7)	211 (40.5)	64.0 (22.0)	147 (36.8)	224 (39.5)	96.0 (26.6)	224 (38.5)
2	16.8	29.3	24.5	28.6	30.8	30.6	36.6	34.7	28.0	45.3
3	24.8	43.0	29.4	41.1	35.8	24.0	24.1	43.0	60.8	81.9
4	16.2	29.3	22.9	18.1	27.2	18.0	18.7	30.1	25.3	34.9
5	35.2	60.2	93.9	55.4	72.0	50.6	41.8	35.7	41.6	47.4
6	26.1	37.6	30.7	32.6	47.8	22.1	30.4	37.3	30.9	33.9
7	37.1	43.4	47.7	37.1	34.6	31.0	48.2	102.1	28.3	50.4
8	26.4	14.7	18.7	21.5	16.2	14.6	14.3	18.1	20.2	17.8
9	20.2	31.0	33.8	33.6	45.3	36.1	38.8	26.4	29.4	29.7
10	13.1	8.0	9.7	11.5	40.4	9.8	14.4	15.3	11.6	16.6
Σ, мг	230	770	405	472	561	301	415	567	372	582
**%	86	90	87	81	82	84	85	82	81	85

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 2–7.

*В скобках – доля вымытого кальция, % от суммарного объема выщелачиваемого кальция за 10 опыто-лет.

**Доля вымытого кальция, % за годы увлажнения, соответствующие среднееголетнему уровню.

***ЕСМ – естественная смесь мелиорантов.

способных к миграции элементов, находящихся в почвенном профиле. Объем просочившейся влаги является ведущим фактором, определяющим масштаб миграции [12].

Работа является продолжением исследований, начатых в [11]. Показано, что крупные частицы доломита не являются “балластом”. Попав в почву, они постепенно растворяются, создавая определенный запас способных к миграции катионов кальция и магния. При этом темпы разложения отдельных частиц доломита в почвах могут существенно различаться. Это связано с неодинаковой выветрелостью различных по размеру фракций доломита, складываемых в отвалах. При попадании в почву скорость растворения доломитовых частиц различной выветрелости (разрушения) будет различной [10].

Цель работы – в опыте на колонках выявить элювиальные потери кальция из мелиорируемой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в годы разного уровня увлажнения. Задачи исследования: определить “фонд” способных к миграции катионов кальция, в почве после уборки растений при разной влагообеспеченности; разработать эмпирические модели, описывающие потери кальция из мелиорируемой доломитом почвы в широком интервале доз; провести ранжирование

различных вариантов опыта по масштабу потерь кальция.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение проводили в полевом опыте. Схема опыта приведена в табл. 1. Методика закладки полевого опыта подробно описана в работе [11].

Опыт проводится 10 опыто-лет. Чередуется культур: горох, горчица – культуры, отзывчивые на известкование и характеризующиеся высоким уровнем потребления кальция и магния [28, 29]. Уборку растений проводили в фазе цветения. За период проведения эксперимента получено по 5 урожаев гороха и горчицы. В качестве варианта сравнения использовали вариант с доломитовой мукой (ДМ), которую вносили в научно обоснованной дозе. Доломитовую муку готовили из частиц доломита, который размалывали и просеивали через сито с отверстиями 0.25 мм.

Физико-химическая характеристика почвы на момент закладки опыта была следующая: рН_{KCl} 4.6, H_г – 4.9 ммоль(экв)/100 г, содержание гумуса – 2.18%; содержание фракций <0.01 мм – 21.4%, содержание CaCO₃ в отсеке – 46.1, MgCO₃ – 38.4%.

Масштабы потерь кальция в годы различной влагообеспеченности почвы определяли в лабо-

раторном эксперименте, который проводили следующим образом. Ежегодно после уборки растений в вариантах опыта отбирали почву на глубину культивируемого слоя (0–25 см). Почву высушивали, измельчали, просеивали сквозь сито с отверстиями 1 мм и помещали в колонки. Диаметр колонки – 6.4 см, масса почвы – 600 г, высота почвенного слоя – 18 см, плотность набивки – 1.0–1.1 г/см³.

При планировании эксперимента исходили из следующих положений. Дерново-подзолистые почвы характеризуются промывным типом водного режима. Исследования, проведенные в работе [30], показали, что сквозное промывание профиля происходит ежегодно вслед за переходом температуры воздуха через 0°C (весеннее снеготаяние) и продолжается в течение 5-ти декад. Все осадки, выпадающие в этот период времени, вызывают сквозное промывание профиля. В отдельные годы дренирование возможно также до наступления заморозков при затяжной и дождливой осени. При интенсивном выпадении ливневых дождей сквозное промывание можно наблюдать и летом. Таким образом, водный режим дерново-подзолистых почв в отдельные годы может существенно различаться.

Например, анализ данных метеостанции “Белогорка” (Гатчинский р-н Ленинградской обл.) показал, что среднемноголетнее количество осадков составляет 641 мм [29]. За последние 50 лет оно менялось от 428 мм (в 1972 г.) до 864 мм (в 2016 г.) [31].

При расчетах количества влаги, необходимого для промывания одной колонки в годы близкого к среднемноголетнему уровню увлажнения исходили из годового количества осадков, равного 650 мм [32, 33]. На транспирацию растениями и испарение с поверхности почвы расходуется ≈400 мм [33].

Следовательно, 250 мм осадков ежегодно просачивается сквозь почвенно-грунтовую толщу. Количество дистиллированной воды, используемое для промывания одной колонки при увлажнении, равном среднемноголетнему уровню, определяли по формуле:

$$V = \frac{\pi \times r^2 \times 250}{1000},$$

где $\pi = 3.14$, r – радиус колонки, мм.

Таким образом, согласно расчетам, для одного промывания в годы среднемноголетнего уровня увлажнения использовали 800 мл воды. За 10 опыто-лет суммарный объем просочившейся влаги составил 8 л. В годы увлажнения выше

среднемноголетнего уровня его увеличивали в 1.5 раза до 1200 мл, за 10 опыто-лет – 12 л. В годы с количеством осадков ниже среднемноголетней нормы объем дренируемой влаги сокращали до 400 мл, что составило за 10 опыто-лет 4 л.

Таким образом, каждую колонку в опыте промывали 3 раза, имитируя промывание почвы в годы “недостаточного” (400 мл), “среднемноголетнего” (800 мл) и “избыточного” (1200 мл) уровней увлажнения.

В каждой порции фильтрата устанавливали количество вымываемого кальция. Для подсчета общего количества мигрирующего кальция результаты каждой последующей промывки суммировали с предыдущей. Таким образом, получены элювиальные потери кальция в годы среднемноголетней и “избыточной” влагообеспеченности. Эмпирические модели на основе полученных экспериментальных данных строили согласно [34].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Количество кальция в промывных водах за 10 опыто-лет изучения в годы низкой влагообеспеченности представлено в табл. 1.

Исследование показало, что минимальное количество кальция, вымываемого из почвы контрольного варианта, приурочено к первой промывке. Далее, на 2–9 годы после закладки опыта количество выщелачиваемого кальция возрастало. Вероятно, при низком уровне агротехники возделывания сельскохозяйственных растений (невысокий уровень применения минеральных удобрений, отказ от использования органических удобрений в отсутствие известкования) в почве неизвесткованного контроля начинают формироваться гумусовые вещества с более выраженным кислотным характером. Это усиливает процессы кислотного гидролиза минералов и увеличивает в почве содержание доступных для растений соединений кальция и магния [11, 35]. На увеличение степени насыщенности почв основаниями при снижении уровня антропогенной нагрузки и выведении окультуренных почв из сельскохозяйственного оборота есть указания в работах [35–39].

Вероятно, подобное явление – закономерный этап развития окультуренных почв при прекращении или ослаблении хозяйственного воздействия [11, 38]. Параллельное изучение динамики величины рН в контрольном варианте опыта показало, что за 10 лет изучения оно снизилось с 4.5 до 4.0 ед. На 10-й опыто-год после известкования количество вымываемого кальция снижалось и

Таблица 2. Эмпирические модели миграции Са при известковании частицами доломита в годы с количеством осадков меньше среднемноголетнего уровня

Вариант	Модель, №	Модель	<i>p</i> -value	<i>R</i> ²
1	1.1	$y_{1.1} = 20.4 + 0.47t$	0.63	0.028
2	2.1	$y_{2.1} = \exp(10.2 - 5.67t + 1.62t^2 - 0.185t^3 + 0.007t^4)$	0.036	0.83
3	3.1	$y_{3.1} = 64.78 - 4.42t$	0.19	0.2
4	4.1	$y_{4.1} = \exp(7.93 - 3.699t + 1.004t^2 - 0.108t^3 + 0.004t^4)$	0.08	0.76
5	5.1	$y_{5.1} = \exp(9.03 - 5.23t + 1.66t^2 - 0.21t^3 + 0.009t^4)$	0.1	0.736
6	6.1	$y_{6.1} = 46.27 - 2.94t$	0.1	0.285
7	7.1	$y_{7.1} = \exp(7.78 - 3.7t + 1.015t^2 - 0.11t^3 + 0.004t^4)$	0.1	0.724
8	8.1	$y_{8.1} = \exp(8.61 - 4.38t + 1.25t^2 - 0.014t^3 + 0.005t^4)$	0.08	0.75
9	9.1	$y_{9.1} = \exp(4.26 - 0.146t)$	0.01	0.58
10	10.1	$y_{10.1} = \exp(4.86 - 0.2t)$	0.004	0.65

сравнивалось с его содержанием в промывных водах первого срока.

Эмпирическая зависимость (1.1), описывающая миграционные потери кальция из почвы контрольного варианта опыта в годы недостаточного увлажнения, приведена в табл. 2. Статистическая значимость модели низкая.

Элювиальные потери кальция в варианте опыта с ДМ многократно возрастали. Если за 10 опыто-лет в контроле они составили 230 мг, то в варианте с ДМ возросли до 770 мг, т.е. в 3.34 раза. За первое промывание было удалено 473 мг (61.5% от вымытого за 10 лет). Следовательно, основная масса кальция удалялась спустя 1 год после мелиорации. В последующие сроки наблюдения выщелачивание кальция снижалось. Эмпирическая модель (2.1), описывающая процессы вертикальной миграции кальция в варианте с ДМ, носит экспоненциальный характер и статистически значима на высоком уровне значимости (табл. 2).

Если предположить, что количество удаляемого почвенного кальция во всех вариантах опыта с известкованием неизменно (соответствует контролю), то потери кальция мелиоранта в варианте с ДМ составили 540 мг, т.е. превосходили миграцию почвенного кальция в 2.48 раза.

Использование в качестве мелиоранта доломитовых частиц размером 5–7 мм в дозе 1 H_r также увеличило элювиальные потери кальция по сравнению с контролем. Наибольшее вымывание установлено спустя 1 и 5 лет после известкования (93.3 и 93.9 мг соответственно). В остальные годы потери кальция при миграции были меньше. Общее количество удаляемого кальция за 10 лет экс-

перимента при миграции составило 405 мг. На долю почвенного кальция приходилось 53.8% от суммарного количества.

За 10 лет изучения при использовании доломитовых частиц размером 5–7 мм в научно обоснованной дозе (модель 3.1) статистически значимого изменения показателя элювиальных потерь кальция не было (табл. 2).

Применение в качестве мелиоранта частиц доломита размером 5–7 мм в количестве 3 и 5 доз, рассчитанных по H_r , по сравнению с вариантом с дозой, равной 1 H_r , привело к росту элювиальных потерь кальция. Суммарное количество выщелачиваемого кальция в варианте с дозой, соответствующей 3 H_r за 10 опыто-лет изучения по сравнению с контролем возросло до 472 мг, в варианте с дозой 5 H_r – до 561 мг, т.е. в 2.2 и 2.4 раза соответственно. Таким образом, чем больше была доза внесения ДМ, тем непроизводительные потери кальция из почвы были больше.

Элювиальные потери кальция при известковании частицами доломита, размером 5–7 мм в количестве, соответствующем 3 H_r , начинали превосходить количество вымытого кальция в варианте с доломитовой мукой на 8-й год после мелиорации. Исключение составлял 6-й опыто-год. При применении той же фракции, но в дозе 5 H_r – на 5-й год. Эмпирические модели, описывающие миграцию кальция в вариантах опыта, мелиорированного доломитом размером 5–7 мм в количестве 3 и 5 доз H_r , были статистически значимыми (модели 4.1 и 5.1 соответственно).

Суммарное количество выщелачиваемого кальция за 10 опыто-лет при использовании

фракции размером 7–10 мм по сравнению с частицами размером 5–7 мм, снижалось. Следовательно, степень измельчения оказывала влияние на скорость растворения и, как следствие, на потери кальция в результате миграции [1]. Исключение составляли варианты с использованием максимально принятой в опыте дозой 5 H_r , где было вымыто примерно одинаковое количество кальция. В данном случае роль играла степень выветрелости доломитовых частиц неодинакового размера, долгое время складированных в отвалах.

Миграция кальция в варианте с дозой мелиоранта 1 H_r размером 7–10 мм в промежутке времени от 1-го до 7-го промывания была меньше, чем в варианте с ДМ. Начиная с 8-го промывания количество вымытого кальция между вариантами выравнивалось. При применении той же фракции, но в дозе 3 H_r , миграционные потери начинали превосходить потери при миграции кальция в варианте с ДМ на 7-й опыто-год. В варианте с использованием 5-ти полных доз, рассчитанных по H_r , на 2-й опыто-год. Исключения составляли 5-, 8- и 10-й опыто-годы, где выявлена противоположная закономерность.

В целом за 10 промываний количество удаляемого кальция в вариантах, мелиорированных частицами доломита размером 7–10 мм в дозах 1, 3 и 5 H_r , было соответственно в 2.6, 1.9 и 1.4 раза меньше, чем из почвы с доломитовой мукой. Доля удаляемого кальция мелиоранта составила 71.0, 184 и 337 мг соответственно.

Таким образом, известкование крупными фракциями доломита вне зависимости от дозы внесения способствовало усилению непроизводительных потерь кальция. Чем доза применения была больше, тем непроизводительные потери были значительнее. Следовательно, частицы доломита крупного размера, попав в почву, постепенно растворяются, приводя к обогащению профиля доступными для растений и способными к миграции соединениями кальция. Однако эти потери были значительно меньше, чем в варианте с ДМ, примененной в научно обоснованной дозе

Эмпирические модели, описывающие потери при миграции кальция из почвы вариантов опыта с дозой применения частиц размером 7–10 мм в вариантах применения доз 1, 3 и 5 H_r были статистически значимыми (табл. 2, модель 6.1, 7.1, 8.1).

При использовании естественной смеси мелиорантов (ЕСМ) в научно обоснованной дозе (1 H_r) суммарные потери Са за весь период эксперимента были в 2.1 раза меньше, чем в варианте с ДМ. Доля кальция мелиоранта составила 38.2% или 142 мг. Количество удаляемого из почвы кальция

на 3-, 8- и 10-й годы эксперимента превосходило потери этого элемента в варианте с ДМ.

Начиная со 2-го срока эксперимента потери кальция в варианте, произвесткованного ЕСМ в дозе 3 H_r , начинали превосходить потери в варианте с ДМ. Исключение составляли 5-, 6- и 10-й сроки наблюдений, где отмечена обратная закономерность. Несмотря на то что суммарное количество вымытого кальция за 10 промываний было меньше, чем в варианте с ДМ, полученные материалы непроизводительных потерь кальция в варианте с ЕСМ с дозой 3 H_r заставляют с большой осторожностью рекомендовать для известкования естественную смесь доломита в количестве, превышающем научно обоснованную дозу. Модели 9.1 и 10.1, построенные по данным вариантов опыта 9 и 10, были статистически значимыми и отличались от остальных моделей более плавной экспоненциальной динамикой тренда (табл. 2).

В течение всего периода эксперимента элювиальные потери кальция после уборки гороха превосходили потери после возделывания горчицы. Вероятно, эти различия были связаны как с неодинаковым выносом из почвы кальция растениями бобовых и капустных [28, 29], так и различным воздействием корневых выделений горчицы и гороха на известковые материалы.

Увеличение объема просочившейся влаги с 400 до 800 мм при уровне увлажнения, близком к среднемноголетнему, способствовало росту количества выщелачиваемого кальция во всех вариантах опыта (табл. 3). Минимальное количество вымытого кальция установлено в варианте без известкования. За 10 лет проведения опыта оно составило 254 мг, т.е. возросло по сравнению с годами увлажнения ниже среднемноголетнего уровня на 10.5%. Максимальные потери зафиксированы в варианте с применением ДМ в научно обоснованной дозе. Прирост составил 83.3 мг (10.8% от вымытого в годы увлажнения ниже среднемноголетнего уровня). На долю кальция мелиоранта пришлось 599 мг. Во всех других известкованных вариантах количество мигрирующего кальция по сравнению с контролем также увеличивалось. Размах изменений составил от 344 мг (вариант с дозой применения частиц доломита размером 7–10 мм в дозе 1 H_r) до 688 мг в вариантах, мелиорированных частицами доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозе 5 H_r и ЕСМ в количестве 3 H_r .

В целом увеличение объема просачивающейся влаги с 400 до 800 мм, т.е. в 2 раза, привело к усилению миграционных потерь кальция. Прирост в

Таблица 3. Миграция кальция за 10 лет (годы со среднемноголетним уровнем увлажнения), мг

Сроки	1. НРК (фон)	2. Фон + ДМ 1 H _г	3. Фон + М (5–7 мм) 1 H _г	4. Фон + М (5–7 мм) 3 H _г	5. Фон + М (5–7 мм) 5 H _г	6. Фон + М (7–10 мм) 1 H _г	7. Фон + М (7–10 мм) 3 H _г	8. Фон + М (7–10 мм) 5 H _г	9. Фон + ***ЕСМ 1 H _г	10. Фон + ЕСМ 3 H _г
1	17.6	493	97.5	202	226	70.0	154	237	106	243
2	18.4	38.5	28.8	37.2	43.8	34.6	42.6	44.5	37.6	60.8
3	33.6	53.4	34.3	49.5	48.5	29.8	30.9	54.0	70.9	95.9
4	18.6	35.2	27.0	25.1	40.0	22.3	24.2	42.6	34.6	44.2
5	40.3	69.8	102.7	75.1	84.3	59.4	51.1	48.8	50.1	59.2
6	29.1	45.1	41.3	48.6	62.2	25.6	40.5	54.3	42.1	43.7
7	41.6	50.6	53.2	50.2	49.8	39.5	58.8	119.4	37.1	63.7
8	16.0	20.1	24.3	31.2	24.0	17.7	19.8	27.6	26.5	13.7
9	22.5	36.8	45.0	43.8	54.6	45.5	48.0	38.2	39.3	39.9
10	16.3	10.5	13.1	18.8	54.6	12.2	18.3	20.8	15.8	23.2
Σ, мг	254	853	467	581	688	357	488	688	460	688

Таблица 4. Эмпирические модели миграции Са при известковании частицами доломита в годы со среднемноголетним уровнем увлажнения

Вариант	№ модели	Модель	p-value	R ²
1	1.2	$y_{1,2} = 25.84 - 0.08t$	0.94	0.0005
2	2.2	$y_{2,2} = \exp(9.86 - 5.1t + 1.45t^2 - 0.164t^3 + 0.006t^4)$	0.02	0.846
3	3.2	$y_{3,2} = 69.4 - 4.12t$	0.23	0.168
4	4.2	$y_{4,2} = \exp(7.94 - 3.66t + 1.04t^2 - 0.12t^3 + 0.004t^4)$	0.08	0.76
5	5.2	$y_{5,2} = \exp(8.64 - 4.6t + 1.46t^2 - 0.19t^3 + 0.008t^4)$	0.06	0.78
6	6.2	$y_{6,2} = 51.9 - 2.9t$	0.15	0.235
7	7.2	$y_{7,2} = \exp(7.59 - 3.4t + 0.93t^2 - 0.1t^3 + 0.004t^4)$	0.1	0.72
8	8.2	$y_{8,2} = \exp(8.3 - 3.9t + 1.12t^2 - 0.126t^3 + 0.005t^4)$	0.07	0.77
9	9.2	$y_{9,2} = \exp(4.43 - 0.13t)$	0.008	0.597
10	10.2	$y_{10,2} = \exp(5.04 - 0.2t)$	0.007	0.61

зависимости от варианта опыта менялся от 10.8 до 23.5%.

Следовательно, основная масса способного к миграции кальция удалялась из почвы на начальном этапе промывания, а “фонд” способных к миграции катионов кальция по мере увеличения объема просочившейся влаги снижался. Аналогичные данные получены в модельных экспериментах с конверсионным мелом [40].

Закономерности, выявленные при анализе данных масштаба миграции в годы с количеством осадков ниже среднемноголетнего уровня, целиком сохранялись и в годы с количеством осадков, равным среднемноголетнему уровню увлажнения. С ростом дозы применения мелиоранта мас-

штабы потерь кальция из почвы отдельных вариантов опыта увеличивались. Чем меньше был размер частиц, тем элювиальные потери больше. При этом доля почвенного кальция в общем объеме мигрирующего кальция снижалась.

В отдельные сроки проведения эксперимента миграционная подвижность кальция в почве с использованием крупных частиц доломита и ЕСМ в заведомо завышенных дозах начинала превосходить миграционную подвижность кальция, внесенного с доломитовой мукой. Количество вымываемого кальция после уборки гороха было больше, чем после уборки горчицы.

Эмпирические зависимости 2.2, 4.2, 5.2, 7.2, 8.2, 9.2, 10.2 для лет со среднемноголетним уров-

Таблица 5. Миграция кальция за 10 лет изучения в годы с увлажнением выше среднемноголетнего уровня, мг

Сроки	1. НРК (фон)	2. Фон + + ДМ 1 H_r	3. Фон + М (5–7 мм) 1 H_r	4. Фон + М (5–7 мм) 3 H_r	5. Фон + М (5–7 мм) 5 H_r	6. Фон + М (7–10 мм) 1 H_r	7. Фон + М (7–10 мм) 3 H_r	8. Фон + М (7–10 мм) 5 H_r	9. Фон + + ***ЕСМ 1 H_r	10. Фон + + ЕСМ 3 H_r
1	21.5	506	101	210	239	74.1	161	248	110	259
2	21.0	49.0	36.2	44.9	53.3	38.8	49.3	51.7	49.3	77.7
3	36.2	63.8	38.1	56.4	58.4	33.3	36.7	66.3	80.2	112
4	21.5	40.2	31.3	31.6	55.2	27.0	30.0	50.6	42.0	53.3
5	53.7	79.8	108	90.7	95.0	66.7	56.0	62.4	58.2	74.2
6	31.7	53.0	49.0	60.6	74.9	29.9	50.4	65.9	52.8	54.6
7	44.0	55.9	59.9	58.8	60.7	45.3	67.9	132	46.6	74.3
8	17.6	25.1	28.0	36.7	29.6	20.4	23.2	33.6	30.9	27.9
9	24.4	42.6	50.8	52.2	66.2	54.1	57.5	48.8	49.6	50.7
10	18.6	15.4	17.4	22.2	68.0	13.8	22.1	28.2	20.8	31.9
Σ, мг	290	930	520	664	800	403	554	788	541	815
*%	114	109	111	114	116	113	113	115	117	119

*Доля от вымытого Са в годы со среднемноголетним уровнем увлажнения, %.

нем увлажнения имели экспоненциальный тип динамики (табл. 4). Модели для вариантов опыта 9, 10 отличались от остальных моделей более плавным характером тренда. Динамика изученного показателя в вариантах опыта 1, 3 и 6 в среднем статистически была незначимой.

При возрастании объема дренируемой влаги с 800 до 1200 мл в годы с большим увлажнением, чем среднемноголетнее, элювиальные потери Са еще более увеличивались. В контрольном варианте опыта они составили 290 мг. В варианте опыта с ДМ увеличились до 931 мг, т.е. в 3.2 раза (табл. 5). Доля кальция мелиоранта в общем объеме мигрирующего кальция увеличилась до 640 мг (68.8%). Во всех других мелиорированных вариантах суммарное количество удаляемого из почвы кальция было меньше. По количеству вымытого кальция из почвы отдельных вариантов опыта за 10 опыто-лет все варианты можно выстроить в следующий по убыванию ряд: доломитовая мука > ЕСМ в дозе 3 H_r > мелиорант (М) размером 5–7 мм в дозе 5 H_r > М размером 7–10 мм в дозе 5 H_r > М размером 5–7 мм в дозе 3 H_r > М размером 7–10 мм в дозе 3 H_r > ЕСМ в дозе 1 H_r > М размером 5–7 мм в дозе 1 H_r > М размером 7–10 мм в дозе 1 H_r > контроль.

Эмпирические зависимости 2.3, 4.3, 5.3, 7.3, 8.3, 9.3, 10.3 для лет с избыточным увлажнением были статистически значимыми и имели экспоненциальный тип динамики. Модели в вариантах опыта 9, 10 отличаются от остальных моделей бо-

лее простой динамикой экспоненциального типа (табл. 6). В вариантах опыта 1, 3 и 6 динамика изученного показателя была в среднем статистически незначимой.

Проведенное исследование свидетельствовало о значительной подвижности кальция, внесенного в составе доломита, в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Наличие мигрирующего кальция установлено во всех порциях фильтра. Максимальные непродуцируемые потери кальция были характерны спустя год после известкования. В зависимости от варианта опыта они менялись от 473 до 64 мг (61.5 и 22.0% соответственно от всего количества удаляемого кальция в годы с увлажнением меньше среднемноголетнего уровня) (табл. 7).

Доля вымываемого кальция в годы со среднемноголетним уровнем увлажнения снижалась. Если за первые 10 промываний непродуцируемые потери кальция менялись в зависимости от варианта от 301 до 770 мг, то за последующие 10 промываний суммарное количество вымытого кальция уменьшилось до 126 и 55.8 мг (16–19% от вымытого количества в годы с увлажнением меньше среднемноголетнего уровня).

За следующие 10 промываний при увеличении количества воды с 800 до 1200 мл (в годы максимального дренирования почвы) миграционные потери кальция еще более уменьшились и менялись в зависимости от варианта опыта от 33 до 99.9 мг. Суммарная относительная доля выщела-

Таблица 6. Эмпирические модели миграции Са при известковании частицами доломита в переувлажненные годы

Вариант	№ модели	Модель	p-value	R ²
1	1.3	$y_{1.3} = 30.7 - 0.3t$	0.8	0.005
2	2.3	$y_{2.3} = \exp(9.72 - 4.8t + 1.36t^2 - 0.15t^3 + 0.006t^4)$	0.02	0.857
3	3.3	$y_{3.3} = 74.4 - 4.07t$	0.24	0.165
4	4.3	$y_{4.3} = \exp(7.84 - 3.47t + 0.997t^2 - 0.112t^3 + 0.004t^4)$	0.08	0.76
5	5.3	$y_{5.3} = \exp(8.4 - 4.19t + 1.35t^2 - 0.17t^3 + 0.008t^4)$	0.06	0.785
6	6.3	$y_{6.3} = 56.4 - 2.9t$	0.19	0.2
7	7.3	$y_{7.3} = \exp(7.4 - 3.13t + 0.86t^2 - 0.09t^3 + 0.003t^4)$	0.1	0.71
8	8.3	$y_{8.3} = \exp(8.17 - 3.68t + 1.07t^2 - 0.12t^3 + 0.005t^4)$	0.08	0.75
9	9.3	$y_{9.3} = \exp(4.55 - 0.12t)$	0.008	0.6
10	10.3	$y_{10.3} = \exp(5.13 - 0.17t)$	0.004	0.65

Таблица 7. Количество мигрирующего кальция в годы с различной влагообеспеченностью почвы, мг

Сроки	Сумма вымытого Са в годы с увлажнением ниже среднегогодового уровня увлажнения	Сумма вымытого Са в годы со среднегогодовым уровнем увлажнения, мг	Разница между годами “среднегогодового” и “недостаточного” уровня увлажнения	Доля вымытого Са, %	Сумма вымытого Са в годы с увлажнением выше среднегогодового уровня	Разница между годами выше “среднегогодового” и “нормального” уровня увлажнения	Доля вымытого Са, %	Суммарная доля вымытого Са (400 мл 2-й срок + 400 мл 3-й срок) за годы “нормального” (2-й срок) и “избыточного” (3-й срок) увлажнения
1	230	254	24.2	10.5	304	49.6	21.6	32.1
2	770	853	83.3	10.8	931	77.5	10.1	20.9
3	405	467	62.6	15.5	520	52.5	13.0	28.5
4	472	581	110	23.2	664	82.9	17.6	40.8
5	561	688	126	22.5	732	44.3	7.9	30.4
6	301	357	55.8	18.6	390	33	11.0	29.5
7	415	488	73.9	17.8	532	43.2	10.4	28.3
8	567	688	121	21.3	788	99.9	17.6	39.0
9	372	460	87.5	23.5	520	60.1	16.2	39.7
10	582	688	106	18.2	815	128	22.0	40.1

чиваемого кальция от вымытого за первые 10 промываний варьировала от 7.9 до 17.6%. Исключение составлял вариант опыта, мелиорируемый ЕСМ в дозе 3 Н_г, где количество удаляемого кальция было больше, чем за 10 предыдущих промываний.

Следовательно, по мере увеличения объема просачивающейся влаги “фонд” способных к миграции соединений кальция в почве уменьшался, а непродуцируемые потери кальция снижались.

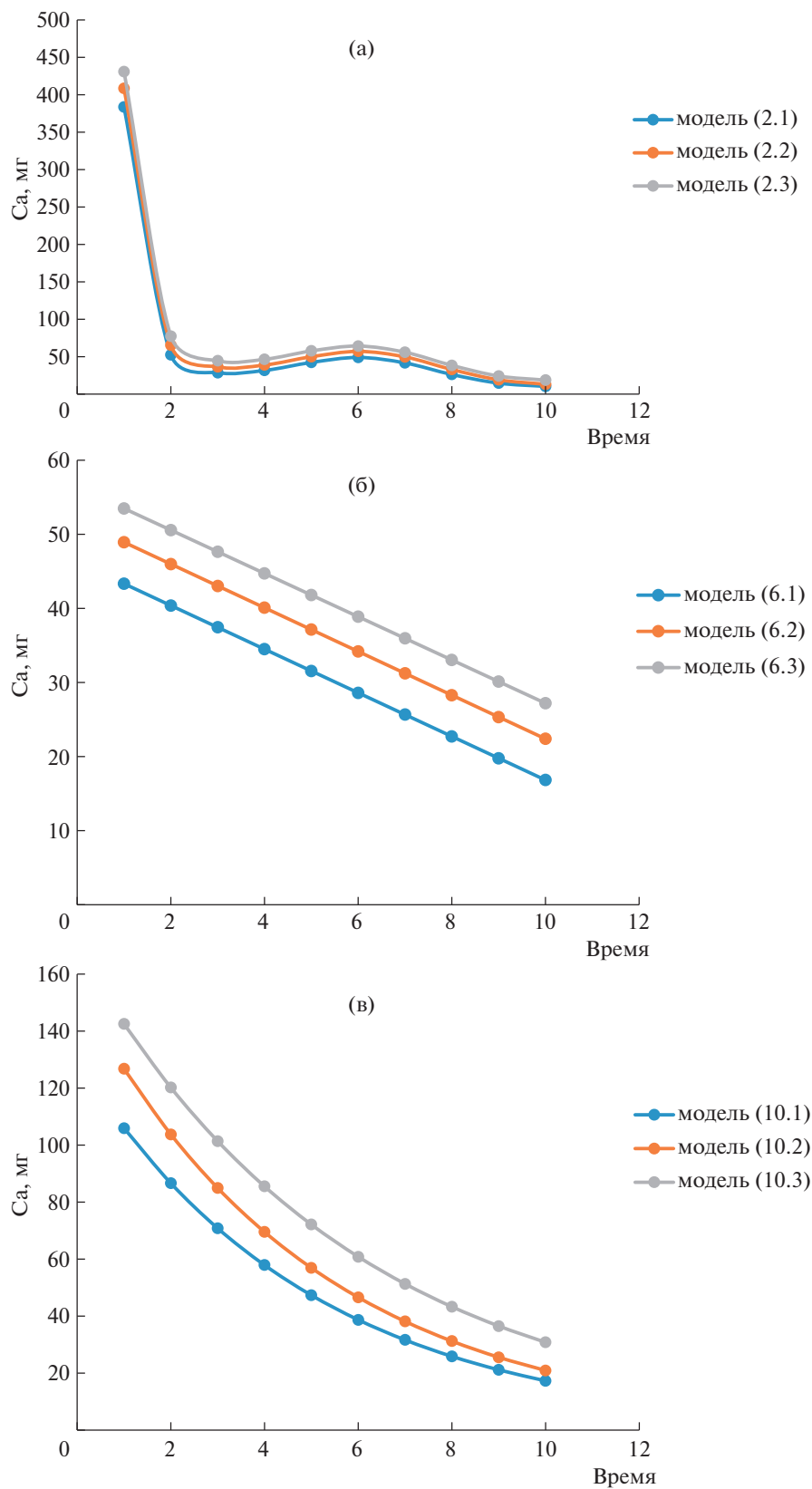


Рис. 1. Модели миграции кальция в вариантах: (а) – с доломитовой мукой (вариант 2), (б) – с доломитовыми частицами размером 7–10 мм в дозе 1 H_r (вариант 6), (в) – с использованием ЕСМ в дозе 3 H_r (вариант 10) при разном уровне увлажнения.

Суммарная доля выщелачиваемого кальция за 20 промываний (годы среднемноголетнего и избыточного уровня увлажнения) составили от 20.9 до 40.8% от вымытого за первые 10 промачиваний.

На рис. 1 в качестве примера приведены графики миграции кальция (суммарные за 10 лет наблюдений в годы недостаточного, среднемноголетнего и избыточного увлажнения) в вариантах с ДМ, с М (7–10 мм) по 1 H_r и с ЕСМ в дозе 3 H_r . Графики почти параллельны и с увеличением влагообеспеченности почвы располагаются выше. Это свидетельствовало о сходстве процессов вымывания кальция в годы с различными уровнями влагообеспеченности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 10-вариантном модельном опыте на колонках проведено сравнительное изучение масштаба миграции Са из мелиорированной частицами доломита размером 5–7 и 7–10 мм дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы после уборки растений при разном уровне увлажнения. Наличие мигрирующего кальция установлено во всех порциях фильтрата. За 10 промываний, моделирующих объем просачивающейся влаги, в годы с увлажнением меньше среднемноголетнего уровня количество выщелачиваемого Са из мелиорированных вариантов составило от 770 мг (вариант с ДМ, внесенной в дозе 1 H_r) до 301 мг в варианте с частицами доломита размером 7–10 мм в дозе 1 H_r . Максимальные непроизводительные потери Са были характерны спустя 1 год после известкования. Чем выше доза применения доломита и меньше размер частиц, тем элювиальные потери были больше. Увеличение объема просочившейся влаги в 2 раза с 400 до 800 мл (годы соответствовали среднемноголетнему уровню увлажнения) привело к усилению миграционных потерь Са. Потери, в зависимости от варианта опыта, возросли на 10.8–23.5% по сравнению с годами с уровнем увлажнения меньше среднемноголетнего.

При возрастании объема дренируемой влаги с 800 до 1200 мл в годы с увлажнением выше среднемноголетнего элювиальные потери возросли в зависимости от варианта опыта до 390–931 мг. По количеству вымытого Са из почвы отдельных вариантов опыта за 10 опыто-лет все варианты можно выстроить в следующий по убыванию ряд: доломитовая мука > ЕСМ в дозе 3 H_r > мелиорант (М) размером 5–7 мм в дозе 5 H_r > М размером 7–10 мм в дозе 5 H_r > М размером 5–7 мм в дозе 3 H_r > М размером 7–10 мм в дозе 3 H_r > ЕСМ в дозе 1 H_r > М размером 5–7 мм в дозе 1 H_r > М

размером 7–10 мм в дозе 1 H_r > контроль.. Количество вымываемого Са после уборки гороха было больше, чем после уборки горчицы.

Эмпирические зависимости, описывающие потери Са за 10 лет наблюдений, были статистически значимыми и имели экспоненциальный тип динамики. Графики миграции Са (суммарное количество за 10 лет наблюдений) были почти параллельными и с увеличением объема просочившейся влаги (уровня влагообеспеченности почвы) располагались выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Ковлева А.О. Мелиоративные свойства, удобрительная ценность и скорость растворения в почвах различных по размеру фракций отсева доломита, используемого для дорожного строительства // *Агрохимия*. 2016. № 2. С. 31–41.
2. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // *Агрохимия*. 2016. № 12. С. 42–50.
3. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Динамика содержания обменных катионов кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2018. № 3. С. 50–61.
4. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Влияние разных по размеру фракций доломита на показатели почвенной кислотности легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 27–37.
5. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Изучение динамики содержания подвижного железа в легкосуглинистой дерново-подзолистой почве, мелиорируемой доломитом // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 52–61.
6. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В. Динамика содержания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита // *Агрохимия*. 2018. № 8. С. 52–63.
7. Litvinovich A., Pavlova O., Lavrishchev A., Bure V.M., Saljnikov E. Dynamics of soil pH after utilization of by-products of industrial rock processing as a calcareous material in acid soils // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2021. T. 52. № 2. С. 93–101. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1849267>
8. Павлова О.Ю., Берсенева А.О., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Салаев И.В., Буре В.М. Исследование скорости растворения крупных частиц доломита в кислой дерново-подзолистой супесчаной почве по данным лабораторного опыта // *Агрофизика*. 2020. № 3. С. 23–28.

9. Литвинович А.В., Берсенева А.О., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Хомяков Ю.В., Дубовицкая В.И. Разложение крупных частиц доломита в кислой дерново-подзолистой супесчаной почве; влияние известкования и различного уровня минерального питания пшеницы на изменение кислотно-основных свойств и урожайность растений (по данным модельного опыта) // *Агрофизика*. 2021. № 1. С. 14–18.
10. Литвинович А.В., Берсенева А.О., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Процесс разложения крупных частиц доломита в сильнокислой дерново-подзолистой супесчаной почве. Динамика убыли массы доломита на разных стадиях растворения (по данным лабораторного опыта) // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 52–60
11. Литвинович А.В., Салаев И.В., Манаков П.С., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Содержание и распределение обменных катионов Са и Mg в профиле дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, мелиорированной возрастающими дозами доломитовых частиц крупного размера // *Агрохимия*. 2021. № 4. С. 9–21.
12. Лаврищев А.В., Литвинович А.В. Стабильный стронций в агроэкосистемах. СПб.—Краснодар—М., 2019. 192 с.
13. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и распределение свинца в зоне действия завода туковой промышленности // *Агрохимия*. 1996. № 3. С. 92–100.
14. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и особенности распределения валовых и кислоторастворимых форм соединений тяжелых металлов в профиле сероземно-оазисных почв в зоне химического завода // *Агрохимия*. 1999. № 8. С. 68–78.
15. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Осипов А.И. Содержание и запасы серы в техногенно-загрязненных почвах // *Агрохимия*. 1998. № 12. С. 64–70.
16. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Миграция фтора в почвах различных природно-климатических областей // *Агрохимия*. 1998. № 6. С. 74–81.
17. Litvinovich A., Pavlova O., Lavrishchev A., Bure V., Saljnikov E. Migration behaviour of fluoride in contaminated soils near ammophos production plant: laboratory studies // *Biol. Commun.* 2019. V. 64. № 4. С. 270–278.
18. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О вымывании кальция и стронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, произвесткованной конверсионным мелом // *Агрохимия*. 1999. № 9. С. 64–67.
19. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Юзмухаметов Д.Н., Лаврищев А.В. Миграционная способность стабильного стронция в дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России (по данным модельных опытов) // *Почвоведение*. 2008. № 5. С. 568–575.
20. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю. Интенсивность миграции кальция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, произвесткованной различными дозами мелиоранта (по данным модельного опыта) // *Агрохимия*. 2015. № 6. С. 84–89.
21. Павлова О.Ю., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Шевченко Е.Е., Салаев И.В., Белимов А.А. Изучение почвенных растворов, вымываемых из мелиорированных дерново-подзолистых почв // *Агрохимия*. 2018. № 12. С. 69–76.
22. Павлова О.Ю., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М. Миграционная подвижность фтора при мелиорации кислых почв фторсодержащими отходами промышленности // *Агрофизика*. 2019. № 3. С. 20–25.
23. Литвинович А.В., Бакина Л.Г., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Устойчивость органического вещества и кальция известкованной почвы к вымывающему действию воды // *Агрохимия*. 2017. № 3. С. 58–68.
24. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Чернов Д.В. Калийное состояние дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы при окультуривании и под залежью // *Почвоведение*. 2006. №7. С. 876–882.
25. Литвинович А.В., Дричко В.Ф., Павлова О.Ю. Оценка параметров функции удержания кальция и стронция дерново-подзолистой супесчаной почвой при мелиорации конверсионным мелом (по данным модельного опыта) // *Современные проблемы опытного дела: Мат-лы Международ. науч.-практ. конф. СПб., 2000*. С. 204–210.
26. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Потери Са, Mg, К, Na, Fe и F из орошаемой лугово-сероземной почвы в результате миграции. Эмпирические модели процесса элювирования (по данным лабораторного опыта) // *Агрохимия*. 2020. № 1. С. 58–69.
27. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю. Моделирование процессов вымывания кальция и стронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, мелиорируемой конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2017. № 2. С. 48–55.
28. Корнилов М.Ф., Небольсин А.Н., Семенов В.А. Известкование кислых почв нечерноземной полосы СССР. Л.: Колос, 1971. 256 с.
29. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв. Результаты 50-летних полевых опытов. СПб., 2010. 253 с.
30. Роде А.А. Водный режим и влагообеспечивающая способность дерново-подзолистых почв // *Почвоведение*. 1965. № 1. С. 49–58.
31. Сайт “Погода и климат” Электр. ресурс. Доступ: <http://www.pogodaiklimat.ru/>
32. Роде А.А. Водный режим и его типы // *Почвоведение*. 1956. № 4. С. 1–15.
33. Пестряков В.К. Окультуривание почв Северо-Запада, Л.: Колос, 1977. 343 с.
34. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб., РАСХН, АФИ, СПбГУ, 2007. 141 с.
35. Орлова Н.Е., Бакина Л.Г. Современные процессы гумусообразования в окультуренных дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России // *Агрохимия*. 2002. № 11. С. 5–12.
36. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф., Чернов Д.В., Фомина А.С. Изменение кислотно-основ-

- ных свойств окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы в зависимости от срока нахождения в залежи // Почвоведение. 2005. № 10. С. 1232–1239.
37. Сушков С.Ф. Динамика почвенно-растительного покрова на залежных землях (на примере юго-западных районов Ленинградской области): Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Л., 1974. 25 с.
38. Литвинович А.В., Дричко В.Ф., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Шабанов М.В. Изменение кислотно-основных свойств окультуренных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава в процессе постагрогенной трансформации // Почвоведение. 2009. № 6. С. 680–686.
39. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Трансформация состава гумуса дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава под действием возрастающих доз извести и в постагрогенный период // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1362–1369.
40. Lavrishchev A., Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Bure V.M., Schindler U., Saljnikov E. Contamination of the agroecosystem with stable strontium due to liming: an overview and experimental data // Advances in understanding soil degradation. “Innovations in Landscape Research” Cham, 2022. С. 423–449.

Calcium Losses from Reclaimed Sod-Podzolic Light Loamy Soil at Different Levels of Moisture Availability

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

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

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

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

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

In a 10-year laboratory experiment on columns, the migration mobility of calcium remaining in dolomite-reclaimed sod-podzolic soil after harvesting crops was studied. A “fund” of calcium compounds capable of migration in years with average long-term, excessive and insufficient levels of moisture has been identified. It was found that an increase in the volume of drained moisture contributed to an increase in unproductive calcium losses. The higher the dose of dolomite and the smaller the particle size, the greater the eluvial calcium loss. It is shown that the bulk of the calcium capable of migration was removed from the soil at the initial stage of washing. During the entire study period, migration calcium losses after pea harvesting exceeded losses after mustard cultivation. Empirical dependences describing the loss of calcium from the soil produced by dolomite in a wide range of doses have been developed. Various variants of the experiment were ranked according to the scale of calcium losses. It is shown that over 10 years of observations, the maximum calcium losses as a result of migration were characteristic of the variant of the experiment produced by dolomite flour calculated from the full dose of hydrolytic acidity. Calcium losses from soil reclaimed by dolomite particles of 5–7 and 7–10 mm in doses equal to 3 and 5 H_c were less.

Key words: sod-podzolic light loamy soil, soil moisture availability, chemical reclamation, eluvial calcium losses, empirical models of migration process.

УДК 577.19:58.071

ТОКСИНЫ ПОЧВЕННЫХ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ГРИБОВ: РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ, БИОДЕГРАДАЦИЯ[§]

© 2023 г. Ю. М. Поляк^{1,*}, В. И. Сухаревич¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН –
Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН
197110 Санкт-Петербург, Корпусная ул., 18, Россия

*E-mail: yuliyapolyak@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Почвенные микроскопические грибы играют важную роль в микробно-растительных взаимодействиях, являясь продуцентами различных биологически активных соединений, и, прежде всего, микотоксинов. Микотоксины обнаруживают в почве, в пищевом сырье сельскохозяйственного происхождения, в кормах и продуктах питания. Токсикообразующие грибы поражают многие сельскохозяйственные культуры, и содержание микотоксинов в растительном сырье может быть достаточно высоким. В настоящем обзоре рассмотрены основные свойства микотоксинов и их продуценты, экологическая роль, вклад в микробно-растительные взаимодействия, во взаимодействия между микроорганизмами, биотрансформация токсинов в почве.

Ключевые слова: микромицеты, микотоксины, микробно-растительные взаимодействия, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*.

DOI: 10.31857/S0002188123100125, EDN: OETZAM

ВВЕДЕНИЕ

Микроскопические грибы – важнейший компонент микробного сообщества почвы. Обладая огромной биомассой, превышающей 50% от общей биомассы почвенных микроорганизмов, микромицеты играют ключевую роль в происходящих в почве процессах [1]. Они разлагают органические вещества различного происхождения и состава и образуют многие биологически активные соединения, в том числе ферменты, витамины, органические кислоты, антибиотики и, что особенно важно, токсины [2, 3].

Широкое распространение грибов в почвах разных типов, в ризосфере растений, в сельскохозяйственных угодьях, в воздухе и среде обитания человека связано с их свойством адаптироваться к разнообразным условиям, в том числе при освоении антропогенных субстратов [4]. Этому способствует быстрый рост, интенсивный способ размножения и распространения, высокоэффективный лабильный метаболизм. Субстратом для грибов могут служить самые разные по химическому составу и свойствам соединения [5]. Грибы

играют важную роль в микробном выветривании карбонатных пород и формировании потока двуокиси углерода в атмосферу, в самовосстановлении почв после антропогенного воздействия [6, 7].

Представители различных систематических групп грибов, в том числе несовершенные грибы, аскомицеты, зигомицеты, оомицеты, и энтомопатогенные грибы способны синтезировать токсины [8]. Аккумуляция токсинов грибов в почве вызывает токсикоз, в результате которого снижается продуктивность растений. В агрокультуре данный феномен известен как “утомление” почвы [9]. К изменению состава грибного сообщества в пользу токсикообразующих видов и накоплению микотоксинов может привести антропогенное воздействие, например, засоление [10], загрязнение почвы нефтью [11, 12] или длительное применение минеральных удобрений [13]. В процессе нитрификации грибы образуют токсичные соединения из группы гидроксамовых кислот, которые могут стать причиной токсикоза почв [14]. Синтез этих соединений усиливается под влиянием ингибиторов нитрификации.

Токсигенные грибы инфицируют сельскохозяйственные растения в период вегетации, загрязняя микотоксинами полученный урожай, что

[§] Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (тема АААА-А19-119020190122-6).

может вызвать тяжелые заболевания человека и животных (микозы и микотоксикозы) при употреблении в пищу растительных продуктов и кормов [15]. Создаваемые токсигенными микромицетами проблемы как в теоретическом, так и в практическом аспектах, относятся к общебиологическим и должны быть учтены при разработке стратегий защиты окружающей среды и обеспечения безопасности продуктов питания. В настоящем обзоре рассмотрены основные свойства и продуценты наиболее распространенных микотоксинов, их экологическая роль и участие в микробно-растительных взаимодействиях, биодegradация микотоксинов почвенными микроорганизмами.

МИКОТОКСИНЫ И ИХ ПРОДУЦЕНТЫ

Среди многих биологически активных метаболитов, выделяемых микромицетами в окружающую среду, микотоксинам уделяется особое внимание. Об отравлении людей и животных токсинами грибов известно с давних времен [16]. Эрготизм – тяжелое заболевание, широко распространенное в средневековой Европе, был вызван употреблением хлеба, изготовленного из зерна, зараженного грибами *Claviceps purpurea* (спорыньей). Однако первый микотоксин – афлатоксин, открытие которого положило начало развитию микотоксикологии, был выделен и идентифицирован лишь в начале 60-х годов прошлого столетия [17].

В настоящее время известно более 300 токсинов микроскопических грибов, определены микотоксины, встречающиеся в продуктах растениеводства, и концентрация многих из них в собранном урожае часто превышает допустимый уровень [18–20]. Продуцентами токсинов в основном являются несовершенные грибы рр. *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Trichoderma*, *Paecilomyces*. Не все виды указанных родов образуют токсины, но некоторые из них могут синтезировать несколько разных токсинов.

Несмотря на то, что микромицеты растут на различных природных и синтетических субстратах, лишь определенные субстраты обеспечивают процесс токсинообразования, на остальных токсины не образуются [21]. Следует отметить, что неблагоприятные условия среды способствуют интенсификации токсинообразования [22, 23].

К числу основных микотоксинов, чрезвычайно разнообразных по химическому составу и механизму действия, относятся зеараленон, диоксиниваленон (ДОН, известный также как воли-токсин), ниваленон, афлатоксины, охратоксины, патулин и др. [24]. Наиболее опасными для чело-

века считаются афлатоксины, продуцентами которых являются грибы р. *Aspergillus* (отдел Ascomycota), и, прежде всего, *A. flavus* (табл. 1). Присутствие в пищевом сырье аспергиллов, продуцирующих афлатоксины B1, B2, G1, G2, обуславливает высокую степень риска для здоровья людей, связанную с гепатоканцерогенным действием [25]. Помимо человека, к афлатоксинам восприимчивы большинство млекопитающих, многие виды птиц и рыб, растения и микроорганизмы [21].

Представители р. *Aspergillus* (*A. carbonarius*, *A. niger*, *A. steynii*, *A. Westerdijkiae*) продуцируют охратоксины, оказывающие на животных тератогенное, канцерогенное, иммуносупрессивное и нефротоксичное действие [26]. Из двух охратоксинов (*A* и *B*), которые образуют аспергиллы, охратоксин *A* наиболее токсичен и широко распространен в пищевых продуктах и кормах [27, 28].

Представители р. *Penicillium* (отдел Ascomycota) обладают свойством приспосабливаться к самым разным условиям окружающей среды, в том числе низким температурам, благодаря чему их токсины могут накапливаться в растительном сырье не только в период вегетации растений, но и собранном урожае во время его хранения, когда большинство плесневых грибов погибает. У грибов *P. chrysogenum*, *P. vulpinum*, *P. spinulosum*, *P. griseofulvum*, *P. aurantiogriseum* выявлены метаболиты, крайне опасные для человека и животных – α -циклопизоновая кислота и клавиновые эргоалкалоиды [29]. Наиболее значимыми токсинами *Penicillium* spp. являются охратоксин *A* и патулин (табл. 1).

Среди 29 известных продуцентов патулина основным считается *P. expansum*, инфицирующий яблоки, сливы и другие фрукты [30]. *P. sclerotigenum* является основным продуцентом патулина в зараженном батате, а *Paecilomyces variotii* накапливает токсин в силосе. *A. clavatus* и *P. griseofulvum* образуют патулин в ячменном солоде, *P. griseofulvum*, кроме того, продуцирует патулин, заражая пшеницу [30].

Более 140 токсичных соединений образуют представители рода *Fusarium* [31]. Основные возбудители фузариозного поражения зерновых – виды *F. graminearum* и *F. culmorum*. Развитие этих видов сопровождается накоплением трихотеценов и зеараленона (табл. 1). Трихотецены дезоксиниваленол (ДОН), ниваленол и Т-2 токсин проявляют высокую токсичность на субклеточном, клеточном и организменном уровнях. Они легко проникают через липидные слои клеточных мембран и ингибируют синтез белка [32].

ДОН преобладает в загрязненных микотоксинами зерновых культурах во многих странах ми-

Таблица 1. Наиболее распространенные микотоксины и их продуценты [34, 35]

Микотоксины	Группа химических соединений	Продуценты	Субстрат	Токсическое действие
Афлатоксины (B1, B2, G1, G2)	Поликетиды	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. parasiticus</i> , <i>A. minisclerotigenus</i> , <i>Penicillium citrinum</i> , <i>P. digitatum</i>	Кукуруза, арахис, орехи, специи, сухофрукты и др.	Гепатотоксичность, канцерогенность, мутагенность, тератогенность
Дезоксиниваленол (вомитоксин)	Трихотецен типа B	<i>Fusarium culmorum</i> , <i>F. graminearum</i>	Пшеница, кукуруза, ячмень	Цито- и нейротоксичность, иммунотоксичность, тератогенность, генотоксичность
Ниваленол	Трихотецен типа B	<i>F. culmorum</i> , <i>F. poae</i> , <i>F. meridionale</i> , <i>F. graminearum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. cortaderiae</i> , <i>F. crookwellense</i> , <i>F. semitectum</i> , <i>F. pseudo-graminearum</i>	Зерновые культуры, солод, пиво, хлеб	Цитотоксичность, гепатотоксичность, иммунотоксичность
T-2/HT-2 токсины	Трихотецены типа A	<i>F. acuminatum</i> , <i>F. langsethiae</i> , <i>F. culmorum</i> , <i>F. chlamydosporum</i> , <i>F. poae</i> , <i>F. sporotrichoides</i> , <i>F. sporotrichoides</i> , <i>F. graminearum</i> , <i>F. culmorum</i> , <i>F. crookwellense</i>	Кукуруза, пшеница, рожь, овес, ячмень	Гепатотоксичность, миелотоксичность, дерматотоксичность
Зеараленон	Лактон резорциклической кислоты	<i>F. graminearum</i> , <i>F. culmorum</i> , <i>F. crookwellense</i>	Кукуруза, пшеница, ячмень, овес, сорго, просо, рис, пиво	Нестероидный эстроген, иммунотоксичность, канцерогенность, нефротоксичность, гематотоксичность
Охратоксин A	Дигидроизокумарин	<i>A. ochraceus</i> , <i>A. carbonarius</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. steynii</i> , <i>A. westerdijkiae</i> , <i>P. expansum</i> , <i>P. urticae</i> , <i>P. verrucosum</i>	Пшеница, ячмень, кукуруза, специи, кофе, вино, пиво	Нейротоксичность, терато- и канцерогенность, нефро- и гепатотоксичность, иммунотоксичность
Патулин	Трикетид	<i>P. verrucosum</i> , <i>P. expansum</i> , <i>P. griseofulvum</i> , <i>P. sclerotigenum</i> , <i>Aspergillus clavatus</i> , <i>A. giganteus</i> , <i>Paecilomyces variotii</i>	Яблоки, груши, вишни, абрикосы, персики, виноград, грейпфруты, овощи, злаки	Канцерогенность, мутагенность, иммунотоксичность, кардиотоксичность
Фумонизин B1	Структурный аналог сфинголипидов	<i>F. verticillioides</i> (ранее <i>F. moniliforme</i>), <i>F. proliferatum</i>	Кукуруза, ячмень, пшеница, овес, рис, маис, рожь, просо	Канцерогенность, нефро- и гепатотоксичность, иммунотоксичность
Альтернариол	Бензохроменон	<i>Alternaria alternata</i> , <i>Al. tenuissima</i>	Кукуруза, рис, пшеница, фрукты, овощи, масличные культуры, вино	Цитотоксичность, тератогенность, генотоксичность, мутагенность

ра, в том числе в России [33]. В некоторых регионах Европы ДОН загрязнены до 74% исследованных образцов зерна, Северной и Центральной Америки – до 64 и 70% соответственно, Южной Африки – до 63, Восточной Азии – до 85% [34]. Содержание ДОН и афлатоксинов в зерновых

культурах, зараженных *F. graminearum*, *F. culmorum* или *A. flavus*, бывает настолько высоким, что весь полученный урожай отбраковывают, что исключает его дальнейшую переработку [32].

Зеараленон также регулярно обнаруживают в зерне. Он оказывает на животных не свойствен-

ное другим микотоксинам прямое эстрогенное действие, снижающее их репродуктивную функцию и плодовитость [35]. Токсичность зеараленона обусловлена наличием лактонной группы и свободной С-4 гидроксильной группы, которые необходимы для связывания с рецептором эстрогена.

Фумонизины (*B1*, *B2*, *B3*) присутствуют в кукурузе и ряде других зерновых, а также в зерновых продуктах (табл. 1). Фумонизин *B1* – наиболее распространенный и наиболее токсичный представитель этой группы [36]. Основными продуцентами фумонизинов являются *F. verticillioides* и *F. proliferatum*. Другие виды р. *Fusarium* также могут продуцировать эти соединения.

Представители еще одного рода из отдела Ascomycota – *Alternaria*, относятся к оппортунистическим патогенам [37]. Некоторые виды *Alternaria* продуцируют альтернариол, обладающий, помимо высокой цитотоксичности, генотоксическим и мутагенным действием [38, 39]. Кроме того, в растительных продуктах и кормах, зараженных *Alternaria*, обнаружены микотоксины – монометиловый эфир альтернариола и тенуазоновая кислота. Представители р. *Alternaria* обладают способностью к росту и синтезу токсинов при низких температурах, что способствует заражению пищевых продуктов и живых организмов, относящихся к разным звеньям пищевой цепи [40].

Следует отметить определенное структурное сходство между микотоксинами. Например, афлатоксины и охратоксины являются соединениями кумариновой природы, при этом в основе структуры афлатоксинов, охратоксинов, зеараленона и патулина лежит лактонное кольцо, с которым связана их токсичность [28]. В то же время различия в структуре микотоксинов определяют разнообразие токсических эффектов. Например, афлатоксин *B1*, благодаря своей структуре, образует ДНК-аддукты с гуанином, индуцируя образование раковых клеток [41]. Т-2 токсин и ДОН, токсичность которых связана с присутствием в молекуле эпоксидной группы, индуцируют апоптоз в иммунных клетках и ингибируют синтез белка, ДНК и РНК [19].

МИКОТОКСИНЫ В ПОЧВЕ

О накоплении и дальнейших превращениях микотоксинов в почве известно немного, хотя их распространение в пищевых продуктах активно изучали ранее и изучают в настоящее время [42, 43]. Микотоксины, накапливаясь в инфицированных грибами растениях, могут попадать в почву через корни, а также после сбора урожая, через оставшиеся на поле стебли и зерна. Извест-

но, что содержание микотоксинов в почве достигает микрограммов: зеараленона – до 72.1, дезоксиниваленола – до 32.1, охратоксина *A* – до 23.7, ниваленола – до 6.7, афлатоксина – до 5.5 мкг/кг почвы [43].

Концентрация микотоксинов в почве варьирует из года в год в зависимости от погодных условий. Наиболее важными факторами, которые способствуют накоплению микотоксинов, являются температура и влажность, усиливающие активность окислительных и гидролитических ферментов и создающие благоприятные условия для размножения микромицетов [44, 45].

В тропических и субтропических регионах с высокой температурой и влажностью широко распространены *Aspergillus* spp. – продуценты афлатоксинов и охратоксина [34]. *Penicillium* spp., среди которых много опасных патогенов растений, растут и образуют токсины в широком диапазоне температур, адаптировались к разным условиям и распространены повсеместно [46, 47]. Различия в оптимальных для синтеза охратоксина температурах у микромицетов *P. verrucosum* (4–31°C) и *A. ochraceus* (12–37°C) объясняют, почему первые доминируют в районах земного шара с умеренным климатом, а вторые – в субтропических и тропических областях [48].

Большинство токсигенных грибов способны существовать в почве на протяжении нескольких месяцев, при этом многие из них при наличии питательных веществ и определенных условий окружающей среды (температуры, влажности и т.д.) питаются сапротрофно. Микотоксины и их продуценты оказывают влияние на все важнейшие показатели качества почвы: ее продуктивность, свойства и здоровье.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ МИКОТОКСИНОВ

На протяжении многих лет микотоксины рассматривали как продукты жизнедеятельности грибов, не имеющие особого значения для микробного метаболизма. Однако в настоящее время все более очевидной становится важная роль, которую эти вторичные метаболиты играют в экологии микроорганизмов и экологических функциях почв [35]. Токсины помогают микромицетам-продуцентам занять свою экологическую нишу, обеспечивая им защиту от других микроорганизмов. Например, представители рр. *Aspergillus*, *Trichoderma* и *Penicillium* продуцируют глиотоксин, который обладает антибактериальной и противогрибковой активностью и является фактором вирулентности патогенных микроскопических грибов *Aspergillus fumigatus* [49]. Многие микромицеты р. *Fusarium*

образуют фузариевую кислоту, обладающую антибактериальной активностью. Полагают, что в основе механизма токсичности фузариевой кислоты лежит способность оказывать влияние на усвоение клетками бактерий железа [50].

Микотоксины могут действовать на чувство кворума у бактерий [51]. Чувство кворума (quorum sensing, QS) – способность регуляции экспрессии генов у микроорганизмов в зависимости от плотности популяции, является важным механизмом, с помощью которого они регулируют процессы своего развития. В некоторых исследованиях продемонстрировано участие микотоксинов в нарушении передачи сигналов кворума. Например, патулин может препятствовать QS-коммуникации бактерий в почве [52]. Микотоксины зеараленон и фумонизин ингибируют чувство кворума у бактерий *Chromobacterium violaceum* [53]. Фузариевая кислота в низких концентрациях ингибирует чувство кворума у агента биоконтроля *Pseudomonas chlororaphis*, действуя на образование молекул ацил гомосеринлактона, а в более высоких концентрациях ингибирует образование бактериями противогрибкового метаболита феназин-1-карбоксамид [54].

Микотоксины могут оказывать влияние на процессы образования биопленок. Например, продуцируемый представителями р. *Fusarium* токсин зеараленон подавляет образование биопленок возбудителями кандидоза р. *Candida* [55], а образуемый *Penicillium expansum* патулин оказывает влияние на образование биопленок *P. aeruginosa* и *Achromobacter* sp. [56].

Кроме того, микотоксины могут быть вовлечены в специфические взаимодействия микромицетов между собой, обеспечивая экологические преимущества тем или иным видам. Установлено, что в почве *Fusarium oxysporum* может подавлять синтез афлатоксина *Aspergillus flavus*, что способствует повышенному накоплению микотоксина фумонизина [57]. Сообщается о значительном увеличении уровня дезоксиниваленола и зеараленона, продуцируемых *F. culmorum*, при совместном культивировании с *Alternaria tenuissima* [58].

Следует отметить роль микотоксинов в патогенности, агрессивности и/или вирулентности грибов. Многие исследователи подчеркивают сильную корреляцию между токсинообразованием и вирулентностью [35]. Известно, что фузариевая кислота усиливает вирулентность *F. oxysporum* как для растений, так и для животных-хозяев [59]. Глиотоксин, синтезируемый *A. fumigatus*, действует как фактор вирулентности, регулирующий системные микозы у позвоночных [49].

Несмотря на то, что в настоящее время роль токсинов в процессах жизнедеятельности микромицетов до конца не ясна, они несомненно являются неотъемлемой частью микробных взаимодействий и взаимодействий с организмами-хозяевами. Микотоксины образуются в ответ на поступающие из окружающей среды сигналы и сами служат такими сигналами, обеспечивая своим продуцентам защиту от конкурирующих микроорганизмов и способствуя успешной колонизации организмов-хозяев. Синтез токсинов – процесс сложный и энергоемкий для клеток, и трудно предположить, что грибы продуцируют их без особой надобности. Очевидно, что одной из функций этих агрессивных метаболитов является обеспечение грибам возможности занять определенную нишу и успешно конкурировать с другими организмами.

ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ТОКСИНООБРАЗУЮЩИХ ГРИБОВ С РАСТЕНИЯМИ

Грибы считаются основными патогенами растений, при этом характер взаимоотношений между грибами и растениями может быть различным. Например, связанный с растениями образ жизни представителей р. *Aspergillus* варьирует от сапрофитов и бессимптомных эндофитов до фитопатогенов [60]. Многие почвенные виды р. *Fusarium* осуществляют паразитический образ жизни и имеют широкий спектр растений-хозяев. Тем не менее, они относятся к факультативным сапротрофам, и сапротрофный способ существования для них является основным [32].

Переход от одной формы существования к другой происходит в результате значительных изменений транскриптома, затрагивающих в первую очередь образование вторичных метаболитов [61]. Многие микромицеты образуют фитотоксины, например, *Penicillium daleae*, *P. rubrum*, *P. funiculosum*, *Fusarium solani*, *Rhizopus stolonifer* и др. [62]. Известно, что трихотеценовые микотоксины играют важную роль в патогенезе наземных частей растений, и продуценты этих соединений – микромицеты р. *Fusarium* имеют селективное преимущество перед не образующими токсины микромицетами [63]. Токсины, синтезируемые представителями р. *Aspergillus*, такие как афлатоксин и стеригматоксин, фитотоксичны, ингибируют фотосинтез у растений и негативно влияют на функции каротиноидов [64].

Тем не менее, накапливаясь в растениях, микотоксины защищают их от других патогенных микроорганизмов. Так, патулин и клаватол, про-

дуцируемые эндофитом *Aspergillus clavatonanicus*, являются антагонистами фитопатогенов тиса *Taxus mairei* [65].

У растений-хозяев выявлены множественные механизмы защиты от фитопатогенных грибов. У арахиса защитные функции против *Aspergillus flavus* выполняет клеточная оболочка растения, содержащая полисахариды, целлюлозу, гемицеллюлозу, пектин. Растительные линолевые кислоты и 9- и 13-гидроперекиси жирных кислот оказывают существенное воздействие на некоторые виды *A. parasiticus* и *A. nidulans*, изменяя их обмен [66].

Важным звеном в защите растений от фитопатогенов являются белки устойчивости к болезням, так называемые **PR**-белки (Pathogenesis-Related proteins). Их индуцируют растения-хозяева в ответ на заражение патогеном [67]. Идентификация и характеристика генов **PR**-белков растений имеют большое значение для снижения патогенности грибов. Например, в кукурузе обнаружены белки *PR-1*, *PR-4*, *PR-5*, *PR-10* и хитиназа [68]. Гидролитические ферменты, такие как хитиназа растений, проявляют противогрибковую активность, разрушая компоненты клеточной стенки грибов и предотвращая развитие грибного мицелия [69].

Существенную роль в растительно-грибных взаимодействиях и в биосинтезе токсинов играет окислительный стресс. Он является критическим фактором, который может стимулировать образование микотоксинов и способствовать усилению вирулентности микромицетов [61]. В свою очередь, у растений возрастает активность и количество транскриптов антиоксидантных ферментов (глутатион-S-трансферазы, ферредоксина, медьсодержащей аминоксидазы, аскорбатпероксидазы и пероксидазы), участвующих в переработке и удалении активных форм кислорода (**АФК**) при заражении как токсигенными, так и нетоксигенными грибами [70].

Оппортунистические грибы обычно инфицируют растения через раны и повреждения, в то время как патогенные грибы проникают через клеточную оболочку, выделяя ферменты, разрушающие полисахариды: пектинэстеразу, арабинофуранозидазу, маннозидазу и галактуронидазу, а также амилазы и протеазы [71, 72].

Грибная патология растений, вследствие ее роли в сельском хозяйстве, экономике и в жизни человека, приобрела статус важнейшей проблемы. В значительной степени она связана и с животноводством, т.к. пищевая цепь растительные корма—животные—человек замыкается на здоровье человека.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ДРУГИМИ МИКРООРГАНИЗМАМИ И БИОТРАНСФОРМАЦИЯ МИКОТОКСИНОВ В ПОЧВЕ

Значительную часть почвенной микробной биомассы составляют бактерии, играющие важную роль в экологии почв. Многочисленность и разнообразие бактерий позволяют им подвергать почвенные микотоксины различным превращениям, в том числе биотрансформации, детоксикации и деградации [73].

Биотрансформация микотоксинов включает в себя ацетилирование, гликозилирование, расщепление ароматических колец, гидролиз, дезаминирование, декарбоксилитрование и др. реакции. Тип реакции и стереохимические закономерности структурных превращений зависят от функциональных групп в молекулах микотоксинов, а также от специфических ферментов, вырабатываемых микроорганизмами-деструкторами [74, 75].

Многие исследования посвящены афлатоксину *B1*, отличающемуся высокой токсичностью и обладающему канцерогенными свойствами. Выделяют 2 основных пути детоксикации афлатоксина *B1*: модификацию дифуранового кольца и модификацию структуры кумарина [28]. *Mucosoccus fulvus* снижает содержание афлатоксина *B1* на 80.7% [76]. При деградации афлатоксина *B1* бактериями *Nocardia corynebacteroides* образуется менее токсичный афлатоксин *B2* и другие продукты. Внеклеточные ферменты *Rhodococcus erythropolis* осуществляют детоксикацию афлатоксина *B1*, что приводит к потере мутагенности [77].

Некоторые бактерии, например, *Pseudomonas putida*, *Bacillus licheniformis* и *Brevibacterium* sp. являются деструкторами охратоксина. Под действием суспензии свободных клеток *Pseudomonas putida*, концентрация охратоксина снижается на 8.5–25.7% [78].

Взаимодействие с бактериями может оказывать значительное влияние на метаболизм грибов, вызывая сверхпродукцию токсичных метаболитов или способствуя образованию новых природных веществ. Например, при совместном культивировании грибов *Fusarium tricinctum* и бактерий *Bacillus subtilis* обнаружены новые метаболиты, такие как макрокарпон, 2-карбоксиметиламинобензойная кислота, (-)-цитреозикумаринол [79]. Установлено, что бактерия *Ralstonia solanacearum* образует липопептид ралсоламицин, негативно влияющий на грибы р. *Fusarium* [80]. В то же время *Fusarium fujikuroi* в присутствии *Ralstonia solanacearum* образуют микотоксины бикаверин и боверицин, которые

проявляют антибактериальную активность по отношению к *Ralstonia*.

Образование таких микотоксинов, как зеараленон и фузонин, приводит к подавлению роста бактерий *Chromobacterium violaceum* [53]. Многие виды *Fusarium* образуют фузариевую кислоту, обладающую противобактериальной активностью [50]. В свою очередь, бактерия *Burkholderia ambifaria*, выделенная из ризосферы ячменя, способна использовать фузариевую кислоту в качестве единственного источника углерода и энергии [81].

Детоксикацию микотоксинов осуществляют и микроскопические грибы. Так, выделенный из почвы микромицет *Aspergillus tubingensis* отличается высокой толерантностью к фузариевой кислоте и обладает способностью к ее трансформации в значительно менее токсичный фузариол (5-бутил-2-пиридинэтанол) [82]. Микромицет *Colletotrichum* sp. осуществляет детоксикацию фузариевой кислоты, трансформируя ее в 4-бутил-2-карбокси-пиримидин [83], а *Mucor rouxii* – в 8-гидроксифузаровую кислоту [84].

Несмотря на рост количества исследований, посвященных микробной деградации микотоксинов, продукты деградации, а также биохимические и генетические механизмы, лежащие в основе этого процесса, пока до конца не определены [35]. Из имеющихся в настоящее время данных следует, что чувствительность микроорганизмов к микотоксинам весьма вариабельна и зависит как от индивидуальных свойств бактерий и грибов, так и от свойств токсинов. В различной степени, но микроорганизмы оказывают влияние на синтез и изменение качественно-количественного состава микотоксинов в почве, участвуя тем самым в природной регуляции данного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микромицеты – основные патогены растений, широко распространены в почвах под различными типами растительности, в том числе в почвах сельскохозяйственных угодий. Почвенные микромицеты являются продуцентами многих биологически активных веществ, из которых особого внимания заслуживают микотоксины, обладающие высокой токсичностью и представляющие опасность для человека и животных. Концентрация микотоксинов в почве достигает микрограммов, а в собираемом урожае часто превышает допустимый уровень и может составлять несколько грамм. Скармливание скоту и птице растительных кормов, содержащих микотоксины, приводит к отравлению животных и накоплению токсинов в продуктах животного происхождения – мясе, молоке

и яйцах. В силу опасности развития тяжелых заболеваний человека и массовых отравлений сельскохозяйственных животных проблема загрязнения микотоксинами сельскохозяйственной продукции выходит на передний план.

Почвенные микроорганизмы – бактерии и грибы отличаются разнообразием свойств, что позволяет им вступать в различные взаимоотношения с микотоксинами – от трансформации до полной деструкции. Учитывая, что этот процесс в почве происходит постоянно, очевидно, что он имеет существенное экологическое значение как фактор регуляции качественно-количественного состава микотоксинов в почве. Публикации, посвященные микроорганизмам, способным включать в свой метаболизм и трансформировать микотоксины, свидетельствуют о необходимости дальнейшего изучения микробных взаимодействий для разработки методов детоксикации микотоксинов.

В настоящее время не совсем понятна роль токсинов в процессах жизнедеятельности самих продуцентов. По мнению многих исследователей, одной из основных функций микотоксинов является защита микромицетов от других организмов, создание безопасной экологической ниши. Учитывая многообразие токсигенных грибов и широкий спектр токсинов грибов различных видов, очевидно, что это далеко не единственная функция токсинов. Это подтверждается филогенетическими исследованиями, показавшими, что токсигенные свойства у плесневых грибов сформировались в результате длительной эволюции [85]. Микотоксины могут действовать как сигнальные молекулы, которые оказывают влияние на реакции организма-хозяина и способствуют его успешной колонизации. Понимание экологической роли микотоксинов имеет важное значение для определения стратегий борьбы с инфекциями, вызванными токсигенными грибами, и загрязнением микотоксинами пищевых продуктов и кормов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев Д.Г. Структурно-функциональная роль почвы в биосфере. М.: Геос, 1999. 278 с.
2. Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
3. Широких А.А., Колупаев А.В. Грибы в биомониторинге наземных экосистем // Теор. и прикл. экол. 2009. № 3. С. 4–14.
4. Терехова В.А. Микромицеты в экологической оценке водных и наземных экосистем. М.: Наука, 2007. 215 с.
5. Иванова А.Е., Марфенина О.Е., Суханова И.И. Функциональное разнообразие микроскопических грибов в городских почвах разного возраста

- формирования // Микол. и фитопатол. 2008. Т. 42. № 5. С. 450–60.
6. *Марфенина О.Е.* Антропогенная экология почвенных грибов. М.: Изд-во МГУ, 2005. 196 с.
 7. *Власов Д.Ю.* Микроскопические грибы в экстремальных местообитаниях: биологическое разнообразие и сущность взаимодействий // Биосфера. 2011. Т. 3. № 4. С. 479–492.
 8. *Поляк Ю.М., Сухаревич В.И.* Аллелопатические взаимоотношения растений и микроорганизмов в почвенных экосистемах // Усп. совр. биол. 2019. Т. 2. С. 147–160.
 9. *Берестецкий О.А.* Фитотоксины почвенных микроорганизмов и их экологическая роль // Фитотоксические свойства почвенных микроорганизмов. Л.: ВНИИ сел.-хоз. микробиологии, 1978. С. 7–31.
 10. *Герасимов А.О., Поляк Ю.М.* Оценка влияния засоления на аллелопатическую активность микромицетов в дерново-подзолистой почве // Агрехимия. 2021. № 3. С. 51–59.
 11. *Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахова А.М.* Биологическая активность нефтезагрязненных почв. Уфа: Гилем, 2016. 376 с.
 12. *Polyak Y., Bakina L., Mayachkina N., Polyak M.* The possible role of toxigenic fungi in ecotoxicity of two contrasting oil-contaminated soils – A field study // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2020. V. 202. P. 110959.
 13. *Минеев В.Г., Козлова Ю.Е., Кураков А.В., Гомонова Н., Звягинцев Д.Г.* Последствие минеральных удобрений на микробиологические и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // Докл. РАСХН. 2001. № 4. С. 19–21.
 14. *Кураков А.В., Попов А.И.* Нитрифицирующая активность и фитотоксичность почвенных микроскопических грибов // Почвоведение. 1995. Т. 3. С. 314–321.
 15. *Ефимочкина Н.Р., Седова И.Б., Шевелева С.А., Тутельян В.А.* Токсигенные свойства микроскопических грибов // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2019. № 45. С. 6–33.
 16. *Agriropoulou S.* Ergot alkaloids mycotoxins in cereals and cereal-derived food products: Characteristics, toxicity, prevalence, and control strategies // Agronomy. 2021. V. 11. № 5. P. 931.
 17. *Leggieri M.C., Decontardi S., Bertuzzi T., Pietri A., Battilani P.* Modeling growth and toxin production of toxigenic fungi signaled in cheese under different temperature and water activity regimes // Toxins. 2017. V. 9 (1). P. 4–21.
 18. *Pickova D., Ostry V., Toman J., Malir F.* Aflatoxins: History, significant milestones, recent data on their toxicity and ways to mitigation // Toxins. 2021. V. 13 (6). P. 399.
 19. *Richard J.L.* Some major mycotoxins and their mycotoxicoses – An overview // Int. J. Food Microbiol. 2007. V. 119. P. 3–10.
 20. *Hathout A.S., Aly S.E.* Biological detoxification of mycotoxins: a review // Ann. Microbiol. 2014. V. 64. P. 905–919.
 21. *Alshannaq A., Yu J.-H.* Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food // Inter. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. E632.
 22. *Brasel T.L., Martin J.M., Carriker C.G., Wilson S.C., Straus D.C.* Detection of airborne *Stachybotrys chartarum* macrocyclic trichothecene mycotoxins in the indoor environment // Appl. Environ. Microbiol. 2005. V. 71 (11). P. 7376–7388.
 23. *Свистова И.Д., Щербаков А.П., Фролова Л.О.* Токсины микромицетов чернозема: спектр антибиотического действия и роль в формировании микробного сообщества // Почвоведение. 2004. № 10. С. 1220–1227.
 24. *Polyak Y.M., Sukcharevich V.I.* Allelopathic interactions between plants and microorganisms in soil ecosystems // Biol. Bul. Rev. 2019. V. 9 (6). P. 562–574.
 25. *Марфенина О.Е., Кулько А.Б., Иванова А.Е.* Микроскопические грибы во внешней среде города // Микол. и фитопатол. 2002. Т. 36. Вып. 4. С. 22–31.
 26. *Kensler T.W., Roebuck B.D., Wogan G.N., Groopman J.D.* Aflatoxin: a 50-year odyssey of mechanistic and translational toxicology // Toxicol. Sci. 2011. V. 120. Suppl. 1. S. 28–48.
 27. *Samson R.A., Visagie C.M., Houbraken J., Hong S.B., Hubka V., Klaassen C.H.* Phylogeny, identification and nomenclature of the genus *Aspergillus* // Stud. Mycol. 2014. V. 78. P. 141–173.
 28. *Varga J., Juhasz A., Kevei F., Kozakiewicz Z.* Molecular diversity of agriculturally important *Aspergillus* species // Europ. J. Plant Pathol. 2004. V. 110. P. 627–640.
 29. *Vanhoutte I., Audenaert K., De Gelder L.* Biodegradation of mycotoxins: Tales from known and unexplored worlds // Front. Microbiol. 2016. V. 7. P. 561.
 30. *Bornehag C.G., Sundell J., Bonini S., Custovic A., Malmberg P., Skerfving S., Sigsgaard T., Verhoeff A.* Dampness in buildings as a risk factor for health effects, EUROEXPO: a multidisciplinary review of the literature (1998–2000) on dampness and mite exposure in buildings and health effects // Indoor Air. 2004. V. 14 (4). P. 243–257.
 31. *Frisvad J.C.* A critical review of producers of small lactone mycotoxins: patulin, penicillic acid and moniliformin // World Mycotoxin J. 2018. V. 11(1). P. 73–100.
 32. *Ji F., He D., Olaniran A.O.* Occurrence, toxicity, production and detection of *Fusarium* mycotoxin: a review // Food Prod. Process and Nutr. 2019. V. 1. P. 6.
 33. *Elmholt S.* Mycotoxins in the soil environment // Secondary metabolites in soil ecology. Soil Biology / Ed. P. Karlovsky. Heidelberg: Springer, 2008. P. 167–203.
 34. *Седова И.Б., Киселева М.Г., Чалый З.А., Аксенов И.В., Захарова Л.П., Тутельян В.А.* Анализ результатов мониторинга загрязнения микотоксинами продовольственного зерна урожая 2005–2016 гг. // Усп. мед. микол. 2018. Т. 19. С. 329–330.
 35. *Perrone G., Ferrara M., Medina A., Pascale M., Magan N.* Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: Ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk // Microorganisms. 2020. V. 8 (10). 1496.

36. Venkatesh N., Keller N.P. Mycotoxins in conversation with bacteria and fungi // *Front Microbiol.* 2019. V. 10. 403.
37. Kamle M., Mahato D.K., Devi S., Lee K.E., Kang S.G., Kumar P. Fumonisin: Impact on agriculture, food, and human health and their management strategies // *Toxins.* 2019. V. 11 (6). P. 328. <https://doi.org/10.3390/toxins11060328>
38. López P., Venema D., Rijk T., Kok A., Scholten J.M., Hans G.J., Nijis M.M. Occurrence of *Alternaria* toxins in food products in the Netherlands // *Food Control.* 2016. V. 60. P. 196–204.
39. Mao Z., Sun W., Fu L., Luo H., Lai D., Zhou L. Natural dibenzo- α -pyrones and their bioactivities // *Molecules.* 2014. V. 19 (4). P. 5088–5108.
40. Кононенко Г.П., Пурязева Е.А., Буркин А.А. Продукцирование альтернариола у популяций мелкоспоровых видов *Alternaria*, ассоциированных с зерновыми кормами // *Сел.-хоз. биол.* 2020. Т. 55 (3). С. 628–637.
41. Puvaca N., Avantaggiato G., Merkuri J., Vuković G., Bursić V., Cara M. Occurrence and determination of *Alternaria* mycotoxins alternariol, alternariol monomethyl ether, and tentoxin in wheat grains by QuEChERS Method // *Toxins.* 2022. V. 14(11). 791.
42. Bren U., Guengerich F.P., Mavri J. Guanine alkylation by the potent carcinogen aflatoxin B1: quantum chemical calculations // *Chem. Res. Toxicol.* 2007. V. 20. P. 1134–1140.
43. Winter G., Pereg L.L. A review on the relation between soil and mycotoxins: Effect of aflatoxin on field, food and finance // *Europ. J. Soil Sci.* 2019. V. 70. P. 882–897.
44. Juraschek L.M., Kappenberg A., Amelung W. Mycotoxins in soil and environment // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 814. P. 152425.
45. Perrone G., Gallo A., Susca A. *Aspergillus* // *Molecular detection of foodborne pathogens* / Ed. L. Dongyou. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. P. 529–548.
46. Perrone G., Susca A. *Penicillium* species and their associated mycotoxins // *Methods Mol. Biol.* 2017. V. 1542. P. 107–119.
47. Otero C., Arredondo C., Echeverría-Vega A., Gordillo-Fuenzalida F. *Penicillium* spp. mycotoxins found in food and feed and their health effects // *World Mycotoxin J.* 2020. V. 13 (3). P. 323–343.
48. Lillehoj E.B., Elling F. Environmental conditions that facilitate ochratoxin contamination of agricultural commodities // *Acta Agric Scand.* 1983. V. 33. P. 113–128.
49. Scharf D.H., Brakhage A.A., Mukherjee P.K. Gliotoxin – bane or boon? // *Environ. Microbiol.* 2016. V. 18. P. 1096–1109.
50. Ruiz J.A., Bernar E.M., Jung K. Production of siderophores increases resistance to fusaric acid in *Pseudomonas protegens* Pf-5 // *PLoS ONE.* 2015. V. 10. e0117040.
51. Martín-Rodríguez A., Reyes F., Martín J., Pérez-Yépez J., León-Barrios M., Couttolenc A. Inhibition of bacterial quorum sensing by extracts from aquatic fungi: first report from marine endophytes // *Mar. Drugs.* 2014. V. 12. P. 5503–5526.
52. Rasmussen T.B., Skindersoe M.E., Bjarnsholt T., Phipps R.K., Christensen K.B., Jensen P.O. Identity and effects of quorum-sensing inhibitors produced by *Penicillium* species // *Microbiology.* 2005. V. 151. P. 1325–1340.
53. Bacon C.W., Hinton D.M., Mitchell T.R. Is quorum signaling by mycotoxins a new risk-mitigating strategy for bacterial biocontrol of *Fusarium verticillioides* and other endophytic fungal species? // *J. Agric. Food Chem.* 2017. V. 65. P. 7071–7080.
54. van Rij E.T., Girard G., Lugtenberg B.J.J., Bloemberg G.V. Influence of fusaric acid on phenazine-1-carboxamide synthesis and gene expression of *Pseudomonas chlororaphis* strain PCL1391 // *Microbiology.* 2005. V. 151. P. 2805–2814.
55. Rajasekharan S. K., Lee J.-H., Zhao Y., Lee J. The mycotoxin zearalenone hinders *Candida albicans* biofilm formation and hyphal morphogenesis // *Ind. J. Microbiol.* 2018. V. 58. P. 19–27.
56. Liaqat I., Bachmann R.T., Sabri A.N., Edyvean R.G.J. Isolate specific effects of patulin, penicillic acid and EDTA on biofilm formation and growth of dental unit water line biofilm isolates // *Curr. Microbiol.* 2010. V. 61. P. 148–156.
57. Falade T.D.O., Syed Mohdhamdan S.H., Sultanbawa Y., Fletcher M.T., Harvey J.J.W., Chaliha M. *In vitro* experimental environments lacking or containing soil disparately affect competition experiments of *Aspergillus flavus* and co-occurring fungi in maize grains // *Food Addit. Contam.* 2016. V. A33. P. 1241–1253.
58. Müller M.E., Steier I., Köppen R., Siegel D., Proske M., Korn U., Koch M. Cocultivation of phytopathogenic *Fusarium* and *Alternaria* strains affects fungal growth and mycotoxin production // *J. Appl. Microbiol.* 2012. V. 113. № 4. P. 874–887.
59. López-Díaz C., Rahjoo V., Sulyok M., Ghionna V., Martín-Vicente A., Capilla J. Fusaric acid contributes to virulence of *Fusarium oxysporum* on plant and mammalian hosts // *Mol. Plant Pathol.* 2018. V. 19. P. 440–453.
60. Pfliegler W.P., Pócsi I., Gyóri Z., Pusztahelyi T. The *Aspergilli* and their mycotoxins: Metabolic interactions with plants and the soil biota // *Front Microbiol.* 2020. V. 10. 2921.
61. Reverberi M., Punelli M., Scala V., Scarpari M., Uva P., Mentzen W.I. Genotypic and phenotypic versatility of *Aspergillus flavus* during maize exploitation // *PLoS One.* 2013. V. 8. e68735.
62. Свистова И.Д., Щербаков А.П., Фролова Л.О. Фитотоксическая активность черноземных сапрофитных микромицетов: специфичность, сорбция и стабильность фитотоксинов в почве // *Прикл. биохим. и микробиол.* 2003. Т. 39. № 4. С. 441–445.
63. Xu X.M., Berrie A.M. Epidemiology of mycotoxigenic fungi associated with *Fusarium* ear blight and apple blue mould: a review // *Food Addit. Contam.* 2005. V. 22. P. 290–301.
64. Anjorin A.T., Inje T. Effect of total aflatoxin on the growth characteristics and chlorophyll level of sesame (*Sesamum indicum* L.) // *New York Sci. J.* 2014. V. 7. P. 8–13.
65. Zhang C.L., Zheng B.Q., Lao J.P., Mao L.J., Chen S.Y., Kubicek C.P. Clavatul and patulin formation as the antagonistic principle of *Aspergillus clavatonanicus*, an en-

- dophytic fungus of *Taxus mairei* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2008. V. 78. P. 833–840.
66. Benoit I., van den Esker M.H., Patyshakuliyeva A., Mattern D.J., Blei F., Zhou M. *Bacillus subtilis* attachment to *Aspergillus niger* hyphae results in mutually altered metabolism // Environ. Microbiol. 2015. V. 17. P. 2099–2113.
67. Luo M., Brown R.L., Chen Z.Y., Menkir A., Yu J., Bhatnagar D. Transcriptional profiles uncover *Aspergillus flavus*-induced resistance in maize kernels // Toxins. 2011. V. 3. P. 766–786.
68. Dhakal R., Chai C., Karan R., Windham G.L., Williams W.P., Subudhi P.K. Expression profiling coupled with in-silico mapping identifies candidate genes for reducing aflatoxin accumulation in maize // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. P. 503.
69. Dolezal A.L., Shu X., O'Brian G.R., Nielsen D.M., Woloshuk C.P., Boston R.S. *Aspergillus flavus* infection induces transcriptional and physical changes in developing maize kernels // Front. Microbiol. 2014. V. 5. P. 384.
70. Bedre R., Rajasekaran K., Mangu V.R., Sanchez Timm L.E., Bhatnagar D., Baisakh N. Genome-wide transcriptome analysis of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) identifies candidate gene signatures in response to aflatoxin producing fungus *Aspergillus flavus* // PLoS One 2015. V. 10. e0138025.
71. Bellincampi D., Cervone F., Lionetti V. 2014. Plant cell wall dynamics and wall-related susceptibility in plant-pathogen interactions // Front. Plant Sci. V. 5. P. 228.
72. Wang H., Lei Y., Yan L., Wan L., Ren X., Chen S. Functional genomic analysis of *Aspergillus flavus* interacting with resistant and susceptible peanut // Toxins. 2016. V. 8. P. 46.
73. Verheecke C., Liboz T., Mathieu F. Microbial degradation of aflatoxin B1: current status and future advances // Inter. J. Food Microbiol. 2016. V. 237. P. 1–9.
74. Li P., Su R., Yin R., Lai D., Wang M., Liu Y., Zhou L. Detoxification of mycotoxins through biotransformation // Toxins. 2020. V. 12 (2). P. 121.
75. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3. С. 83–93.
76. Guan S., Zhao L., Ma Q., Zhou T., Wang N., Hu X. In vitro efficacy of *Mycrococcus fulvus* ANSM068 to biotransform aflatoxin B1 // Inter. J. Mol. Sci. 2010. V. 11. P. 4063–4079.
77. Alberts J.F., Engelbrecht Y., Steyn P.S., Holzappel W., van Zyl W. Biological degradation of aflatoxin B-1 by *Rhodococcus erythropolis* cultures // Inter. J. Food Microbiol. 2006. V. 109. P. 121–126.
78. Rodriguez H., Reveron I., Doria F., Costantini A., De Las R.B., Muñoz R. Degradation of ochratoxin A by *Brevibacterium* species // J. Agric. Food Chem. 2011. V. 59. P. 10755–10760.
79. Ola A.R.B., Thomy D., Lai D., Brötz-Oesterhelt H., Proksch P. Inducing secondary metabolite production by the endophytic fungus *Fusarium tricinctum* through coculture with *Bacillus subtilis* // J. Nat. Prod. 2013. V. 76. P. 2094–2099.
80. Spraker J.E., Wiemann P., Baccile J.A., Venkatesh N., Schumacher J., Schroeder F.C. Conserved responses in a war of small molecules between a plant-pathogenic bacterium and fungi // MBio. 2018. V. 9. e00820-18.
81. Simonetti E., Roberts I.N., Montecchia M.S., Gutierrez-Boem F.H., Gomez F.M., Ruiz J.A. A novel *Burkholderia ambifaria* strain able to degrade the mycotoxin fusaric acid and to inhibit *Fusarium* spp. Growth // Microbiol. Res. 2018. V. 206. P. 50–59.
82. Crutcher F.K., Liu J., Puckhaber L.S., Stipanovic R.D., Duke S.E., Bell A.A. Conversion of fusaric acid to fusarinol by *Aspergillus tubingensis*: a detoxification reaction // J. Chem. Ecol. 2014. V. 40. P. 84–89.
83. Fakhouri W., Walker F., Armbruster W., Buchenauer H. Detoxification of fusaric acid by a nonpathogenic *Colletotrichum* sp. // Physiol. Mol. Plant Pathol. 2003. V. 63. P. 263–269.
84. Crutcher F.K., Puckhaber L.S., Bell A.A., Liu J., Duke S.E., Stipanovic R.D. Detoxification of fusaric acid by the soil microbe *Mucor rouxii* // J. Agric. Food Chem. 2017. V. 65. P. 4989–4992.

Toxins Produced by Soil Fungi: Distribution, Ecological Role, Biodegradation

Yu. M. Polyak^{a,*} and V. I. Sukharevich^a

^aScientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences
Korpusnaya ul. 18, Saint-Petersburg 197110, Russia

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

Soil fungi play an important role in microbial-plant interactions, being producers of various biologically active compounds, including mycotoxins. Mycotoxins are found in soil, agricultural raw materials, feed and food products. Toxin-producing fungi affect many agricultural crops, and the content of mycotoxins in raw plant materials can be quite high. This review presents the main aspects related to properties of mycotoxins, their producers, their ecological role, contribution to microbial-plant interactions, interactions with other microorganisms, their biotransformation in the soil.

Key words: micromycetes, mycotoxins, plant-microbial interactions, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*.