

ISSN 0002-1881

Май 2024

Номер 5



АГРОХИМИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2024

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Трансформация органических соединений углерода и азота агрочерноземов при применении безотвальных технологий обработки в Красноярской лесостепи
Е. Н. Белоусова, А. А. Белоусов 3
- Влияние сидеральных бинарных смесей с участием подсолнечника на качество и плодородие типичных черноземов
А. М. Гребенников 13

Пестициды

- Динамика деградации остаточных количеств пропинаба и его метаболита пропилентиомочевины в плодах яблони
Т. Д. Черменская, М. О. Петрова, А. С. Комарова 21

Агроэкология

- Грибные возбудители плесени зерна озимой пшеницы в Ростовской области
Н. И. Будынков, С. Н. Михалева, Л. Н. Ульяновко, А. П. Глинушкин 27
- Влияние удобрений и мелиорантов на величину почвенной кислотности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, урожайность и химический состав зелёной массы ярового рапса (по данным лабораторно-вегетационного опыта)
А. В. Литвинович, К. М. Нельсон, А. В. Лаврищев, П. С. Манакон 37
- Эмиссия CO₂ из пахотных черноземов западного Забайкалья
Э. О. Чимитдоржиева, Ю. Б. Цыбенков, Г. Д. Чимитдоржиева 45
- Влияние применения удобрений на баланс основных элементов питания и эмиссию парниковых газов в Германии
С. В. Митрофанов, Е. В. Серова, Н. В. Орлова 54

Экотоксикология

- Влияние тяжелых металлов на микоризацию корней бобово-ризобияльной симбиосистемы гороха посевного (*Pisum sativum* L.)
Н. И. Воробьев, Я. В. Пухальский, Т. С. Азарова, С. И. Лоскутов, Ю. В. Лактионов, Ю. В. Косульников, А. И. Ковальчук, А. П. Кожемяков 64
- Плодородие и экотоксикологическое состояние светло-серых лесных почв Ивановской области
А. А. Уткин, И. Б. Нода 71

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Методика экспрессного спектрофотометрического определения железа в дитионитных вытяжках из почв
Н. Н. Данченко, Е. В. Цомаева, Д. А. Жулидова, Ш. А. Хаматнуров, З. С. Артемьева 79

ОБЗОРЫ

- Биологическая активность почвенных бактерий, стимулирующих рост растений: фиксация азота, солюбилизация фосфата, синтез сидерофоров. Перспективы разработки микробных консорциумов
А. М. Тимофеева, М. Р. Галямова, С. Е. Седых 85
- Правила для авторов 96

Contents

No. 5, 2024

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Transformation of Organic Compounds of Carbon and Nitrogen of Agrochernozems in the Conditions of Transition to Waste-Free Processing Technologies in the Krasnoyarsk Forest-Steppe
E. N. Belousova, A. A. Belousov 3
- Effect of Sideral Binary Mixtures with Sunflower on the Quality and Fertility of Typical Chernozems
A. M. Grebennikov 13
-

Pesticides

- Dynamics of Degradation of Residual amounts of Propineb and Its Metabolite Propyleneurea in Apple Fruits
T. D. Chermenskaya, M. O. Petrova, A. S. Komarova 21
-

Agroecology

- Fungal Pathogens of Mold of Winter Wheat Grains in Rostov Region
N. I. Budynkov, S. N. Mikhaleva, L. N. Ulyanenko, A. P. Glinushkin 27
- Effect of Fertilizers and Meliorants on the Value of Soil Acidity of Sod-Podzolic Light Loamy Soil, Yield and Chemical Composition of the Green Mass of Spring Rapeseed (according to Laboratory and Vegetation Experience)
A. V. Litvinovich, K. M. Nelson, A. V. Lavrishchev, P. S. Manakov 37
- CO₂-Emission from Arable Chernozems of Western Nransbaikalia
E. O. Chimitdorzhieva, Yu. B. Tsybenov, G. D. Chimitdorzhieva 45
- Impact of Fertilizer Use on the Balance of Essential Nutrients and Greenhouse Gas Emissions in Germany
S. V. Mitrofanov, E. V. Serova, N. V. Orlova 54
-

Ecotoxicology

- Effect of Heavy Metals on Mycorrhization Roots of Legume-Rhizobia Symbiosystems of *Pisum sativum* L.
N. I. Vorobyov, J. V. Puhalsky, T. S. Azarova, S. I. Loskutov, Yu. V. Laktionov, Yu. V. Kosulnikov, A. I. Kovalchuk, A. P. Kozhemyakov 64
- Fertility and Ecotoxicological Condition of Light Gray Forest Soils of the Ivanovo Region
A. A. Utkin, I. B. Noda 71
-

RESEARCH METHODS

- Method of Rapid Spectrophotometric Determination of Iron in Dithionite Extracts of Soils
N. N. Danchenko, E. V. Tsomaeva, D. A. Zhulidova, S. A. Khamaturov, Z. S. Artemyeva 79
-

REVIEWS

- Biological Activity of Soil Bacteria that Stimulate Plant Growth: Nnitrogen Fixation, Phosphate Solubilization, Synthesis of Siderophores. Prospects for the Development of Microbial Consortia
A. M. Timofeeva, M. R. Galyamov, S. E. Sedykh 85
- Rules for the authors 96
-
-

УДК 631.417.1./4:631.445.41:631.51(571.51)

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДА И АЗОТА АГРОЧЕРНОЗЕМОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БЕЗОТВАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ В КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

© 2024 г. Е. Н. Белоусова¹, А. А. Белоусов^{1,*}¹Красноярский государственный аграрный университет
660049 Красноярск, просп. Мира, 90, Россия

*E-mail: svoboda57130@mail.ru

Изучено влияние отвальной и безотвальных приемов обработки почвы на трансформацию подвижных органических соединений углерода и азота в условиях лесостепной зоны Красноярского края. Дана оценка влияния на этот процесс соотношения содержания легкоминерализуемых углерода и азота. Величина соотношения С : N в почве исследованных вариантов свидетельствовала о среднем уровне обогащенности гумуса азотом. Величины С : N для подвижных форм углерода и азота имели более широкое отношение в почве, обработанной при применении безотвальных технологий. Обнаружены сильные корреляционные связи между $C_{0.1NaOH}$ с соотношением С : N в почве. В условиях применения отвальной технологии обработки увеличение обеспеченности почвы активным органическим веществом позволило стимулировать азотминерализующую способность с накоплением аммонийных соединений азота. При использовании безотвальных обработок подобные зависимости обнаружены с содержанием нитратных соединений азота. Величины $C_{mb} : C_{орг}$ (%) свидетельствовали о слабой биогенности исследованной почвы. Дифференциации между слоями по скорости эмиссии углекислого газа не выявлено.

Ключевые слова: легкогидролизуемые соединения углерода и азота, соотношение С : N, минеральные формы азота, безотвальные технологии обработки почвы, продуцирование углекислого газа.

DOI: 10.31857/S0002188124050019, EDN: DAIPPD

ВВЕДЕНИЕ

Современное земледелие открывает широкие перспективы для замены плуга безотвальными и плоскорезными орудиями, уменьшения частоты и глубины механической обработки почвы. Происходящие при этом изменения в интенсивности и направленности процессов превращения органического углерода и азота заслуживают глубокого изучения, поскольку от них зависит специфика подходов к оптимизации азотного питания растений и управления плодородием почвы в целом [1–4].

Синтез растительной биомассы требует участия углерода и азота в количественном сопряжении $C_{орг} : N_{орг} = 6 : 1$ [5]. Согласно исследованиям [6], недостаток углерода активного органического вещества способствует низкой биологической и слабой рециклирующей активности азота в пахотных почвах. В условиях земледельческой зоны Красноярского края работ, направленных на поиск закономерностей трансформации углерода и азота с учетом влияния биологических факторов, недостаточно [7]. Такие исследования, несомненно, имеют агрономическое

значение, в том числе с перспективой дальнейшей экологизации земледелия и переводе его на органическую составляющую.

Специфика условий почвообразования Красноярской лесостепи обусловила формирование почв, существенно отличающихся от европейских аналогов. В числе их следует назвать малоблагоприятный температурный режим, вследствие чего почвы региона отнесены к типу длительно сезонно-промерзающих [8]. В связи с этим еще в работе [9] указывали на необходимость исследования элементов воздушного режима почв в комплексе с показателями биологической активности в условиях земледельческой зоны Красноярского края. Однако до сих пор эти показатели используют крайне недостаточно, а в агрономической практике они не принимаются в расчет.

Цель работы – изучить содержание и динамику углерода и азота легкоминерализуемых органических веществ пахотного слоя агрочерноземов в условиях перехода на бесплужные способы обработки почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые наблюдения осуществляли в производственном опыте ООО «ОПХ «Дары Малиновки» Сухобузимского р-на в Красноярской лесостепи, размещенном в пределах Чулымо-Енисейского денудационного плато юго-западной окраины Средней Сибири (56°10' с.ш. и 91°47' в.д.).

В границах производственных посевов были заложены реперные участки прямоугольной формы общей площадью 1200 м² с учетной площадью 600 м². В пределах каждого участка выделяли 3 повторности площадью 200 м². Почвенные пробы отбирали в сроки, приуроченные к фазам развития зерновых культур, из слоев 0–10 и 10–20 см методом змейки. Объем выборки был рассчитан, исходя из уровня варьирования плодородия почвы по результатам рекогносцировочных посевов и составил 12 пространственно удаленных проб. Наблюдения проводили в звене севооборота: чистый пар–яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.)–ячмень (*Hordeum vulgare* L.). Для исследования были выбраны следующие варианты: 1. Отвальная обработка почвы (st) – вспашка на глубину 25–27 см плугом Gregoire Besson SPLM B9: в вегетационный сезон 2017 г. почву обрабатывали в 1-й декаде июня по типу раннего пара, с последующими культивациями на глубину 5–7 см по мере отрастания сорных растений; далее, в 2018 г. – вспашка на глубину 25–27 см с предпосевной культивацией на 5–7 см АПК-7,2 + БЗТС-1; 2. Минимальная обработка почвы (поверхностное дискование) – дискатором БДМ-Агро БДМ 6×4П на глубину 10–12 см: в 2017 г. почву обрабатывали по типу стерневого пара, в 2018 г. – боронованием с предпосевной культивацией на 5–7 см АПК-7,2 + БЗТС-1; 3. Плоскорезная (культивация) обработка культиватором Ярославич КБМ-10.8 ПС-4 на глубину 10–12 см: в 2017 г. почву обрабатывали по типу стерневого пара, на следующий

год – боронованием с предпосевной культивацией на 5–7 см АПК-7,2 + БЗТС-1. В 2018 г. на опытном поле возделывали яровую пшеницу сорта Новосибирская-31, в вегетационный сезон 2019 г. – ячмень сорта Ача.

Почва опыта имеет следующую агрохимическую характеристику: рН_{H2O} 8.3, содержание С_{орг} – 6.3–6.5%, подвижного фосфора 295–320, обменного калия – 127–138 мг/кг. В годы наблюдений гидрометеорологические условия характеризовались следующими показателями (табл. 1).

Средняя годовая температура воздуха, по многолетним данным, составила 1.2°C. Агрометеорологические условия вегетационных сезонов 2017–2019 гг. характеризовались недостаточным увлажнением, периодической засушливостью. Суммы активных температур были значительно больше среднемноголетней нормы, а по количеству осадков, наоборот, существенно уступали норме. Наибольшее количество осадков выпадало в летний период. Осадки эти носили в основном ливневый характер. Это свидетельствовало о неблагоприятном гидротермическом режиме, складывавшемся в годы наблюдений. Вторая половина лета первого года исследования (2017 г.) характеризовалась большим количеством осадков относительно 2018 г. Основные запасы влаги создавались в осенне-зимний период. В условиях недостаточного увлажнения необходимо проводить агротехнические приемы, направленные на накопление и сохранение влаги. В июне 2019 г. осадков выпало на 65% больше нормы.

Химические и физико-химические показатели определены общепринятыми методами по [10]. Подвижные гумусовые вещества экстрагировали последовательной обработкой навески почвы (5 г) дистиллированной водой в соотношении 1 : 5 и 0.1 н. NaOH в соотношении 1 : 20. Содержание углерода органического вещества (С_{орг}) определяли по Тюрину [11]. Содержание щелочерастворимого

Таблица 1. Метеорологические показатели в годы наблюдений

Год	Месяц					Сумма активных температур
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
Средняя температура воздуха, °С						
2017	11.0	20.3	19.5	16.8	8.5	2074
2018	8.1	20.5	18.6	18.3	10.1	2061
2019	9.0	18.7	19.5	18.8	9.9	2047
Норма (1980–2010 гг.)	8.7	15.2	17.6	14.8	8.8	1833
Осадки, мм						
2017	28.0	30.0	79.0	81.0	81.0	299.0
2018	29.0	29.0	33.0	21.0	58.0	170.0
2019	8.3	106.1	45.4	68.9	54.0	274.4
Норма (1980–2010 гг.)	50.0	61.0	95.0	78.0	48.0	332.0

углерода ($C_{0.1NaOH}$) определяли по Тюрину в модификации Пономаревой–Плотниковой [12]. В составе органических веществ щелочной вытяжки ($C_{0.1NaOH}$) определяли гуминовые кислоты ($C_{ГК}$) осаждением их 1 н. H_2SO_4 . Содержание нитратного азота ($N-NO_3$) определяли по Грандваль–Ляжу в модификации Шаркова, аммонийного азота ($N-NH_4$) – колориметрическим методом с реактивом Несслера, гидролизуемые формы азота ($N_{гг}$) – по Корнфилду [13]. Базальное дыхание почвы определяли по скорости выделения CO_2 ($\mu\text{кг C-CO}_2/\text{г /ч}$) почвой за 8–10 ч ее инкубации при 22°C и 60% ПВ. Содержание углерода микробной биомассы устанавливали путем пересчета скорости субстрат-индуцированного дыхания (СИД) по формуле: $C_{мб}$ ($\mu\text{кг C/г почвы}$) = ($\mu\text{кл CO}_2/\text{г почвы/ч}$) · 40.04 + 0.37 [14]. Скорость продуцирования углекислого газа определяли по методу Штатнова [15]. Статистический анализ данных проводили с использованием пакета программ MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В сибирском земледелии в условиях короткого теплого периода на процессы мобилизации почвенного органического вещества и растительных остатков оказывают комплексное влияние как погодные условия (температурный режим и увлажнение), так и агротехнические приемы (предшественник, способ обработки почвы, удобрения). От них в целом зависит активность биоты почвы и накопление мобильных азотсодержащих соединений [16, 17].

Экспериментальные данные свидетельствовали о повышенном содержании общего азота в пахотном слое агрочернозема (табл. 2).

Причиной высокой аккумуляции азота в черноземах Красноярской лесостепи является сложный комплекс сложившихся естественно-исторических условий. По наблюдениям [18], неравнозначные интенсивность и соотношение процессов гумификации и минерализации органического вещества детерминируют различное накопление азотсодержащих компонентов в почвах региона.

По количеству общего азота, в отличие от углерода, исследованные слои почвы достоверно отличались с увеличением его доли в подсеменном слое, соотношение C: N в почве анализированных вариантов свидетельствовали о среднем уровне обогащенности гумуса азотом. Основные закономерности превращений легкоминерализуемых соединений углерода и азота и их соотношений представлены в табл. 3.

Сезонные изменения содержания щелочногидролизуемых соединений углерода в слое 0–10 см почвы под посевами яровой пшеницы указывали на их существенное преобладание в почве на фоне применения безотвальных технологий. Изменения концентрации $C_{0.1NaOH}$ в почве агроценоза ячменя свидетельствовали о снижении доли подвижных органических соединений. Использование культиваторов-плоскорезов сопровождалось разнонаправленностью превращения органических соединений азота и приводило в период уборки зерновых культур к компенсации их потерь и заметной аккумуляции в слое 10–20 см почвы. В течение вегетационного сезона 2018 г. максимальное содержание фракции легкогидролизуемых соединений азота обнаружено в надсеменной части почвы, обработанной отвальными и дисковыми орудиями. При плоскорезной обработке максимум накопления легкогидролизуемой фракции азота наблюдали в сентябре в слое 0–10 см, и их содержание достоверно уменьшалось в подсеменном слое 10–20 см почвы.

Иной характер трансформации легкогидролизуемых соединений азота наблюдали в агрочерноземе под посевами ячменя. Послеуборочное пополнение мортмассы пожнивно-корневыми остатками зерновой культуры, отмершими корнями, сопровождалось значительными изменениями концентрации соединений, переходящих в 1.0 н. NaOH. Максимум их образования приходился на толщу 10–20 см в период уборки ячменя при обработке почвы отвальным плугом и плоскорезными орудиями.

Известно, что трансформация органической субстанции почвы происходит в зависимости

Таблица 2. Статистические параметры соотношения C : N в агрочерноземе

Вариант	Слой, см	Содержание C, %		Содержание N, %		C : N
		$x \pm s_x$	V, %	$x \pm s_x$	V, %	
1. Отвальная вспашка (st)	0–10	6.7 ± 0.5	10	0.6 ± 0.0	9	10.6
	10–20	6.6 ± 0.5	10	0.7 ± 0.0	1	9.7
2. Минимальная обработка (дискование)	0–10	6.3 ± 0.6	14	0.6 ± 0.0	3	10.0
	10–20	6.4 ± 0.6	14	0.7 ± 0.0	14	9.5
3. Плоскорезная обработка (культивация)	0–10	6.8 ± 0.4	9	0.6 ± 0.0	8	10.3
	10–20	6.8 ± 0.5	9	0.7 ± 0.0	10	9.9

Таблица 3. Сезонная динамика содержания подвижных форм углерода и азота в слоях агрочернозема

Срок	C _{0.1NaOH} , мг/100 г		N _{лг} , мг/кг		C : N	
	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см
Отвальная обработка						
Июль 2017 г.	696	733	394	359	17	20
Сентябрь 2017 г.	706	670	222	336	32	19
Июнь 2018 г.	540	551	359	364	15	15
Июль 2018 г.	865	791	439	398	19	19
Сентябрь 2018 г.	531	385	343	366	15	10
Июнь 2019 г.	582	569	339	363	17	15
Июль 2019 г.	606	645	386	392	15	16
Сентябрь 2019 г.	650	527	403	535	16	9
<i>HCP</i> ₀₅	68	76	87	53	5	3
Плоскорезная обработка						
Июль 2017 г.	751	781	322	291	23	26
Сентябрь 2017 г.	645	569	321	443	20	12
Июнь 2018 г.	855	869	436	371	19	23
Июль 2018 г.	874	875	401	395	21	22
Сентябрь 2018 г.	549	465	476	320	11	14
Июнь 2019 г.	628	581	467	359	13	16
Июль 2019 г.	736	560	420	397	17	14
Сентябрь 2019 г.	587	587	443	537	13	11
<i>HCP</i> ₀₅	75	71	84	70	4	5
Минимальная обработка						
Июль 2017 г.	760	623	298	360	26	17
Сентябрь 2017 г.	753	639	289	433	26	15
Июнь 2018 г.	767	765	383	378	20	20
Июль 2018 г.	822	838	397	397	21	21
Сентябрь 2018 г.	861	841	347	435	25	19
Июнь 2019 г.	599	527	326	302	18	17
Июль 2019 г.	684	523	413	418	16	12
Сентябрь 2019 г.	615	608	460	390	13	16
<i>HCP</i> ₀₅	67	79	58	56	4	2

от величины соотношения углерода к азоту. По мнению авторов работы [19], параметры соотношения C : N для подвижных форм углерода и азота могут быть более точным индикатором способности субстрата к минерализации. Рассчитанные соотношения C : N указывали на тенденцию к его расширению при обработке агрочерноземов без оборота пласта, что свидетельствовало о значительном азотминерализующем потенциале бесплужных обработок.

Результаты корреляционного анализа показали, что превращения подвижного органического вещества имели слабую зависимость от динамики содержания легкогидролизуемого азота (табл. 4).

Вероятно, для трансформации их концентрация является менее чувствительным показателем, чем само соотношение между лабильными фракциями углерода и азота в почве. По-видимому, именно пропорции этих элементов влияют на процессы разложения и гумификационно-минерализационные превращения, продукты которых образуют текущий запас доступных для автотрофов элементов питания.

Отсюда очевидны выявленные более сильные корреляционные связи содержания C_{0.1 NaOH} с показателями соотношения углерода и азота в почве. Эти зависимости указали, что с расширением соотношения происходило увеличение содержания подвижных органических соединений. Причем

Таблица 4. Зависимости между содержанием подвижных органических соединений легкогидролизуемого азота, соотношением С : N и скоростью продуцирования углекислого газа

Способ обработки	Слой, см	N _{дп} , мг/кг	С : N	С-CO ₂ , мкг/г /ч
Отвальная	0–10	0.26	0.42	0.23
	10–20	–0.17	0.88	0.29
Минимальная	0–10	–0.27	0.73	–0.43
	10–20	0.41	0.83	–0.18
Плоскорезная	0–10	–0.29	0.76	–0.18
	10–20	–0.18	0.85	0.06

выявленные закономерности проявлялись на минимальных фонах в обоих исследованных слоях почвы. Обнаруженное свидетельствовало о диагностической информативности показателя С: N в формировании метаболически активного фонда азота и возможности его использования в прогностических целях. По мнению авторов [20], динамика минерализации–иммобилизации азота в почве зависит не столько от общего содержания углерода и азота в разлагаемом материале, сколько от его способности к минерализации органических субстратов, а также от условий, контролирующих реминерализацию иммобилизованного ранее азота.

Значимым элементом эффективного плодородия почвы является обеспеченность сельскохозяйственных культур минеральными формами азота. Поэтому также были определены зависимости между превращениями подвижного органического вещества (зависимая переменная) и динамикой содержания минеральных соединений азота (рис. 1, 2).

Из полученных уравнений (рис. 1 и 2) следует, что с одной стороны, в условиях применения отвальной технологии обработки увеличение обеспеченности почвы активным органическим веществом позволяло стимулировать азотминерализующую способность почвы и накопление аммонийных соединений азота. С другой стороны, при использовании безотвальных обработок подобные зависимости обнаруживались с содержанием нитратных соединений азота. Интересно отметить, что при поверхностном дисковании корреляционные связи были наиболее сильные относительно плоскорезной обработки.

Анализ данных выявил тенденцию к накоплению аммонийных соединений на фоне безотвальных технологий обработки агрочернозема. Низкие его концентрации в почве исследованных вариантов опыта могли быть обусловлены легкоглинистым гранулометрическим составом, определяющим повышенную необменную фиксацию ионов аммония минеральными и органическими коллоидами. Возможно, в связи с избыточной пористостью образующиеся аммонийные соединения азота быстро вовлекались в процесс биохимического окисления. Выявлено, что в период вегетации

зерновых культур в подсеменном слое (10–20 см) сосредоточивались статистически более значимые количества аммонийных соединений азота в сравнении с надсеменным слоем.

В последние годы минимизацию обработки почвы часто рассматривают в качестве одного из путей увеличения консервации (секвестрации) органического вещества в почве и, как следствие, уменьшения выбросов в атмосферу парниковых газов, прежде всего углекислого газа [21]. Для условий земледельческой зоны Красноярского края проблема углекислотного режима почв также актуальна. В зависимости от технологии обработки в качественные и количественные трансформации вовлекаются прежде всего поверхностные слои почвы. По данным [22], территория юга Красноярского края за 150 лет ее использования преобразована деятельностью человека на 22%. Поступление растительных остатков в почву снизилось на 22% по всей территории и на 60% – в лесостепной зоне, что привело к потерям почвенного органического вещества из пахотных почв. Поэтому нами был исследован процесс продуцирования углекислого газа в слоях 0–10 и 10–20 см агрочернозема в условиях перехода с отвальной на бесплужные способы обработки.

Результаты наблюдений показали, что в условиях парования, в середине сезона 2017 г., когда были применены изученные способы обработки, интенсивность продуцирования CO₂ соответствовала среднему уровню при использовании отвального плуга и слабому – при поверхностных безотвальных рыхлениях. В дальнейшем, вне зависимости от способа обработки и слоя почвы, уровень активности характеризовался как слабый. Интересно отметить, что сравненные слои агрочерноземов существенно не отличались по продуцированию CO₂ в период парования 2017 г. Это, с одной стороны, свидетельствовало о значительных изменениях в трансформации условий, влияющих на эмиссию углекислого газа в этот период. С другой стороны, более высокий уровень продуцирования CO₂ в варианте, где применяли отвальную обработку почвы в середине лета 2017 г., согласовался с многочисленными материалами исследователей

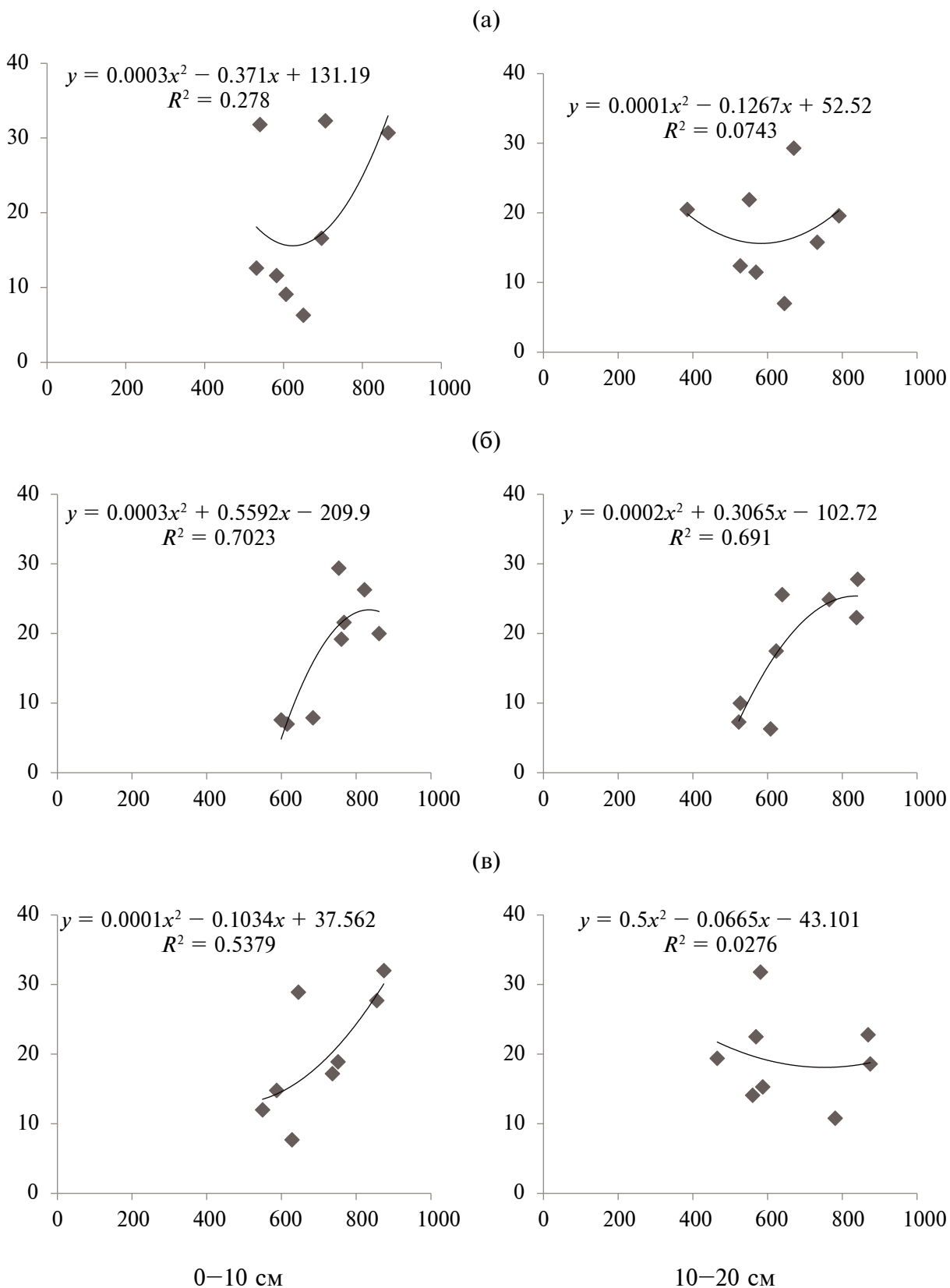


Рис. 1. Зависимость между превращениями подвижного органического вещества (мг/100 г) и динамикой содержания нитратного азота (мг/кг): (а) – отвальная, (б) – минимальная, (в) – плоскорезная обработка. То же на рис. 2.

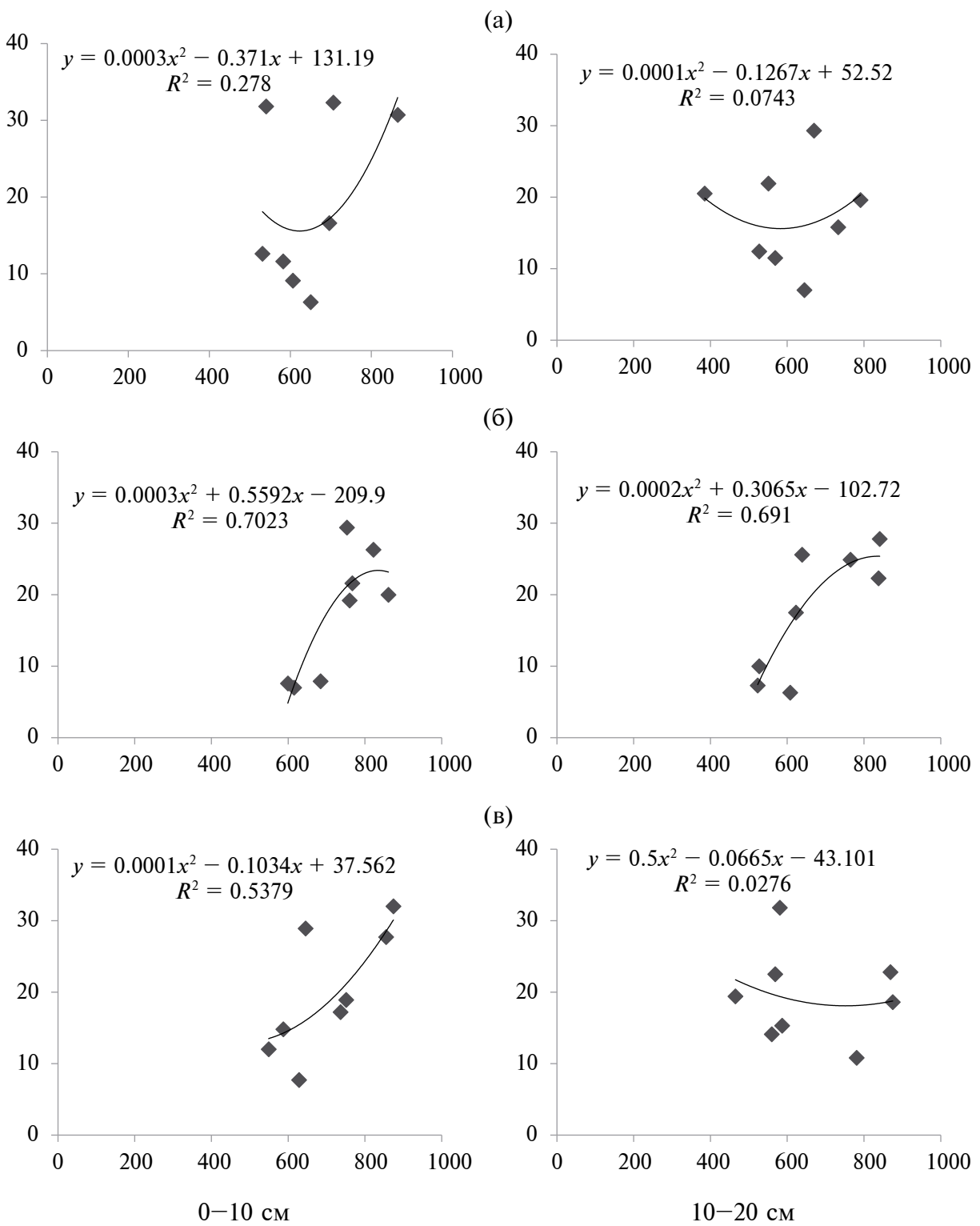


Рис. 2. Зависимость между превращениями подвижного органического вещества (мг/100 г) и динамикой содержания аммонийных соединений азота (мг/кг).

Таблица 5. Интенсивность продуцирования углекислого газа в слоях агрочернозема, мг CO₂/10 г/сут, $t_{0,5} = 2.2$ (в июле, сентябре 2019 г. – $t_{0,5} = 2.7$)

Вариант	Слой, см	2017 г.					
		t_{Φ}	июнь	t_{Φ}	июль	t_{Φ}	сентябрь
1. Отвальная вспашка (st)	0–10	н/о*	н/о	–1.6	14.4	0.9	9.7
	10–20	н/о*	н/о		15.9		9
2. Минимальная обработка (дискование)	0–10	н/о	н/о	1.6	6.7	1.5	7.5
	10–20		н/о		5		6,5
3. Плоскорезная обработка (культивация)	0–10	н/о	н/о	–0.7	6.8	0.2	8
	10–20		н/о		8		7.9
Вариант	Слой, см	2018 г.					
		t_{Φ}	июнь	t_{Φ}	июль	t_{Φ}	сентябрь
1. Отвальная вспашка (st)	0–10	–2.8**	6,5	–0.8	6.2	0.06	6.9
	10–20		12.8**		7.2		7
2. Минимальная обработка (дискование)	0–10	–1.3	6.6	0.5	5.8	–3.2**	3.7**
	10–20		8		5.2		6.5**
3. Плоскорезная обработка (культивация)	0–10	–1.8	3.2	–0.3	7.5	1.1	8.7
	10–20		6		7.8		9.4
Вариант	Слой, см	2019 г.					
		t_{Φ}	июнь	t_{Φ}	июль	t_{Φ}	сентябрь
1. Отвальная вспашка (st)	0–10	0.5	6.2	–1,0	5.7	0.7	7.0
	10–20		5.9		6.8		6.2
2. Минимальная обработка (дискование)	0–10	–1.0	7.0	0.1	5.7	0.4	7.3
	10–20		7.0		5.5		7.0
3. Плоскорезная обработка (культивация)	0–10	–2.9**	3.1	0.4	4.4	–2.4	5.5
	10–20		5.0		3.9		6.6

* Не определяли.

** Достоверные различия.

по данной теме [21, 23]. Они аргументируют повышенную активность почвы при отвальной обработке усилением минерализационных процессов, вызываемых аэрацией внутрипорового пространства. В связи с отсутствием растительности в этот период, вероятно, названная причина была определяющей (табл. 5).

Второй год наблюдений, когда вегетировала яровая пшеница, существенных изменений в скорости продуцирования CO₂ не выявил. Вероятно, это было связано с освоением бесплужных обработок, когда агрофизические свойства агрочерноземов значимо не изменялись [24]. Продуцирование диоксида углерода в июне, в условиях отвальной вспашки и в сентябре в почве, обработанной дисковатором, отличалось статистически значимыми различиями в слоях почвы. При этом уровень активности слоя 10–20 см характеризовался достоверным максимумом.

В период вегетации ячменя, следовавшего за яровой пшеницей, уровень продуцирования CO₂ соответствовал предшествующим сезонам и был слабым. Не найдено существенного воздействия безотвальных рыхлений на величину эмиссии, за исключением июньского срока, когда использование плоскорезов-культиваторов способствовало существенно большей продукции CO₂ в слое 10–20 см. Объяснением отсутствия разноразличий качества корнеобитаемой толщи по продуцированию углекислого газа являлась, вероятно, длительность ведения бесплужного земледелия и интенсивность микробиологических процессов.

Одним из важнейших пулов органического вещества почвы является биомасса почвенных микроорганизмов, которая одновременно отражает как количество легкоминерализуемого органического вещества, так и количество агента, ведущего почвенные трансформационные процессы [25]. Полученные результаты в целом свидетельствовали

о значимом участии живого органического углерода почвы в его трансформации до углекислого газа.

При использовании поверхностного дискования источниками диоксида углерода, вероятно, были факторы, не связанные напрямую с функционированием микробной биомассы. Доля C_{mb} в $C_{орг}$ в почве всех вариантов опыта была незначительной, что свидетельствовало о слабой ее биогенности и необходимости повышения биологического разнообразия.

ВЫВОДЫ

На фоне безотвальных технологий выявлено существенное преобладание щелочногидролизуемых соединений углерода в почве под посевами яровой пшеницы. Количество $C_{0.1 NaOH}$ в почве под агроценозом ячменя свидетельствовало о снижении уровня гидролиза органических соединений.

Выявлена тенденция к увеличению содержания легкогидролизуемых соединений азота при использовании безотвальных технологий обработки.

Величина соотношения C : N для подвижных форм углерода и азота указывала на преимущественно более широкое соотношение этих соединений в почве, обработанной безотвальными способами.

Биологическая активность почвы в исследованных вариантах обработки соответствовала слабому уровню и определялась видом предшествующей культуры. Существенной дифференциации между слоями по скорости эмиссии не выявлено. При использовании минимальных технологий обнаружена тенденция к увеличению продуцирования C-CO₂ в слое 10–20 см.

Превращения подвижного органического вещества имели слабую зависимость от динамики содержания легкогидролизуемого азота. Выявлены более сильные корреляционные связи $C_{0.1 NaOH}$ с величиной соотношения C : N в почве.

В условиях применения отвальной обработки почвы увеличение обеспеченности активным органическим веществом стимулировало накопление аммонийных соединений азота, при использовании безотвальных обработок – нитратных соединений азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарков И.Н., Данилова А.А., Халимон В.Н. Запас негумифицированных растительных остатков и биологическая активность выщелоченного чернозема при минимизации основной обработки // Почвоведение. 1991. № 12. С. 130–134.
2. Башкин В.Н. Повышение эффективности использования азота: проблемы и пути решения. Сообщение 1. Агрогеохимические подходы // Агрохимия. 2022. № 7. С. 82–96.
3. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Азот в агроecosистеме на черноземных почвах. М.: РАН, 2018. 180 с.
4. Кудяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современной земледелии // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15.
5. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
6. Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3–12.
7. Белоусова Е.Н., Белоусов А.А. Влияние почвозащитных технологий на содержание подвижного органического вещества и ферментативную активность почвы // Агрохимия. 2022. № 5. С. 30–37.
8. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
9. Попова Э.П., Лубите Я.И. Биологическая активность и азотный режим почв Красноярской лесостепи. Красноярск, 1975. 271 с.
10. Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
11. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
12. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах. Л., 1975. 105 с.
13. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 655 с.
14. Ананьева Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв // Агрохимия. 2003. № 7. С. 92–93.
15. Штатнов В.И. К методике определения биологической активности почвы // Докл. ВАСХНИЛ. 1952. С. 27–33.
16. Белоусов А.А., Белоусова Е.Н. Динамика содержания органического вещества черноземов в условиях минимизации обработки в Красноярской лесостепи // Агрохимия. 2020. № 3. С. 24–30.
17. Гамзиков Г.П. Азотминерализующая способность серой лесной почвы Новосибирского Приобья при компостировании и паровании растительных остатков // Почвоведение. 2021. № 5. С. 582–591.
18. Чупрова В.В., Белоусов А.А., Едимечев Ю.Ф. Влияние агрогенных воздействий на трансформацию легкоминерализуемого органического вещества в черноземах Красноярской лесостепи // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2005. № 1(155). С. 3–8.

19. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 78–96.
20. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
21. Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.В. Изменения органического вещества чернозема выщелоченного при минимизации обработки в лесостепи Западной Сибири // *Почвоведение*. 2016. № 7. С. 892–899.
22. Титлянова А.А., Чупрова В.В. Изменение круговорота углерода в связи с различным использованием земель (на примере Красноярского края) // *Почвоведение*. 2003. № 2. С. 211–219.
23. Кудеяров В.Н. Влияние удобрений и системы земледелия на секвестрацию углерода в почвах // *Агрохимия*. 2022. № 12. С. 79–96.
24. Белоусова Е.Н., Белоусов А.А., Оценка агрофизических свойств чернозема в условиях перехода на почвозащитные технологии обработки // *Агрофизика*. 2021. № 3. С. 1–9.
25. Орлова О.В. Активное органическое вещество как регулятор процессов трансформации азота и углерода в дерново-подзолистых почвах: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2013. 46 с.

Transformation of Organic Compounds of Carbon and Nitrogen of Agrochernozeams in the Conditions of Transition to Waste-Free Processing Technologies in the Krasnoyarsk Forest-Steppe

E. N. Belousova^a, A. A. Belousov^{a, #}

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

[#]*E-mail: svoboda57130@mail.ru*

The influence of dump and non-dump tillage techniques on the transformation of mobile organic compounds of carbon and nitrogen in the conditions of the forest-steppe zone of the Krasnoyarsk Territory has been studied. The influence of the ratio of the content of easily mineralized carbon and nitrogen on this process is estimated. The value of the C : N ratio in the soil of the studied variants indicated an average level of nitrogen enrichment of humus. The C : N values for mobile forms of carbon and nitrogen had a broader relationship in the soil treated with the use of waste-free technologies. Strong correlations were found between $C_{0.1 NaOH}$ and the C : N ratio in the soil. Under the conditions of application of dump processing technology, an increase in the provision of soil with active organic matter made it possible to stimulate the nitrogen mineralizing ability with the accumulation of ammonium nitrogen compounds. When using non-waste treatments, similar dependencies were found with the content of nitrate nitrogen compounds. The values of C_{mb} in C_{org} (%) indicated a weak biogenicity of the studied soil. There was no differentiation between the layers in terms of the rate of carbon dioxide emission.

Keywords: easily hydrolyzable carbon and nitrogen compounds, C : N ratio, mineral forms of nitrogen, waste-free tillage technologies, carbon dioxide production.

УДК 631.584.5:633.854.78:631.452:631.445.41

ВЛИЯНИЕ СИДЕРАЛЬНЫХ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ С УЧАСТИЕМ ПОДСОЛНЕЧНИКА НА КАЧЕСТВО И ПЛОДОРОДИЕ ТИПИЧНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ

© 2024 г. А. М. Гребенников*

*Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”
119017 Москва, Пыжневский пер., 7, стр. 2, Россия***E-mail: gream1956@gmail.com*

В полевом опыте изучили влияние бинарных сидеральных смесей с участием подсолнечника на содержание гумуса, подвижного фосфора и обменного калия в пахотном и подпахотном горизонтах чернозема типичного тяжелосуглинистого. Показано, что использование для сидерации смешанных агросообществ может быть одним из источников воспроизводства потенциального и эффективного плодородия черноземов в ЦЧЗ. Установлено, что влияние агроценотического эффекта в бинарных смесях подсолнечника с соей, пайзой, гречихой сорта Крылатая и гречихой сорта Деметра приводило к значимому увеличению содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия в пахотном и подпахотном горизонтах черноземов под этими агросообществами. Показано, что влияние агроценотического эффекта на увеличение содержания гумуса было эквивалентным внесению в пахотный горизонт подстилочного навоза 15.4–25.3 т/га, в подпахотный – 13.6–23.0 т/га. Это приводило к существенному улучшению качества исследованных почв. Увеличение содержания подвижного фосфора под влиянием фактора смешивания могло быть достигнуто при внесении в слои 0–25 и 25–40 см почвы соответственно 88–200 и 88–138 кг P_2O_5 /га. Увеличению содержания обменного калия под сидеральными смесями в слое 0–25 см почвы на 1.0–2.4 и в слое 40–50 см – на 1.7–2.0 мг/100 г почвы соответствовали бы дозы внесения 300–720 и 510–600 кг K_2O /га.

Ключевые слова: бинарные сидеральные смеси, продуктивность сидератов, урожайность зерновых культур, агроценотический эффект, агрохимические свойства, качество почв, чернозем типичный тяжелосуглинистый.

DOI: 10.31857/S0002188124050027, **EDN:** CZYZFL

ВВЕДЕНИЕ

Применение сидеральных удобрений может привести к существенному улучшению комплекса свойств почв, определяющих их плодородие и фитосанитарное состояние [1]. Удобрительная ценность сидератов определяется величиной их биомассы и содержанием в ней элементов питания растений [2]. Этим требованиям удовлетворяет использование в качестве сидеральной культуры подсолнечника, который может сформировать высокопродуктивную биомассу, содержащую в сбалансированных количествах большое количество элементов питания растений, что является фактором существенного повышения урожайности последующих культур [3]. Однако усилить эффект от сидерации можно, если в этих целях использовать не чистые посевы подсолнечника, а его экологически и аллелопатически совместимые смеси с другими культурами. Такие смеси могут значительно превосходить чистые посевы их компонентов по продуктивности

и концентрировать в тканях больше элементов минерального питания растений в сбалансированных количествах [4, 5].

При использовании для сидерации смешанных агросообществ в сравнении с чистыми посевами их компонентов часто отмечали более значительное улучшение всего комплекса свойств почв, определяющих плодородие, а также фитосанитарного состояния культур, выращиваемых после заделки сидератов [6–8].

Встречаются сведения, что смешанные посевы по сравнению с чистыми обладают значительно более высоким потенциалом средообразования [9], что в основном связано со способностью смешанных агросообществ поддерживать экологическое равновесие между компонентами агроэкосистемы благодаря наличию регуляторных механизмов обратной связи. Такие возможности агросообществ обусловлены их приближением по биоразнообразию (по сравнению с чистыми посевами)

к естественным фитоценозам, что выражается в способности смешанных посевов эффективным образом влиять на среду произрастания, частично используя при этом механизмы воздействия на окружающую среду естественного растительного покрова, средообразующую роль которого широко использовал человек в многовековой практике залежных и переложных систем земледелия [9].

Использование сидеральных агроценозов может значительно улучшить состояние почв, подверженных деградации и агроистощению, в результате длительного и нерационального использования в земледелии [10, 11]. Выращивание таких агроценозов часто приводило к улучшению агрохимических свойств почв даже в тех случаях, когда надземную массу смешанных посевов не использовали как зеленое удобрение, а отчуждали с полей [12]. Естественно, что еще и использование урожая таких агроценозов на сидерацию являлось мощным фактором увеличения плодородия почв. При этом прежде всего увеличивалось содержание гумуса в почве [13], являющееся одним из важных показателей качества почв [14].

Цель работы – оценка влияния подсолнечниковых сидератов, выращиваемых в чистых посевах и в агроценозах с другими культурами на агрохимические свойства почв.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевом опыте с сидератами, состоящими из чистых посевов гречихи сорта Деметра, гречихи сорта Крылатая, сои сорта Октябрьская, подсолнечника сорта Енисей и из бинарных смесей подсолнечника с остальными культурами, проводили учет продуктивности сидеральных агроценозов и урожайности последующих зерновых культур. Опыты проводили в трехкратной повторности на стационаре Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева (Курская обл.) в период с 2001 по 2005 гг. Почвы опытного участка были представлены тяжелосуглинистыми мощными типичными черноземами.

На учетной площади каждой делянки, составлявшей 280 м² (5,6 · 50), сплошным методом определяли величину продуктивности сидеральных культур, а также урожайность озимой и яровой пшеницы, которые по годам исследования чередовались с посевами сидератов.

В пахотном (0–25 см) и подпахотном (25–40 см) горизонтах почв посезонно (весна, лето, осень) отбирали образцы, в которых определяли агрохимические показатели (содержание гумуса по Тюрину, подвижного фосфора по Чирикову и обменного калия по Масловой) [15].

Для оценки влияния фактора смешивания посевов на изменение исследованных показателей применяли специально разработанный для этой цели метод построения вариантов сравнения [16], в соответствии с которым по величинам исследованных показателей агроценозов в чистых посевах рассчитывали варианты сравнения, которые отличались от показателей агроценозов лишь тем, что влияние фактора смешивания посевов было в них исключено. Для исследованных показателей вариант сравнения рассчитывали по следующей формуле: $V_{Si} = P_i \times W_i / \text{Sum}(W_i)$, где V_{Si} – вариант сравнения для i -той культуры, P_i – величина исследованного показателя в чистых посевах i -той культуры, W_i – доля i -той культуры в смешанном посеве, определенная как количество семян этой культуры, отнесенных к норме высева, соответствующей нормальной по плотности посевам ($W_i = Q_i/N_i$), Sum – указатель суммы. Если исследуемый показатель имел начальную и конечную величину, как у всех показателей агрохимических свойств, определяемых при закладке и окончании опыта, то P_i было равно разности между конечной и начальной величиной этого показателя. Влияние фактора смешивания на продуктивность агроценоза и свойства почв – определяли как разность между величинами этих показателей в смешанном агроценозе и в варианте сравнения.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

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

Наиболее высокие показатели продуктивности сидератов были получены в смешанных агроценозах, особенно в смесях подсолнечника с каждым из сортов гречихи, а также с соей и пайзой. Из чистых посевов сидератов максимальной продуктивностью отличался вариант с подсолнечником, но величина продуктивности в этом варианте была меньше соответствующего показателя любого из рассматриваемых агроценозов.

Таблица 1. Продуктивность сидератов, урожайность последующих зерновых культур и показатели агрохимических свойств почвы в пахотном и подпахотном горизонтах

Вариант	Продуктивность, г сухого вещества/м ² *	Урожайность зерновых, ц/га**	Содержание					
			гумуса, %		подвижного фосфора		обменного калия	
					мг/100 г почвы			
			Апах	Аподпах	Апах	Аподпах	Апах	Аподпах
Соя	410	32.7	0.30 ^a	0.09	1.3	0.5	-2.2	-2.2
Подсолнечник	720	32.3	0.47 ^a	0.13	0.6	0.4	-1.6	-0.5
Пайза	480	31.9	0.33 ^a	0.07	1.4	0.6	-1.0	0.8
Гречиха сорта Крылатая	520	32.8	0.26 ^a	0.15 ^a	0.8	0.2	-1.2	0.1
Гречиха сорта Деметра	570	32.0	0.33 ^a	0.22 ^a	0.8	0	0.5	1.1
Соя + подсолнечник	855	32.9	0.62 ^a	0.39 ^a	2.2	1.5	-0.4	0.7
Подсолнечник + пайза	985	33.3	0.73 ^a	0.37 ^a	2.4 ^a	1.6	0.9	2.1 ^a
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	890	33.8	0.64 ^a	0.32 ^a	2.0 ^a	1.5	-0.2	2.1 ^a
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	905	34.3	0.63 ^a	0.35 ^a	2.4 ^a	1.8	0.8	2.0 ^a

* $HCP_{05} = 79$ г сухого вещества/м².** $HCP_{05} = 1.1$ ц/га.Примечание. Верхний индекс а – значимые различия при $p = 0.95$.

В вариантах опыта со смешанными агрооб- ществами, как наиболее продуктивными, была получена самая высокая урожайность зерновых культур. Максимальная урожайность, полученная после запашки сидератов на делянках с чистыми посевами, была достигнута в варианте с гречихой сорта Крылатая. Однако отличия величины этой урожайности от соответствующей в вариантах с чистыми, так и от смешанных посевов сидератов, были несущественными.

За пятилетний период проведения опытов в пахотном горизонте чернозема под всеми вариантами опыта произошло статистически значимое увеличение содержания гумуса. В вариантах с чистыми посевами количество гумуса возросло на 0.26–0.47%, смешанных агроценозов – на 0.62–0.73%.

В подпахотном горизонте за время проведения опыта содержание гумуса возросло также во всех вариантах. Однако статистическая значимость этого факта была подтверждена только в 6-ти вариантах из 9-ти. При этом общий эффект увеличения содержания гумуса в подпахотном горизонте был достоверным во всех вариантах со смешанными агроценозами и в 2-х вариантах с чистыми посевами (гречиха сорта Крылатая, гречиха сорта Деметра). Содержание гумуса в вариантах с гречихой сорта Крылатая и гречихой сорта Деметра соответственно возросло на 0.15 и 0.22%. Наиболее

высокими и достаточно близкими показателями увеличения содержания гумуса характеризовались варианты со всеми агрооб- ществами, количество гумуса в почвах этих вариантов увеличилось на 0.32–0.39%.

Таким образом, влияние фактора смешивания приводило к существенному увеличению содержания гумуса в пахотном и подпахотном горизонтах, что являлось фактором улучшения качества исследованных почв.

За период исследования в пахотном горизонте почв во всех вариантах опыта было отмечено возрастание количества подвижного фосфора. При этом статистически достоверное возрастание количества этого элемента отмечено только в вариантах со смешанными агрооб- ществами (на 2.0–2.4 мг/100 г почвы), тогда как в почве во всех вариантах чистых посевов сидератов увеличение содержания подвижного фосфора не было значимым.

В подпахотном горизонте во всех вариантах существенных изменений содержания подвижного фосфора за период проведения исследования отмечено не было. При этом наблюдали недостоверную тенденцию к увеличению содержания этого элемента в слое 25–40 см во всех вариантах за исключением чистых посевов гречихи сорта Деметра, содержание подвижного фосфора под которыми не претерпело никаких изменений. В подпахотном

горизонте под остальными чистыми посевами содержание подвижного фосфора возрастало на 0.2–0.6 мг/100 г почвы, под агроценозными – на 1.5–1.8 мг/100 г почвы.

Содержание обменного калия в пахотном горизонте во всех без исключения вариантах за рассмотренный период изменялось незначительно. Существенное увеличение количества этого элемента в слое 0–25 см отмечено под чистыми посевами гречихи сорта Деметра и под агроценозами подсолнечник + пайза и подсолнечник + гречиха сорта Деметра, а под остальными агроценозами уровень содержания обменного калия незначительно уменьшался.

Содержание обменного калия в подпахотном горизонте за период исследования значительно увеличилось в вариантах подсолнечник + пайза, подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра соответственно на 2.1, 2.1 и 2.0 мг/100 г почвы. В вариантах с чистыми посевами содержание обменного калия изменялось незначительно и разнонаправленно. Например, в слое почвы 25–40 см в вариантах с чистыми посевами сои и подсолнечника

содержание обменного калия соответственно снизилось на 2.2 и 0.5 мг/100 г почвы, в остальных вариантах с чистыми посевами количество обменного калия увеличивалось на 0.1–1.1 мг/100 г почвы. Несущественно изменялось количество обменного калия в подпахотном горизонте лишь под одним из 4-х агроценозов: под агроценозом подсолнечник + соя оно возрастало на 0.7 мг/100 г почвы.

Агроценозные эффекты для продуктивности сидеральных агроценозов и урожайности зерновых культур были рассчитаны по разности между величинами этих показателей в вариантах с агроценозами и в вариантах сравнения (табл. 2). Исходной информацией для расчета агроценозных эффектов были данные табл. 1. Под влиянием агроценозного эффекта продуктивность сидеральных агроценозов изменялась неодинаковым образом. Она значительно возрастала в агроценозах гречиха сорта Деметра + подсолнечник, гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и соя + гречиха сорта Деметра, менее увеличивалась в смеси соя + гречиха сорта Крылатая, незначительно уменьшалась в сортосмеси гречихи. Примерно такие же тенденции прослежены при

Таблица 2. Величина агроценозного эффекта для вариантов с сидеральными агроценозами и посеянных в этих вариантах зерновых культур

Вариант	Сидеральные агроценозы, г сухого вещества/м ²			Зерновые культуры, ц/га		
	<i>Pa</i>	<i>Pвс</i>	<i>АЭ</i>	<i>Уа</i>	<i>Увс</i>	<i>АЭ</i>
Соя + подсолнечник	855	565	290	32.9	32.5	0.4
Подсолнечник + пайза	985	600	385	33.3	32.1	1.2
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	890	620	270	33.8	32.5	1.3
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	905	645	260	34.3	32.1	2.2

Примечание. *Pa*, *Pвс*, *АЭ*, *Уа* и *Увс* – соответственно продуктивность сидеральных агроценозов, продуктивность вариантов сравнения, агроценозный эффект, урожайность зерновых в вариантах, ранее занятых сидеральными агроценозами, урожайность зерновых в вариантах сравнения.

Таблица 3. Влияние фактора смешивания на агрохимические свойства пахотного и подпахотного горизонтов почв

Вариант	Содержание					
	гумуса, %		подвижного фосфора		обменного калия	
			мг/100 г почвы			
Апах	Аподпах	Апах	Аподпах	Апах	Аподпах	
Соя + подсолнечник	0.23*	0.28*	1.3*	1.0*	1.5*	2.0*
Подсолнечник + пайза	0.20*	0.20*	1.4*	1.1*	2.0*	1.9*
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	0.23*	0.19*	0.7*	0.7*	1.0*	1.8*
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	0.14*	0.32*	1.6*	0.8*	2.4*	1.7*

* Отмечены значимые на 5%-ном уровне изменения исследованных показателей.

действию фактора смешивания на урожайность зерновых культур.

Аналогичным образом были рассчитаны агроценотические эффекты для исследованных агрохимических свойств почвы (табл. 3).

Влияние агроценотического эффекта привело к значимому увеличению содержания гумуса (на 0.14–0.23%) в пахотном горизонте под всеми агрообществами. Особенно заметным это было в пахотном горизонте под агроценозами соя + подсолнечник и подсолнечник + гречиха сорта Крылатая. Содержание органического вещества в слое 0–25 см под этими агрообществами в результате влияния агроценотического эффекта увеличилось на 0.23%. Для указанных агрообществ вклад агроценотического эффекта в общее увеличение содержания гумуса в пахотном горизонте в изученных агрообществах составил 22–37%.

Воздействие фактора смешивания также привело к значимому увеличению содержания гумуса в подпахотном горизонте под всеми агрообществами, количество органического вещества под которыми возросло на 0.19–0.32%. Вклад фактора смешивания в общее увеличение содержания гумуса в подпахотном горизонте под изученными агрообществами составил 54–91%.

Таким образом, под влиянием агроценотического эффекта в пахотном горизонте и в слое 25–40 см под всеми без исключения агрообществами произошло значимое повышение содержания гумуса соответственно на 0.14–0.23 и 0.19–0.32%. Согласно балансовым расчетам [17], для повышения на указанную величину содержания органического вещества в пахотном горизонте тяжелосуглинистых черноземов необходимо внести подстилочного навоза 15.4–25.3 т/га. Увеличение содержания органического вещества в слое почвы 25–40 см на 0.19–0.32% могло произойти при поступлении в подпахотный горизонт количества органики, эквивалентного дозе подстилочного навоза 13.6–23.0 т/га.

Значимое увеличение содержания подвижного фосфора в пахотном слое под воздействием фактора смешивания (на 0.7–1.6 мг/100 г почвы) произошло под всеми смешанными посевами. Такую же закономерность наблюдали и в подпахотном горизонте, в котором агроценотический эффект привел к существенному возрастанию содержания подвижного фосфора под всеми смешанными агроценозами на 0.7–1.1 мг/100 г почвы.

Вклад агроценотического эффекта в увеличение содержания подвижного фосфора в пахотном горизонте под агрообществами составлял 35–67%. В слое почвы 25–40 см под указанными агроценозами вклад фактора смешивания в увеличение

содержания подвижного фосфора определялся величинами 47–69%. Однако при этом общий эффект от сидерации оказался незначимым.

Согласно зонально-провинциальным нормативам [18], эффект значимого увеличения содержания подвижного фосфора в пахотном слое на 0.7–1.6 мг/100 г почвы под воздействием фактора смешивания, отмеченный в пахотном горизонте под смешанными агрообществами, был эквивалентным внесению в запас 88–200 кг P_2O_5 /га. Для увеличения содержания подвижного фосфора на 0.7–1.1 мг/100 г почвы под сидеральными смесями в подпахотном горизонте мощных тяжелосуглинистых типичных черноземах потребовалось бы внести 88–138 кг P_2O_5 /га.

Влияние агроценотического эффекта приводило к значимому увеличению содержания обменного калия в слое почвы 0–25 см под всеми сидеральными смесями на 1.0–2.4 мг/100 г почвы.

Общий эффект увеличения содержания обменного калия под всеми смешанными агрообществами в пахотном горизонте (под воздействием всей совокупности факторов, включая фактор смешивания) был незначимым и характеризовался невысокими положительными и даже отрицательными показателями. Это означало, что при исключении фактора смешивания результирующая остальных факторов, влиявших на содержание обменного калия в слое почвы 0–25 см была отрицательной.

Под влиянием агроценотического эффекта произошло значимое увеличение количества обменного калия в слое почвы 25–40 см под всеми агрообществами. Вклад фактора смешивания в общее увеличение содержания обменного калия в подпахотном горизонте под агрообществами подсолнечник + пайза, подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра (агрообщества, под которыми в слое почвы 25–40 см отмечено достоверное увеличение содержания обменного калия под влиянием общего эффекта) составил 90.5, 85.7 и 85.0%. Фактически наблюдали ту же закономерность, что и в пахотном горизонте, когда вклад фактора смешивания в увеличение содержания обменного калия был определяющим по отношению к остальной совокупности факторов, результирующая которых была отрицательной.

Воздействие агроценотического эффекта привело к достоверному увеличению количества обменного калия в пахотном горизонте после сидерации смешанными агрообществами на 1.0–2.4 мг/100 г почвы. В подпахотном слое под всеми смешанными агроценозами содержание обменного калия в результате влияния этого эффекта возросло на 1.7–2.0 мг/100 г. Согласно зонально-провинциальным нормативам [18], для достижения этого эффекта было необходимо, чтобы в пахотный

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур и агрохимическими свойствами почв ($R_{\text{крит}} = 0.67$)

Показатели урожая	Урожайность зерновых, ц/га	Содержание					
		гумуса, %		подвижного фосфора,		обменного калия	
		мг/100 г почвы					
		Апах	Аподпах	Апах	Аподпах	Апах	Аподпах
Продуктивность сидератов, г сухого вещества/м ²	0.71	0.97	0.90	0.75	0.85	0.70	0.74
Урожайность зерновых, ц/га	—	0.70	0.70	0.74	0.82	0.47	0.50

горизонт поступило 300–720 кг K_2O /га, в подпахотный – 510–600 кг K_2O /га.

Для оценки связи между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур и изменением агрохимических свойств почв были рассчитаны коэффициенты корреляции (табл. 4).

Продуктивность сидератов в опыте была достоверно связана с урожайностью последующих зерновых культур и изменением всех исследованных свойств почв в обоих горизонтах. Урожайность зерновых культур значимо зависела от изменения содержания гумуса и подвижного фосфора в пахотном и подпахотном горизонтах, тогда как величины коэффициентов корреляции между урожайностью зерновых культур содержанием обменного калия в обоих горизонтах были недостоверными.

Судя по величинам коэффициентов корреляции, связь между продуктивностью сидератов и агрохимическими свойствами была более выраженной по сравнению с зависимостью от последних урожайности зерновых культур. Это представляется вполне логичным. Сидераты являлись удобрением, и чем большее их количество запахивали в почву, тем более увеличивалось в ней содержание питательных веществ. Зерновые высевали на 2-й год, и они поглощали питательные вещества не пропорционально их содержанию в почве, а в соответствии с потребностью растений в элементах питания, поэтому достоверные корреляционные связи между урожайностью и содержанием какого-либо элемента питания в почве могли появиться лишь тогда, когда этот элемент лимитировал величину урожая. Как следует из табл. 4, урожайность зерновых культур в рассмотренном опыте лимитировалась содержанием подвижного фосфора в пахотном и подпахотном горизонтах. Достоверные связи между урожайностью зерновых культур и содержанием гумуса в обоих горизонтах, по-видимому, отражали дефицит азота, значительную часть потребности в котором (примерно половину) растения восполняют за счет азота почвы, образовавшегося при минерализации гумуса [19].

Поскольку корреляционная зависимость между урожайностью зерновых культур и содержанием обменного калия как в пахотном, так и подпахотном горизонтах не была достоверной, этот элемент питания в данном опыте был менее дефицитным по сравнению с подвижным фосфором и азотом.

ВЫВОДЫ

Таким образом, показано, что использование для сидерации смешанных агроценозов может быть источником воспроизводства потенциально-го и эффективного плодородия черноземов в ЦЧЗ.

Уровень воспроизводства плодородия при сидерации почв зависит от состава используемых для этой цели агроценозов, что определяется направленностью и величиной влияния агроценозического эффекта на их функционально-структурные показатели и свойства почв применительно к конкретным почвенно-климатическим условиям.

Было установлено, что влияние агроценозического эффекта в бинарных смесях подсолнечника с соей, пайзой, гречихой сорта Крылатая и гречихой сорта Деметра приводило к значимому увеличению содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия в пахотном и подпахотном горизонтах черноземов под этими агроценозами.

Установлено, что влияние агроценозического эффекта привело к значимому увеличению содержания гумуса в пахотном и подпахотном горизонтах под всеми агроценозами соответственно на 0.14–0.23 и 0.19–0.32%, что приводило к существенному улучшению качества исследованных черноземов. Для повышения на указанную величину содержания органического вещества в пахотный горизонт тяжелосуглинистых черноземов необходимо внести подстилочного навоза 15.4–25.3 т/га, в подпахотный – 13.6–23.0 т/га.

Под влиянием фактора смешивания существенно возросло содержание подвижного фосфора

в слоях 0–25 и 25–40 см почвы под всеми агро-сообществами соответственно на 0.7–1.6 и 0.7–1.1 мг/100 г почвы. Для достижения такого эффекта в пахотный горизонт необходимо было бы внести 88–200 кг P_2O_5 /га, в подпахотный – 88–138 кг P_2O_5 /га.

Увеличению содержания обменного калия под сидеральными смесями в слое 0–25 см почвы на 1.0–2.4 и в слое 40–50 см на 1.7–2.0 мг/100 г почвы соответствовали бы нормы внесения 300–720 и 510–600 кг K_2O /га.

Между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур и изменением содержания гумуса, подвижного фосфора в почве как пахотного, так и подпахотного горизонтов были установлены связи, достоверные на 5%-ном уровне значимости.

Показано, что урожайность зерновых культур в рассмотренном опыте лимитировалась содержанием подвижного фосфора в пахотном и подпахотном горизонтах почвы. Достоверные связи между урожайностью зерновых культур и содержанием гумуса в обоих горизонтах по всей видимости свидетельствовали о дефиците азота. Недостоверные корреляционные зависимости между урожайностью зерновых культур и содержанием обменного калия в обоих горизонтах указывали на менее выраженный дефицит этого элемента по сравнению с подвижным фосфором и азотом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Клингген И.* Среди патриархов земледелия народов Ближнего и Дальнего Востока: Египет, Индия, Китай и Япония. Ч. 1. Введение. Египет. СПб., 1898. 460 с.
2. *Березин А.М., Чупрова В.В., Волошин Е.И.* Влияние сидератов на плодородие чернозема выщелоченного и урожайность зерновых культур в условиях Красноярской лесостепи // *Агрохимия*. 1994. № 11. С. 16–24.
3. *Гавар С.П., Макаров А.Р., Кошелев Б.С.* Влияние сидерального удобрения на урожай зерновых культур в лесостепной зоне Омской области // *Агрохимия*. 1997. № 12. С. 41–46.
4. *Шлапунов В.Н., Крышинева Н.Е.* Технология и эффективность возделывания смешанных посевов кормовых культур. Минск, 1981. 39 с.
5. *Гребенников А.М., Ельников И.И.* Экологические функции культурной растительности в агроценозе // *Агрохимия*. 2001. № 9. С. 75–84.
6. *Гребенников А.М.* Содержание подвижного фосфора и обменного калия в типичных черноземах ЦЧО под смешанными посевами // *Агрохимия*. № 5. 2009. С. 13–21.
7. *Гребенников А.М.* Влияние смешивания посевов на вынос элементов минерального питания надземной массой растений в сидеральных сообществах // *Агрохимия*. № 6. 2005. С. 26–35.
8. *Гребенников А.М.* Фитосанитарный аспект повышения плодородия черноземов сидеральными смесями // *Земледелие*. № 3. 2011. С. 24–26.
9. *Гродзинский А.М., Миркин Б.М., Головкин Э.А., Туганов В.В.* Перспективы функциональной агрофитоценологии // *Методологические проблемы аллелопатии*. Киев: Наукова думка, 1989. С. 15–28.
10. *Лебедева И.И., Королева И.Е., Гребенников А.М.* Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. Вып. 71. М., 2013. С. 16–26.
11. *Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А.* Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агро-черноземов Каменной степи // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. Вып. 83. М., 2016. С. 77–102.
12. *Кузьмин В.Д.* Смешанные посевы. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1968. 56 с.
13. *Столбовой В.С., Гребенников А.М.* Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 104. С. 31–67. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67>
14. *Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К.* Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Верс. 1.0. Коллект. монограф. Иваново: ПресСто, 2021. 260 с. <https://doi.org/0.51961/9785604637401>
15. *Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г.* М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
16. *Гребенников А.М.* Оценка взаимовлияния культур в смешанных посевах // *Агрохимия*. 2003. № 1. С. 68–73.
17. *Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция.* М.: ЦИНАО, 2000. 39 с.
18. *Фрид А.С., Кузнецова И.В., Королева И.Е., Бондарев А.Г., Козут Б.М., Уткаева В.Ф., Азовцева Н.А.* Зонально-провинциальные нормативы изменения агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.
19. *Динамика баланса гумуса в пахотных землях Российской Федерации.* М.: Госкомзем РФ, РосНИИ-земпроект, 1998. 60 с.

Effect of Sideral Binary Mixtures with Sunflower on the Quality and Fertility of Typical Chernozems

A. M. Grebennikov[#]

Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Institute"

Pyzhevsky per. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia

[#]E-mail: gream1956@gmail.com

In the field experiment, the effect of binary sideral mixtures with sunflower on the content of humus, mobile phosphorus and exchangeable potassium in arable and sub-arable horizons of typical heavy loamy chernozem was studied. It is shown that the use of mixed agricultural communities for sideration can be one of the sources of reproduction of potential and effective fertility of chernozems in the Central Chernozem District. It was found that the influence of the agrocenotic effect in binary mixtures of sunflower with soy, payza, buckwheat of the Krylataya variety and buckwheat of the Demeter variety led to a significant increase in the content of humus, mobile phosphorus and exchangeable potassium in the arable and sub-arable horizons of chernozems under these agricultural communities. It was shown that the effect of the agrocenotic effect on the increase in humus content was equivalent to the introduction of litter manure into the arable horizon of 15.4–25.3 t/ha, in the sub-arable – 13.6–23.0 t/ha. This led to a significant improvement in the quality of the studied soils. An increase in the content of mobile phosphorus under the influence of the mixing factor could be achieved by introducing 88–200 and 88–138 kg of P₂O₅/ha into the layers of 0–25 and 25–40 cm of soil, respectively. An increase in the content of exchangeable potassium under sideral mixtures in a layer of 0–25 cm of soil by 1.0–2.4 and in a layer of 40–50 cm by 1.7–2.0 mg/100 g of soil would correspond to doses of 300–720 and 510–600 kg K₂O/ha.

Keywords: binary green manure mixtures, green manure productivity, grain crop yield, agrocenotic effect, agrochemical properties, soil quality, typical heavy loamy chernozem.

УДК 632.95.028:634.11

ДИНАМИКА ДЕГРАДАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ПРОПИНЕБА И ЕГО МЕТАБОЛИТА ПРОПИЛЕНТИОМОЧЕВИНЫ В ПЛОДАХ ЯБЛОНИ

© 2024 г. Т. Д. Черменская^{1,*}, М. О. Петрова¹, А. С. Комарова¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: tchermenskaya@yandex.ru

Исследовали поведение пропинеба и пропиленглициомочевина (ПТМ) в яблоках в динамике после обработки препаратом Антракол, ВДГ в 3-х регионах. Определение остаточных количеств пестицида проведены по разработанным и оптимизированным методикам. Установлено, что после 3-кратной обработки фунгицидом пропинеб и ПТМ быстро и равномерно разлагаются в плодах в различных регионах возделывания культуры. Через 28 сут после последней обработки содержание действующего вещества препарата и его метаболита находятся на уровне ниже соответствующих МДУ. В момент уборки урожая исследованные вещества в яблоках не были найдены ни в одной из климатических зон, так же они отсутствовали и в соке. На основании полученных данных о разложении пропинеба в плодах яблок был установлен характер диссипации. Период полураспада составил от 3-х до 8-ми сут.

Ключевые слова: фунгициды, метаболит, период полураспада, хроматография.

DOI: 10.31857/S0002188124050036, **EDN:** CZVYTX

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения урожайности на современном этапе растениеводства широко используют пестициды, однако этому подходу сопутствует определенный токсикологический риск для человека, животных и окружающей среды. Получение качественной и безопасной сельскохозяйственной продукции является одной из основных задач социума, определяющее жизнь и здоровье населения. Международный кодекс поведения по распределению и использованию пестицидов был одним из первых добровольных кодексов в поддержку продовольственной безопасности и защиты здоровья человека и окружающей среды [1].

Определение пестицидов в объектах окружающей среды, сельскохозяйственной продукции с привлечением современных физико-химических методов анализа является весьма актуальной задачей. Постоянное расширение ассортимента пестицидов и повсеместное их использование требуют все более ответственного контроля над пестицидной загрязненностью агроэкосистем, следовательно, и разработки современных высокочувствительных методов определения остаточных количеств пестицидов [2].

Дитиокарбаматы широко используют в качестве фунгицидов в сельском хозяйстве из-за их высокой биологической активности и достаточно низких затрат на производство. Это полимерные комплексы

с переходными металлами, такими как марганец в Манебе или цинк в Пропинебе. Эти серосодержащие соединения являются основной группой фунгицидов, используемых для контроля ≈ 400 патогенов на более чем 70-ти культурах и зарегистрированы во всех государствах-членах ЕС и многих других странах [3, 4].

Существует большой интерес к потенциальному влиянию использования дитиокарбаматов на экологию и здоровье человека. Как правило, дитиокарбаматы не считаются высокотоксичным, однако токсичность увеличивается за счет присутствия иона тяжелого металла в молекуле. Краткосрочное воздействие этих веществ может вызывать раздражение глаз, дыхательных путей и кожи. Кроме того, их метаболиты (этиленглициомочевина (ЭГМ) или имидазолидин-2-тион и пропиленглициомочевина (ПТМ) или 4-метилимидазолидин-2-тион) могут оказывать влияние на щитовидную железу и вызывать некоторые нейротоксические эффекты. Предположительно эти соединения обладают канцерогенным, мутагенным и тератогенным действием [5, 6]. Поэтому определение дитиокарбаматов и их метаболитов в окружающей среде, продукции и других материалах имеет большое значение.

Методы анализа дитиокарбаматов были впервые систематизированы в начале 1970-х гг. Помимо проблем, связанных с растворимостью, есть еще одна большая проблема – низкая стабильность

дитиокарбаматов в растительных матрицах. Особенно при контакте с кислыми растительными соками эти соединения быстро разлагаются до сероуглерода (CS_2) и соответствующих аминов. На этом фоне десятилетиями остаточные количества дитиокарбаматов определяли после горячего кислотного гидролиза, сбора образующегося CS_2 , который детектировали различными методами [7].

Определение ЭТМ и ПТМ в пищевых продуктах достигают с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с селективными детекторами или после дериватизации и последующего анализа с помощью газовой хроматографии (ГХ). ПТМ и ЭТМ являются полярными соединениями и хорошо растворяются в воде, поэтому их экстракция из фруктов и овощей – сложная задача. Преобладающие подходы основаны на переэкстракции в дихлорметан или дополнительной очистке на патронах для твердофазной экстракции, но эти способы неоднозначны, поскольку многие авторы сталкиваются с большими трудностями при получении приемлемых количественных выходов и повторяемости результатов. Разработанный метод ВЭЖХ с масс-детектированием позволил определить дитиокарбаматы и метаболиты во многих растительных матрицах. Основными недостатками метода являются высокий предел обнаружения (0.25 мг/кг) и высокая стоимость анализа [8].

Опасность для населения при использовании дитиокарбаматов определяется продуктами их деградации. Расчетным путем было показано, что среднесуточное поступление этих веществ для жителей США составляет от 0.24 до 3.65 мкг/кг, а для жителей Канады – 1 мкг/кг [9].

Около 16% из 30 тыс. образцов 30-ти пищевых продуктов, проверенных в Бразилии, содержали остаточные количества дитиокарбаматов, и в основном это относилось к яблокам (59.3%). Хроническое потребление дитиокарбаматов составило 6.7% от соответствующих индексных соединений, причем яблоки – >50% потребления [10].

Во Франции дитиокарбаматы были определены количественно в 13% образцов овощей и 3% фруктов. Самые высокие показатели касались листовых овощей (16%), особенно салата (21%), за которым следовал столовый виноград (6%) (МДУ были превышены для 6.4% образцов салата). Наибольший вклад в общее диетическое воздействие оказывали бобы (59%), яблоки (11%) и салат (2.5%) [11].

Анализ продукции в Великобритании и Германии показал положительные результаты присутствия дитиокарбаматов в яблоках, грушах, сливах, столовом винограде, папайе и брокколи в концентрациях от 0.03 до 2.69 мг/кг, выраженных в эквивалентном количестве CS_2 . Ни один из показателей не превышал максимально допустимый уровень содержания пестицида (МДУ), установленный Европейским союзом [12].

В нашей стране МДУ содержания пропинабеа и пропилентиомочевины в плодовых семечковых составляет 0.05 и 0.01 мг/кг соответственно, допустимая суточная доза – 3.0 и 0.2 мг/кг массы тела человека для пропинабеа и пропилентиомочевины [13].

Цель работы – изучение динамики деградации пропинабеа и его метаболита пропилентиомочевины в яблоках и определение их в урожае (плоды и сок) после 3-кратной обработки фунгицидом Антракол, ВДГ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Яблони обрабатывали фунгицидом Антракол, ВДГ (700 г/кг пропинабеа) с нормой применения 2.25 кг/га в условиях 3-х климатических зон (Орловская, Тамбовская и Ростовская обл.) трехкратно с интервалом между обработками 10 сут. Пробы отбирали отдельно с каждой повторности опыта, а также с контрольных вариантов, не обработанных пестицидами. Отобранные пробы замораживали при температуре $-18^{\circ}C$, хранили в морозильной камере при этой же температуре до начала анализа. Отбор проб для анализа проводили в день последней обработки (через 2 ч) на 14-, 28-, 40- и 50-е сут (сбор урожая) после обработки. Пробы отбирали отдельно с каждой делянки в вариантах, из них готовили средний образец (по одному на вариант) и в лаборатории делали 2 параллельные пробы для каждого образца.

Анализ образцов на содержание пропинабеа проводили в соответствие с МУК 4.1.2016–05 [14]. Предел определения пропинабеа (по CS_2) – 0.005 мг/кг.

Определение остаточных количеств пропинабеа (по CS_2) проводили на газовом хроматографе Agilent 7890B с пламенно-фотометрическим детектором и авто-сAMPLером паровой фазы Agilent 7697A Headspace Sampler, колонка капиллярная GS-GASPRO (30 м · 0.32 мм). Температура колонки $40^{\circ}C$ (5 мин) с последующим нагревом до $200^{\circ}C$ со скоростью $50^{\circ}C/мин$, температура испарителя $250^{\circ}C$, температура детектора $200^{\circ}C$, расход газа носителя (азот) через колонку – $5 см^3/мин$, расход водорода – $60 см^3/мин$, воздуха – $100 см^3/мин$. Дозируемый объем паровой фазы $1 см^3$.

Анализ образцов на содержание пропилентиомочевины проводили по МУК 4.1.3406–16 [15]. Предел обнаружения ПТМ в плодах и яблочном соке – 0.01 мг/кг.

Определение остаточных количеств пропилентиомочевины проводили на ультраэффективном жидкостном хроматографе “ACQUITY” (Waters) с PDA-детектором, снабженном дегазатором, автоматическим пробоотборником и термостатом колонки. Аналитическая колонка ACQUITY VEN C-18 (100 × 2.1) мм, 1.7 мкм (Waters). Температура колонки $30 \pm 1^{\circ}C$. Подвижная фаза: ацетонитрил и 0.005M ортофосфорная кислота в соотношении 1 : 99. Скорость потока

элюента — 0.2 мл/мин. Рабочая длина волны УФ-детектора — 233 нм. Объем вводимой пробы — 10 мкл.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Антракол, ВДГ (водно-диспергируемые гранулы) — контактный фунгицид, применяемый для уничтожения фитофтороза и альтернариоза при заболевании картофеля, парши и курчавости листьев плодовых деревьев и милдью винограда. Действие фунгицида направлено на эффективную защиту растений при поражении распространенными видами заболеваний. Препарат снижает скорость химических реакций при прорастании грибных спор. Действие средства происходит как на клеточном, так и мембранном уровнях, при этом улучшается обмен белков и углеводов. Антракол активно действует на патогены, не оставляя грибам возможности развиваться. Эффект воздействия Антракола проявляется уже через 2–3 ч после первичной обработки. Период действия препарата зависит от условий погоды и вида заболевания растений [16].

Основным действующим веществом препарата является пропиенеб (рис. 1а), относящийся к классу дитиокарбаматов — производных диметилдитиокарбаминовой и этилен-*bis*-дитиокарбаминовой кислот. Основным метаболитом при деградации пропиенеба является пропилендиомочевина (рис. 1б).

Метод определения пропиенеба основан на газохроматографическом определении сероуглерода, выделившегося в парогазовую фазу в результате кислотного гидролиза пробы, помещенной в герметически закрытый сосуд при 80°C. Метод был валидирован в лаборатории (табл. 1). Полнота извлечения — >90%.

Для определения пропилендиомочевины использовали метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием ультрафиолетового (УФ) детектора после извлечения из образцов водным метанолом и последующей очистки путем дисперсионной твердофазной экстракции с использованием окиси алюминия. Ранее нами был разработан метод,

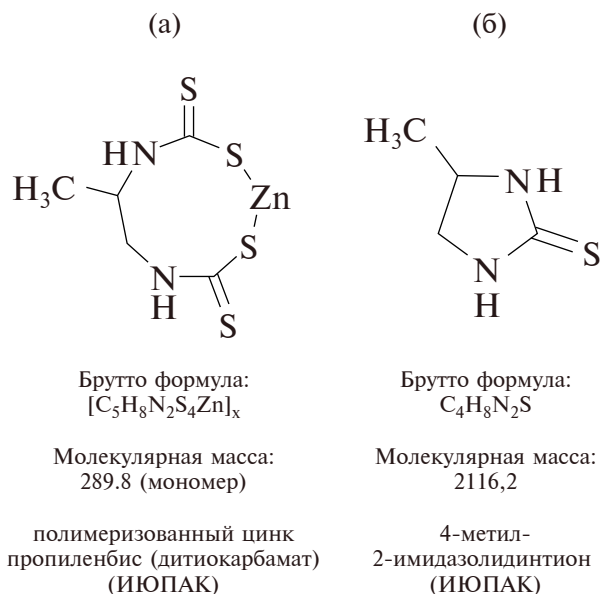


Рис. 1. Структурные формулы пропиенеба (а) и пропилендиомочевины (б).

где ПТМ экстрагировали ацетонитрилом и анализировали аликвоту полученного экстракта без очистки, что приводило к высокому фону на хроматограмме и не очень хорошему отделению от мешающих примесей (МУК 4.1.3267–15) [17]. Трудности при извлечении пропилендиомочевины из растительных матриц связаны с ее небольшой растворимостью в органических растворителях, что не позволяет подобрать избирательный экстрагент, неустойчивостью в водных растворах, что приводит к необходимости хроматографирования пробы непосредственно после экстракции. Для извлечения ПТМ из яблок нами был подобран другой экстрагент — смесь метанол–вода в соотношении 3 : 1. Для сока использовали разбавление водой и добавление сорбента для очистки, что упростило ранее принятую процедуру — очистку на патроне для твердофазной экстракции. Условия

Таблица 1. Полнота извлечения пропиенеба и ПТМ из образцов плодов и сока яблок (стандартное отклонение, доверительный интервал среднего результата для $n = 20$, $P = 0.95$)

Анализируемый объект	Предел определения	Диапазон определяемых концентраций, мг/кг	Среднее полноты извлечения, %	Стандартное отклонение (S), %	Доверительный интервал среднего результата, ±, %
Пропиенеб					
Плоды	0.005	0.005–0.05	94.1	2.30	1.15
Сок	0.005	0.005–0.05	96.6	3.38	1.69
ПТМ					
Плоды	0.01	0.01–0.1	83.2	4.87	2.13
Сок	0.01	0.01–0.1	80.2	3.96	1.73

хроматографирования остались прежними. Полнота извлечения составила 80–83% (табл. 1).

С помощью вышеупомянутых методов были проведены исследования поведения пропинеба и пропилентиомочевины в динамике после обработки яблонь препаратом Антракол, ВДГ, проведенной в 3-х регионах (рис. 2).

Несмотря на различное количество пропинеба в день обработки, наблюдали его быструю и равномерную деградацию во всех 3-х регионах.

Самое высокое содержание пропинеба в день обработки было зафиксировано в плодах из Тамбовской обл. За 14 сут количество пропинеба снизилось в 18.8 раза. Его количество на уровне 0.01–0.04 мг/кг сохранялось до 40 сут. Количество ПТМ увеличивалось в плодах до максимума (0.04 мг/кг) на 14-е сут и уменьшалось до величины ниже предела обнаружения к 28-м сут.

В Орловской обл. за 14 сут количество пропинеба уменьшилось в 10 раз. Поведение пропинеба и пропилентиомочевины в плодах яблони было аналогичным – количество пропинеба также плавно снижалось вплоть до 40-х сут, а содержание ПТМ достигло пика на 14-е сут и затем уменьшилось к 28-м сут после обработки.

В Ростовской обл. содержание пропинеба снижалось более плавно, чем в первой и второй климатических зонах – в 3 раза за 2 нед. Его присутствие в плодах яблони также было зафиксировано в течение 40

сут, а его метаболит пропилентиомочевина не был обнаружен ни в одной пробе.

В момент уборки урожая пропинеб и пропилентиомочевину в яблоках не наблюдали ни в одной из климатических зон, также они отсутствовали и в соке.

В Орловской и Тамбовской обл. быстрое снижение содержания пропинеба было связано скорее всего с большим количеством осадков в первые 2 нед после обработки. Например, в Орловской обл. в данный период выпало ≈ 30 мм осадков, в Тамбовской – 47.2 мм, тогда как в Ростовской области – 0.4 мм. Кроме того, быстрое разрушение пропинеба в пробах из Тамбовской обл. могло быть связано с высоким титром кислот у сорта Антоновка – 1.0% по сравнению с 0.52–0.60% у других сортов [18]. Известно, что в кислой среде разрушение пестицида значительно ускоряется.

Несмотря на более высокое содержание пропинеба в день обработки в Тамбовской обл., количество образовавшегося метаболита через 14 сут было больше в Орловской обл. Гидролитическая стабильность пропинеба очень низкая, он быстро метаболизирует до пропилентиомочевины, период полураспада при водном фотолизе составляет 0.1–1.0 сут при pH 7.0. Период полураспада пропилентиомочевины в воде больше – 2.3–4.0 сут.

Известно, что остатки пропинеба находят главным образом на поверхности плодов, и только метаболиты – ПТМ и 4-метил-имидазолин – проникают внутрь растения, но в очень малых количествах [19]. Пропинеб разлагается в основном через образование ПТМ,

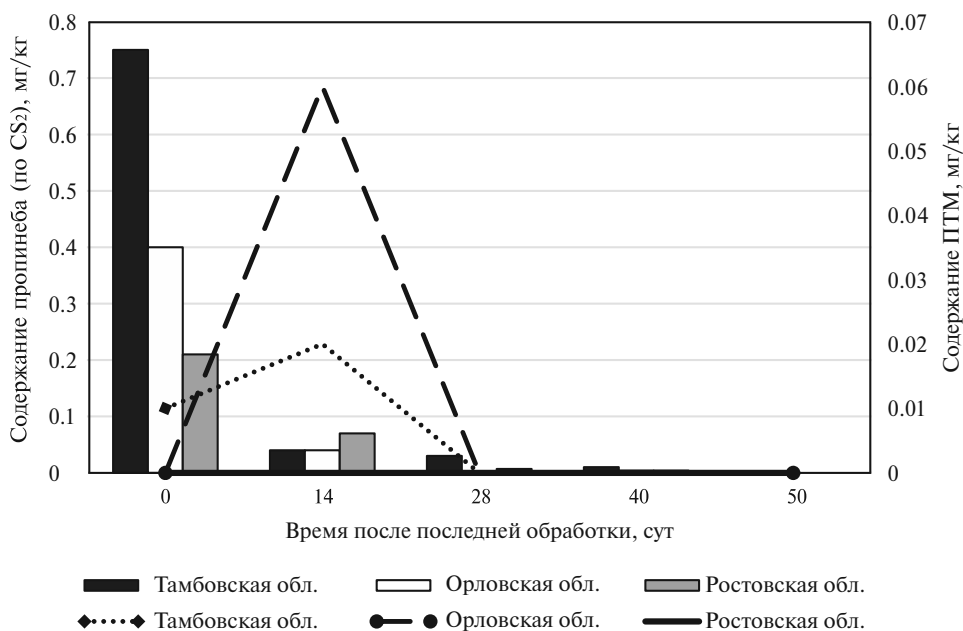


Рис. 2. Содержание остаточных количеств пропинеба и его метаболита пропилентиомочевины в яблоках при применении препарата Антракол, ВДГ (700 г пропинеба/кг) с нормой применения 2.25 кг/га в условиях 3-х почвенно-климатических зон.

Таблица 2. Численные показатели деградации пропинеба в яблоках

Почвенно-климатическая зона	Период разложения пестицида на 50% (ДТ ₅₀)	Период разложения пестицида на 90% (ДТ ₉₀)	χ ²
	сут		
I зона (Орловская обл.)	4.2	14.0	1.3
II зона (Тамбовская обл.)	3.4	11.3	2.4
III зона (Ростовская обл.)	8.0	26.5	7.9

деградация которой на поверхности яблок происходит очень быстро. Ранее при оценке поведения пропинеба и ПТМ в плодах яблони после обработки препаратом, содержащим 70% пропинеба, с нормой расхода по действующему веществу 2.8 кг/га, было показано, что в день обработки количество пропинеба находилось в диапазоне 0.63–6.0 мг/кг, ПТМ – 0.2–0.49 мг/кг, на 14-е сут после обработки остаточные количества находились в пределах 0.79–1.5 и 0.08–0.11 мг/кг для пропинеба и ПТМ соответственно. В соке холодного отжима через 10 сут после обработки было найдено пропинеба от 0.1 до 0.34, ПТМ – от 0.01 до 0.015 мг/кг. В момент сбора урожая содержание пропинеба достигало 0.01–0.1, ПТМ – <0.01 мг/кг [20].

При защите сельскохозяйственных культур от вредных организмов важно учитывать биологические периоды полураспада применяемых пестицидов для обеспечения безопасности получаемой продукции. Одним из количественных показателей, характеризующих деградацию действующего вещества пестицида в растениях, является период полураспада. Например, при проведении испытаний в Индии на томатах величина периода полураспада пропинеба варьировалась в зависимости от агроклиматической зоны от 3.36 до 11.4 сут [21]. На основании полученных нами данных о разложении пропинеба в плодах яблок, был установлен характер диссипации. Период полураспада составил от 3 до 8 сут (табл. 2).

Наибольшая скорость диссипации пестицида была определена в пробах из Тамбовской обл., где сложились оптимальные для разложения пропинеба погодные условия, наименьшая скорость – в Ростовской обл., где был отмечен недостаток влаги. Практически полное разложение пестицида наступало на 11–27-е сут в зависимости от почвенно-климатической зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг состояния загрязнения пестицидами продовольственной продукции и окружающей среды позволяет оценивать степень рисков использования химических средств защиты растений. При оценке динамики деградации пропинеба и его метаболита пропилентиомочевины в яблоках после 3-кратной обработки фунгицидом Антракол, ВДГ, было установлено, что пропинеб и ПТМ быстро и равномерно

разлагались в яблоках в различных регионах возделывания культуры. Через 28 сут после последней обработки содержания д.в. препарата и его метаболита находились на уровне ниже соответствующих МДУ. В собранном в Тамбовской, Орловской и Ростовской обл. на 50-е сут после обработки фунгицидом урожае яблок и полученном из него соке остаточных количеств пропинеба и пропилентиомочевины не обнаружено.

Период полураспада изученных препаратов составил от 3 до 8 сут в зависимости от климатической зоны, причем скорость разложения была меньше в пробах из Ростовской обл.

При соблюдении регламентов применения препарат Антракол, ВДГ (700 г пропинеба/кг) можно использовать для защиты плодового сада от болезней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International code of conduct on the distribution and use of pesticides // Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2002. 36 p.
2. Петрова М.О., Черменская Т.Д. Поиск остаточных веществ пестицидов в сельскохозяйственной продукции – путь к безопасному продовольствию // Междисциплин. научн. и прикл. журн. “Биосфера”. 2019. Т. 11. № 1. С. 40–47.
3. European Commission, 2002. Food Safety, Pesticide Residue, Brussels. http://europa.eu.int/comm/food/fs/ph_ps/pest/index_en.htm
4. Kazos E.A., Stalikas C.D., Nanos C.G., Konidari C.N. Determination of dithiocarbamate fungicide propineb and its main metabolite propylenethiourea in airborne samples // Chemosphere. 2007. V. 68. Iss. 11. P. 2104–2110.
5. FAO/WHO, 1993. Pesticides residues in food, 1993. Evaluations 1993. Part II-Toxicology // Joint FAO/WHO Meeting on Pesticides Residues. Geneva. Switzerland, 1993. 168 p.
6. Vettorazzi G., Almeida W.F., Burin G.J., Jaeger R.B., Puga F.R., Rahde A.F., Reyes F.G., Schwartsman S. International safety assessment of pesticides: Dithiocarbamate pesticides, ETU, and PTU – A review and update // Teratog. Carcinog. Mutagen. 1995. V. 15. Iss. 6. P. 313–337.

7. *Crnogorac G., Schwack W.* Residue analysis of dithiocarbamate fungicides // *Trends Analyt. Chem.* 2009. V. 28. № 1. P. 40–50.
8. *Blasco C., Font G., Picó Y.* Determination of dithiocarbamates and metabolites in plants by liquid chromatography–mass spectrometry // *J. Chromatography A.* 2004. V. 1028. Iss. 2. P. 267–276.
9. Дитиокарбаматные пестициды, этилентиомочевина и пропилентиомочевина: общее введение. ЮНЕП, МОТ, ВОЗ. Женева: ВОЗ, М.: Медицина, 1991. 142 с.
10. *Jardim A.N.O., Mello D.C., Brito A.P., van der Voet H., Boon P.E., Caldas E.D.* Probabilistic dietary risk assessment of triazole and dithiocarbamate fungicides for the Brazilian population // *Food Chem. Toxicol.* 2018. V. 118. P. 317–327.
11. *Nougadère A., Merlo M., Héraud F., Réty J., Truchot E., Vial G., Cravedi J.-P., Leblanc J.-C.* How dietary risk assessment can guide risk management and food monitoring programmes: The approach and results of the French Observatory on Pesticide Residues (ANSES/ORP) // *Food Control.* 2014. V. 41. P. 32–48.
12. *Schmidt B., Christensen H.B., Petersen A., Sloth J.J., Poulsen M.E.* Method validation and analysis of nine dithiocarbamates in fruits and vegetables by LC–MS/MS // *Food Addit. Contam. P. A.* 2013. V. 30. Iss. 7. P. 1287–1298.
13. СанПиН 1.2.3685–21. IX. Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. С. 721–976.
14. МУК 4.1.2016–05. Методические указания по определению дитиокарбаматов в растительном материале парофазным газохроматографическим методом // Определение остаточных количеств пестицидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и объектах окружающей среды. Сб. метод. указ. (МУК 4.1.2009–4.1.2021–05). М., 2009. С. 84–90.
15. *Долженко В.И., Цибульская И.А., Комарова А.С., Черменская Т.Д.* Определение остаточных количеств пропилентиомочевины в луке-репке, ботве и клубнях картофеля, томатах и томатном соке, яблоках и яблочном соке методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (МУК 4.1.3406-16). Метод. указ. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2017. 12 с.
16. Фунгицид Антракол. <https://my-agro.com/fungitsid-antrakol>
17. *Долженко В.И., Цибульская И.А., Комарова А.С., Черменская Т.Д., Человечкова В.В., Далинова А.А.* Определение остаточных количеств пропилентиомочевины в воде, почве, винограде и виноградном соке методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (МУК 4.1.3267-15). Метод. указ. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2016. 15 с.
18. База данных сортов яблони. <https://vniispk.ru/varieties>
19. *The Pesticide Manual.* 19th ed. / Ed. J.A. Turner. UK, Alton: British Crop Production Council, 2021. 1400 p.
20. Propineb (Pesticide residues in food: 1984 evaluations). <https://www.inchem.org/documents/jmpr/jmpmono/v84pr40.htm>
21. *Tripathy V., Sharma K.K., George T., Patil C.S., Saindane Y.S., Mohapatra S., Siddamallaiah L., Pathan A.R.K., Yadav A.K., Sharma K., Yadav R., Gupta R., Walia S.* Dissipation kinetics and risk assessment of iprovalicarb + propineb fungicide in tomato under different agroclimates // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2021. V. 28. № 24. P. 31909–31919.

Dynamics of Degradation of Residual amounts of Propineb and Its Metabolite Propyleneurea in Apple Fruits

T. D. Chermenskaya^{a, #}, M. O. Petrova^a, A. S. Komarova^a

^a*The All-Russian Scientific Research Institute of Plant Protection, shosse Podbelskogo 3, St. Petersburg–Pushkin 196608, Russia*

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

The behavior of propineb and propyleneurea (PTU) in apples was studied in dynamics after treatment with Anthracol, water-dispersible granules (WDG) in 3 regions. The determination of pesticide residues was carried out according to developed and optimized methods. It was found that after 3-fold treatment with the fungicide propineb and PTU decompose quickly and evenly in fruits in various regions of cultivation. 28 days after the last treatment, the content of the active substance of the drug and its metabolite are at a level below the corresponding of the maximum allowable level (MAL). At the time of harvesting, the studied substances in apples were not found in any of the climatic zones, as well as they were absent in the juice. Based on the data obtained on the decomposition of propineb in apple fruits, the nature of dissipation was established. The half-life ranged from 3 to 8 days.

Keywords: fungicides, metabolite, half-life, chromatography.

УДК 632.4:633.11«324» (470.61)

ГРИБНЫЕ ВОЗБУДИТЕЛИ ПЛЕСЕНИ ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2024 г. Н. И. Будынков^{1,*}, С. Н. Михалева¹, Л. Н. Ульяненко¹, А. П. Глинушкин¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, пос. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

*E-mail: oranzar@yandex.ru

Многолетний мониторинг колонизации зерна озимой пшеницы грибными возбудителями плесени, негативно влияющими на качество зерна при хранении, снижающими качество посевного материала, пищевого зерна и фуража, показал, что высокий уровень встречаемости на зерне ростовских образцов озимой пшеницы за период 2014–2021 гг. проявили плесневые грибы *Mucor* spp., *Aspergillus niger*, *Aspergillus glaucus*, *Aspergillus flavus*, виды рода *Penicillium*. Относительно низкую встречаемость наблюдали у видов *Rhizopus nigricans*, *Cladosporium herbarum*. Возбудители плесени являются продуцентами опаснейших микотоксинов: охратоксина А (виды *Penicillium*, *Aspergillus niger*, *A. glaucus*), афлотоксина В₁ (*A. flavus*), ризионинов (*Rhizopus* spp.) и др. В регионах Юга России при сильной засухе в почве и на нижних частях растений нередко отмечено накопление гриба *Penicillium purpureogenum*, на некоторое время он мог стать доминирующим. При восстановлении уровня влагообеспеченности наблюдали снижение встречаемости *P. purpureogenum*, нередко до нулевых показателей и увеличение встречаемости муконовых грибов (*Fusarium solani*, *F. semitectum*), неспорулирующих грибов *Mycelia sterilia* и др., заметное возрастание общей плотности грибных колоний. Наибольший уровень наружной инфекции зерна был обусловлен колонизацией зерновок грибами из группы *Penicillium*, также *A. glaucus* и *A. niger*, наибольший уровень внутренней инфекции – группой *Penicillium*, *Rhizopus nigricans*, *A. niger*. Доминирование наружной инфекции над внутренней наблюдали при колонизации пенициллами и аспергиллами, доминирование внутренней над наружной – ризопусом и кладоспориумом.

Ключевые слова: озимая пшеница, встречаемость, колонизация, возбудители плесени, патогены, микотоксины, севооборот, культура-предшественник, агроценоз.

DOI: 10.31857/S0002188124050048, EDN: CZJXDV

ВВЕДЕНИЕ

Озимая пшеница является важнейшей полевой культурой Юга России. Во многих хозяйствах она занимает больше половины посевных площадей. Выращивание озимой пшеницы в этом регионе производят, применяя в основном интенсивные технологии с элементами минимизации обработки почвы, что создает благоприятные условия не только для активного развития растений и получения высоких урожаев, но и для проявления грибных заболеваний – гнилей, трахеомикозов, листовых пятнистостей и др., накоплению опасных грибов в агроценозах (на растениях, растительных остатках, в почве), на полученном зерне. Разработка эффективных методов борьбы с болезнями семян в период хранения требует углубленного изучения биологии их возбудителей – особенностей развития в зависимости от внешних факторов, а также их влияния на посевные качества семян. Зерновая микробиота может активно влиять на свойства

зерна – посевные, фуражные и продовольственные качества. Знание видового состава, закономерностей развития и взаимоотношений отдельных представителей семенной микрофлоры позволит регулировать режимы хранения, продлевать сроки сохранения высокого качества посевного материала, пищевого зерна и фуража. На посевные качества зерна (семян) оказывают влияние патогены и возбудители плесени, которые могут снижать всхожесть, силу роста; они оказывают также негативное воздействие на потребительские качества зерна (продовольственного, фуражного) – натуру, стекловидность, хлебопекарные свойства, содержание клейковины, белка, загрязненность микотоксинами. Возбудители плесени являются продуцентами опаснейших микотоксинов: охратоксина А (виды *Penicillium*, *Aspergillus niger*, *A. glaucus*), афлотоксина В₁ (*A. flavus*), ризионинов (*Rhizopus* spp.) и др. В стрессовые периоды вегетации возбудители плесени могут накапливаться на растениях, оказывая на них депрессирующее влияние, а также

на растительных остатках и в почве, являясь компонентами микробиологической структуры полевых агроценозов и индикаторами уровня их деградации [1, 2]. При заметном депрессивном влиянии плесневых грибов на биологические компоненты агроценозов может возникать необходимость коррекции микробиологической структуры путем изменения схем севооборотов, микробиологической санации растительных остатков и др.

Конструктивная коррекция качественных и количественных показателей семенного микробиома — один из путей получения высоких урожаев полноценной продукции, а также оптимизации микробиологической структуры полевых агроценозов.

Цель работы — обобщение многолетних данных мониторинга динамики возбудителей плесени, микотоксикантов на зерне озимой пшеницы в зернопроизводящих хозяйствах Ростовской обл.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на образцах зерна озимой пшеницы с производственных полей Ростовской обл. в лаборатории ВНИИФ в 2015–2021 гг. Образцы зерна отбирали в пунктах временного хранения (токи, зернохранилища) хозяйств региона.

Микробиологические анализы в условиях лаборатории ВНИИФ проводили по методике с использованием искусственной питательной среды Чапека [3–5]. Зерновки озимой пшеницы закладывали на питательную среду с целью оценки уровня их наружной и внутренней колонизации микроорганизмами грибной природы. Анализ видового состава микробиоты *in vitro* проводили на 7-е сут инкубации. Видовую принадлежность образующихся на питательной среде колоний микромицетов определяли по морфолого-культуральным показателям и форме органов споруляции (конидиеносцев, конидий, асков, спор и др.) с помощью микроскопирования [3, 4, 6].

Учитывали количество колоний микроорганизмов разных видов, выделенных *in vitro*, далее вычисляли долю (%) каждого выделенного микроорганизма относительно числа зерновок, размещенных на питательной среде; проводили подсчет доли проанализированных образцов зерна с колонизацией тем или иным микроорганизмом. На основании перечисленных данных вычисляли ежегодные и средние за 2014–2021 гг. показатели.

В работе приведены результаты оценки уровня колонизации зерна озимой пшеницы наиболее часто встречающимися микромицетами — возбудителями плесени различной степени опасности по средним показателям за 7 лет исследования, а также максимальные и минимальные среднегодовые показатели за оценочный период.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ежегодные оценки микробиоты семенного и продовольственного зерна озимой пшеницы в хозяйствах юга России показали, что их колонизирует относительно стабильный круг микромицетов различного уровня патогенности и потенциальной микотоксичности, а также сапротрофов — нейтральных и антагонистических. Среди перечисленных групп грибов есть доминирующие, как сапротрофные, так и патогенные, а также встречающиеся единично и не каждый год. В проведенном исследовании определяли 2 показателя: средний за 7 лет показатель доли образцов, в которых встречался тот или иной микромицет, и показатель доли колонизированных им зерновок в образцах. Данные показатели учитывали относительно наружной и внутренней инфекции. Высокий уровень встречаемости на зерне озимой пшеницы ростовских образцов проявили плесневые грибы *Mucor* spp., *Aspergillus niger*, *Aspergillus glaucus*, *Aspergillus flavus*, представители рода *Penicillium*. Относительно низкую встречаемость отметили у видов *Rhizopus nigricans*, *Cladosporium herbarum*.

Возбудители плесени могут вызывать при хранении значительные потери зерна, ухудшение его качества. Их активное развитие приводит к негативным изменениям цвета зерна, запаха, содержания в зерне жиров, аминокислот, сухого вещества, снижению натурального показателя, накоплению микотоксинов [7].

В проведенном исследовании среди возбудителей плесени зерновок доминировали представители рода *Mucor* (порядок Mucorales), относительно нейтральные быстрорастущие микотоксикологические грибы. В образцах из Ростовской обл. 2015–2021 гг. наружное инфицирование зерна мукорами отмечено в 66.8% образцов, внутреннее — в 73.2%. Среднегодовые величины доли образцов, инфицированных мукорами за контрольный период, составляли для наружной инфекции 35–100, для внутренней — 56–100%. Отмечено некоторое преобладание доли образцов с внутренней инфекцией над количеством образцов с наружной (табл. 1).

В полевых агроценозах муконовые грибы (*Mycor* spp., *Rhizopus* spp. и др.) имеют значение как быстро растущие экспансивные формы, быстро связывающие органику частей растений, отмирающих после перезимовки, в результате затенения листьев в период от позднего трубкования до полной спелости и др. Кроме того, они могут быть индикатором избыточной загрязненности агроценозов (полевых, тепличных) действующими веществами средств защиты растений, накопления в агроценозе токсичных грибов (в основном пенициллов) — в подобных случаях муконы встречаются лишь в очень небольших количествах и зачастую их

Таблица 1. Доля образцов зерна озимой пшеницы с колонизацией возбудителями плесени (Ростовская обл., 2015–2021 гг.)

Микроорганизм	Тип инфекции	Доля образцов зерна с микроорганизмом, %	
		Средняя для 7-ми лет	Диапазон показателя по годам
Возбудители плесени токсикологически нейтральные			
<i>Mucor</i> spp.	Внутренняя	73.2	56–100
	Наружная	66.8	35–100
Возбудители плесени, микотоксиканты			
<i>Penicillium</i> spp.	Внутренняя	21.0	3–52
	Наружная	20.2	6–44
<i>Aspergillus niger</i>	Внутренняя	14.1	3–30
	Наружная	15.0	3–41
<i>Aspergillus glaucus</i>	Внутренняя	9.5	2–26
	Наружная	15.8	6–48
<i>Aspergillus flavus</i>	Внутренняя	5.0	3–21
	Наружная	5.6	2–26
<i>Rhizopus nigricans</i>	Внутренняя	8.0	0–23
	Наружная	2.3	0–7
<i>Cladosporium herbarum</i>	Внутренняя	1.3	0–7
	Наружная	0.7	0–5

трудно обнаружить [8, 9]. Виды муконовых грибов относятся к физиологическим группам некротрофов и полусапротрофных микофилов в зависимости от типа паразитизма, изменчивости на разных хозяевах, активности их антибиотических веществ и др. Штаммы муконовых грибов иногда проявляют сверхпаразитические свойства против видов фитопатогенов из родов *Botrytis*, *Verticillium*, *Fusarium*, *Helminthosporium* и др. [9]. В то же время даже при активном заселении озимой пшеницы мукомами их микофильная активность не помешала 6–9-кратному возрастанию уровня колонизации зерна опасным патогеном *F. moniliforme* за 7 лет [9, 10].

На втором месте по встречаемости образцов зерна с колонизацией возбудителями плесени оказались грибы из рода *Penicillium*. В среднем за 7 лет доля образцов с внутренней инфекцией пенициллов составила 21.0%, с наружной – 20.2% при размахе вариации по годам соответственно 3–52% и 6–44%. Это значительно меньше, чем у муконовых грибов. Штаммы многих видов пенициллов являются продуцентами охратоксинов, патулина и других микотоксинов, опасных для потребителей продуктов из пищевого зерна и фуража, колонизированных токсиногенными штаммами пенициллов. В условиях сильной засухи в почве и на нижних частях растений нередко отмечают накопление гриба *Penicillium purpureogenum*. Его отдельные штаммы являются продуцентом рубротоксинов [11]. В проведенных нами исследованиях в период осенней засухи на полях хозяйства Саратовской обл. наблюдали накопление пенициллов

этого вида. В то же время через 2 мес., при повышении влагообеспеченности за счет предзимних осадков произошло значительное снижение его относительной встречаемости на фоне резкого увеличения количества других видов грибов, что свидетельствовало об относительной ценотической нейтральности *P. purpureogenum* (табл. 2).

На поле 16А от августа к ноябрю было отмечено двукратное снижение встречаемости данного пеницилла, на полях 17А и 27 – соответственно с 37 и 52% до нулевых показателей. В этот же период происходило значительное увеличение встречаемости муконовых грибов, *Fusarium solani*, *F. semitectum*, неспорулирующих грибов *Mycelia sterilia* при возрастании общей плотности грибных колоний в 1.1–2.1 раза.

Анаморфные представители рода *Aspergillus* имеют широкое распространение и встречаются на семенах, вегетирующих растениях, плодах многих видов травянистых и древесных растений культурной и дикой флоры [12]. В наших исследованиях микробиоты зерна озимой пшеницы аспергиллы уступали мукомам и пенициллам по встречаемости зараженных ими образцов зерна. Среди аспергиллов зерновой микофлоры Ростовской обл. доминирующим оказался *Aspergillus niger*, который в среднем за 7 лет изучения был выявлен в виде внутренней инфекции в 14.1% образцов зерна, в виде наружной – в 15%. Среднегодовые показатели встречаемости колонизированных *A. niger* образцов варьировали в этот период для внутренней инфекции от 3 до 30%, для

Таблица 2. Изменение встречаемости в почве гриба *Penicillium purpureogenum* при переходе от острой засухи в августе к высокой влагообеспеченности в ноябре в агроценозах запада Саратовской обл. (2015 г.)

Микроорганизм	Встречаемость, %					
	Поле 16А (164 га)		Поле 17А (160 га)		Поле 27 (180 га)	
	11.08	11.11	11.08	11.11	11.08	11.11
<i>Penicillium purpureogenum</i>	20	10	37	0	52	0
<i>Mucor</i> spp.	2	9	1	17	1	16
<i>Fusarium solani</i>	73	65	70	80	40	60
<i>F. avenaceum</i>	8	0	0	0	0	0
<i>F. semitectum</i>	0	54	0	50	0	0
<i>F. oxysporum</i>	0	0	0	0	4	0
<i>F. moniliforme</i>	0	0	0	0	7	0
<i>Mycelia sterilia</i>	11	17	10	20	13	50
<i>Geotrichum candidum</i>	0	15	0	0	0	0
Общая плотность грибных колоний	114	170	118	167	117	126

наружной – от 3 до 41%. Сходные результаты были получены испанско-итальянским коллективом авторов при изучении микробиоты муки, где также доминировали пенициллы и аспергиллы. Авторы исследования пришли к выводу, что альтернатива, кладоспориум, фузариум и гелиминтоспориум встречаются чаще в полевых условиях, в то время как *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* и близкий к аспергиллам *Eurotium* являются более распространенными загрязнителями на этапе послеуборочной обработки [13], наши результаты относительно альтернативных грибов на зерне это мнение не подтвердили [29]. Аспергиллы отличает высокая жизнеспособность, они способны выживать в условиях очагов промышленных загрязнений, их значительное присутствие выявлено в почвах фоновых зон Мончегорского и Череповецкого промышленных районов [14]. По особенностям взаимодействия с патогенными грибами *A. niger* отнесен к полусапротрофным микофилам, отдельные штаммы которого проявляют микофильные свойства к патогенным грибам из родов *Botrytis*, *Verticillium*, *Helminthosporium*, *Fusarium* [9]. Судя по литературным данным, некоторые штаммы *A. niger* способны продуцировать охратоксин А [15, 16].

Доля образцов зерна озимой пшеницы, зараженных грибом *Aspergillus glaucus*, составляла в среднем за 2015–2021 гг. для внутренней инфекции 9.5%, наружной – 15.8% с размахом вариации по годам 2–26 и 6–48% соответственно (табл. 1). Отдельные штаммы *A. glaucus* продуцируют охратоксин А [17]. Последствиями его употребления с инфицированными кормами являются снижение животными потребления корма, темпов роста, иммунитета, почечная недостаточность, повышенная смертность [18].

Продуцентом одного из наиболее опасных микотоксинов – афлотоксина В₁ является *Aspergillus*

flavus. Токсикант выделен нами из зерна озимой пшеницы в виде внутренней инфекции из 5.0% образцов зерна, в виде наружной – из 5.6%. Размах вариации среднегодовых показателей доли зараженных образцов находился за период изучения для внутренней инфекции на уровне 3–21, для наружной – 2–26%.

На единичных полях отмечено значительное присутствие аспергилловых грибов в почве. Есть мнение, что они являются активными почвенными супрессорами [19], однако нашими полевыми исследованиями на нуте это не подтвердилось – на высеянных в почву семенах нута с высоким уровнем колонизации аспергиллами их количество на фоне супрессивной почвенной микробиоты полевых агроценозов в течение нескольких недель практически обнулялось, сопровождаясь накоплением патогенных для нута грибов из рода *Fusarium* [5]. В то же время отдельные примеры проявления микофильных свойств, подавления аспергиллами других микромикроорганизмов в условиях лаборатории ряду авторов удалось отметить [19]. Накопление аспергиллов в ризосферном и ризоплановом комплексах, в почве периодически наблюдают, поэтому причины накопления аспергиллов (микотоксикантов) в агроценозах необходимо изучать.

Еще одним из выделенных нами на пшенице представителей зерновой инфекции порядка *Mucorales* был вид *Rhizopus nigricans*. В среднем за годы изучения он выделялся в виде внутренней инфекции из 8% образцов зерна, в виде наружной – из 2.3%. Среднегодовые показатели встречаемости колонизированных *R. nigricans* образцов варьировали в этот период для внутренней инфекции от 0 до 23, для наружной – от 0 до 7%. Гриб быстрорастущий и при высокой влажности воздуха способен нанести существенный вред

в зернохранилищах. Наиболее активно он колонизирует семена зернобобовых культур [5], встречается в меньших количествах на зерновках ячменя [20], пшеницы, на растениях пшеницы и в ризосфере [21]. Выделяли его также с земляных орехов [22], из соргового солода [23], со многих фруктов и овощей после уборки [24]. *Rhizopus nigricans* может продуцировать микотоксины ризонины А и В [22, 23, 25, 26], хотя есть утверждения, что синтез данного микотоксина больше связан с бактериями, принадлежащими к роду *Burkholderia* [22].

В незначительном количестве образцов зерна был обнаружен гриб *Cladosporium herbarum*. За 7 лет изучения он был выявлен в виде внутренней инфекции из 1.3% образцов зерна, в виде наружной — из 0.7%. Среднегодовые показатели встречаемости колонизированных *C. herbarum* образцов зерна варьировали в период 2015–2021 гг. для внутренней инфекции от 0 до 7, для наружной — от 0 до 5%. Виды кладоспориума могут продуцировать микотоксичные соединения кладоспорин, изокладоспорин, эмодин, эпикладоспоровую кислоту, фагикладоспориновую кислоту, алкалоды [27]. Грибы данного рода выделяли в ряде исследований отечественные и зарубежные исследователи с зерна ячменя [28], пшеницы [29–33], кукурузы [34]. Встречаемость кладоспориевых грибов в почвах Иркутской обл. под зерновыми в 2004 г. в среднем составила 12% [35]. Виды данного рода отнесены к полусапротрофным микофилам, штаммы *C. herbarum* проявляют микофильные свойства по отношению к патогенным грибам из родов *Helminthosporium*, *Sphaceloma amptlinum*, реже — *Verticillium* [9].

Годы изучения семенной инфекции были разнообразными по уровню увлажнения во время вегетационного сезона и уборки урожая. В 2016

и 2017 гг. отмечено избыточное увлажнение, 2015 г. был острозасушливым. При этом разнообразии внешних условий средний показатель доли образцов зерна, инфицированных видами возбудителей плесени, за 7-летний период (исключая мукоровые грибы) не превышал 21% (рис. 1).

По доле инфицированных образцов отмечено доминирование видов *Penicillium* и 2-х видов аспергиллов — *A. niger* и *A. glaucus*. Образцов с внутренней инфекцией в группе *Penicillium* spp., а также среди видов *R. nigricans*, *Cl. herbarum* было больше, чем с наружной, у всех видов выделенных аспергиллов преобладала наружная инфекция.

Важнейшим показателем состояния инфицированности семян микромицетами является доля инфицированных зерен в образце. Она является индикатором опасности для использования соответствующих партий зерна в качестве семенного, а также в качестве пищевого или фуражного. Ограничения на использование зерна в качестве семенного накладывает уровень колонизации зерновок опасными патогенами, которые могут вызвать депрессию или гибель проростков, растений. Об осторожности в использовании зерна для пищевых или фуражных целей предупреждает зараженность грибами-микотоксинообразующими, особенно продуцентами микотоксинов с низкими ПДК: Т-2 токсина, охратоксина А, афлотоксина В₁ (*F. sporotrichiella*, виды *Penicillium*, *Aspergillus flavus*). Даже в случае незначительной колонизации зерна штаммами-продуцентами перечисленных микотоксинов велика опасность его использования без токсикологической оценки. Об этом же может свидетельствовать высокий уровень колонизации зерна продуцентами менее “концентрированных”

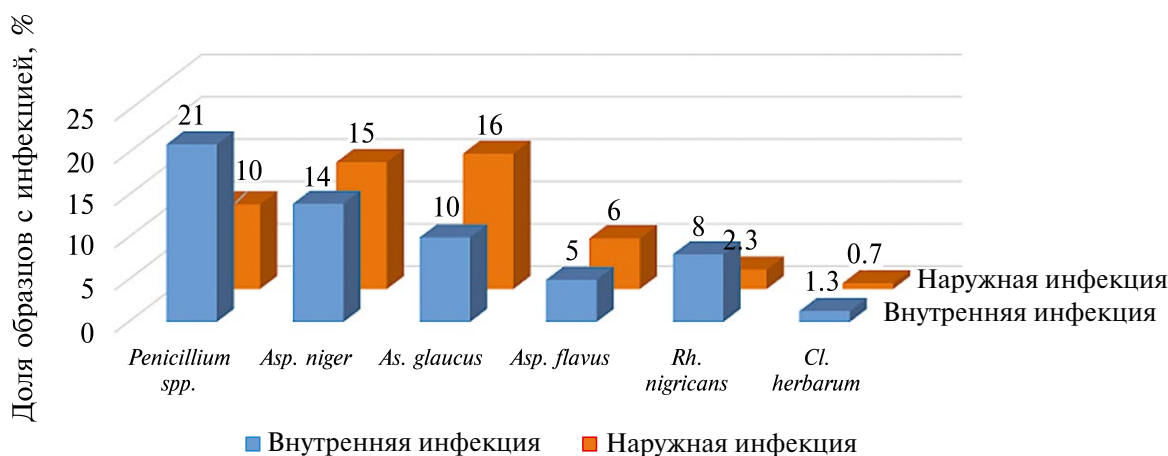


Рис. 1. Доля образцов зерна пшеницы, колонизированных грибными возбудителями плесени (Ростовская обл., 2015–2022 гг.).

микотоксинов, например, фумонизинов, если зараженность *F. moniliforme* достигает 70–90%.

Проведенный анализ уровня наружного и внутреннего инфицирования зерна озимой пшеницы в Ростовской обл. показал, что среди продуцентов плесени по данным показателям доминировали токсикологически нейтральные грибы из рода *Mucor* порядка Mucorales (табл. 3).

Показатели средних долей зерен с наружной и внутренней инфекцией *Mucor* spp. за период 2015–2021 гг. составляли соответственно 20.3 и 18.7% образцов. Диапазон средних показателей внутренней инфекции за 7-летний период находился в пределах 8.6–29.7, наружной – 11.5–31.1%.

Средние за 7 лет максимальные показатели колонизации муковоровыми грибами находились для наружной инфекции на уровне 56.0, для внутренней – 42.3% с размахом вариации соответственно 36–80 и 25–70%. При средних показателях количества инфекции ее вполне достаточно во влажных условиях хранения для развития муковоральной плесени, на максимально инфицированных образцах опасность развития плесени многократно возрастала.

Заметно уступал по уровню наружного и внутреннего инфицирования зерна озимой пшеницы в Ростовской обл. еще один продуцент плесени порядка Mucorales – *Rhizopus nigricans*,

Таблица 3. Показатели уровня колонизации зерна озимой пшеницы патогенными и сапротрофными грибами (2015–2021 гг.)

Микроорганизм	Тип инфекции	Показатель инфицирования	Доля зараженных зерен, %	
			Средняя для 7-ми лет	Диапазон величин по годам
Возбудители плесени токсикологически нейтральные				
<i>Mucor</i> spp.	Внутренняя	Максимальный	42.3	25–70
		Средний	18.7	8.6–29.7
	Наружная	Максимальный	56.0	36–80
		Средний	20.3	11.5–31.1
Возбудители плесени, микотоксиканты				
<i>Rhizopus nigricans</i>	Внутренняя	Максимальный	9.4	0.0–26.0
		Средний	1.1	0.0–3.1
	Наружная	Максимальный	8.3	0.0–18.0
		Средний	0.7	0.4–2.9
<i>Penicillium</i> spp.	Внутренняя	Максимальный	17.7	11–35
		Средний	1.7	0.7–3.5
	Наружная	Максимальный	27.8	3–50
		Средний	2.6	0.2–7.4
<i>Aspergillus niger</i>	Внутренняя	Максимальный	10.7	0–30
		Средний	0.9	0–2.4
	Наружная	Максимальный	13.4	0–52
		Средний	1.1	0–3.7
<i>Asp. glaucus</i>	Внутренняя	Максимальный	7.0	3–15
		Средний	0.6	0.1–1.8
	Наружная	Максимальный	24.3	9–59
		Средний	1.9	0.3–5.7
<i>Asp. flavus</i>	Внутренняя	Максимальный	3.6	0–9
		Средний	0.2	0–0.9
	Наружная	Максимальный	6.6	0–32
		Средний	0.4	0–2.4
<i>Cladosporium herbarum</i>	Внутренняя	Максимальный	1.8	0.0–10.0
		Средний	0.1	0–0.4
	Наружная	Максимальный	0.4	0.0–3.0
		Средний	0.01	0.0–0.1

представитель группы возбудителей плесени зерна, микотоксикантов.

Показатели средней доли зерен с наружной и внутренней инфекцией *Rhizopus nigricans* за период 2015–2021 гг. составляли соответственно 0.76 и 1.1%. Диапазон средних величин внутренней инфекции за 7-летний период находился в пределах 0.0–3.1, наружной – 0.4–2.9%. Средние за 7 лет максимальные показатели колонизации ризопусом находились для наружной инфекции на уровне 8.3, для внутренней – 9.4% с размахом вариации соответственно 0.0–18.0 и 0.0–26.0%. Реальную опасность для развития ризопусной плесени при высокой влажности хранения представляла незначительная доля партий семян с максимальным уровнем инфицирования.

Представители пеницилловых грибов, также относящихся к группе возбудителей плесени зерна, микотоксикантов, превосходили ризопус по уровню присутствия на зерне пшеницы как в виде внутренней, так и в виде наружной инфекции.

Показатели средних долей зерен с наружной и внутренней инфекцией *Penicillium* spp. за период 2015–2021 гг. составляли соответственно 2.6 и 1.7%. Диапазон средних показателей внутренней инфекции за 7-летний период находился в пределах 0.7–3.5, наружной – 0.2–7.4%. Средние за 7 лет максимальные показатели колонизации пеницилловыми грибами находились для наружной инфекции на уровне 27.8, для внутренней – 17.7% с размахом вариации соответственно 3–50 и 11–35%. При оптимальных условиях развития пенициллезной плесени, ухудшении качества зерна и заражении его микотоксинами, в том числе охратоксином А, в зоне риска находилась довольно значительная доля партий семян с максимальным уровнем инфицирования.

Заметное место среди возбудителей плесени зерна, микотоксикантов занимают представители аспергиллов (семейство Aspergillaceae), присутствующих на зерне пшеницы как в виде внутренней, так и наружной инфекции.

Наибольшее распространение на зерне пшеницы в Ростовской обл. среди аспергилловых грибов в 2015–2021 гг. имел вид *Aspergillus niger*. Показатели средних долей зерен с наружной и внутренней инфекцией за этот период составляли соответственно 1.1 и 0.9%. Диапазон средних показателей внутренней инфекции за 7-летний период находился на уровне 0.0–2.4, наружной – 0.0–3.7%. Средние за 7 лет максимальные показатели колонизации *A. niger* находились для наружной инфекции на уровне 13.4, для внутренней – 10.7% с размахом вариации соответственно 0–52 и 0–30%. Отмечено некоторое доминирование наружной инфекции над внутренней. При оптимальных условиях

для развития данного вида аспергилла, ухудшении качества зерна и заражении его микотоксинами, в том числе охратоксином А [15, 16], в зоне риска находилась доля партий семян с максимальным уровнем инфицирования.

Несколько уступал ему по встречаемости *Aspergillus glaucus*. Показатели средних долей зерен с наружной и внутренней инфекцией за этот период составляли соответственно 1.9 и 0.6%. Диапазон средних показателей внутренней инфекции за 7 лет находился в пределах 0.1–1.8, наружной – 0.3–5.7%. Средние за 7 лет максимальные показатели колонизации *A. glaucus* были для наружной инфекции на уровне 24.3, для внутренней – 7.0% в диапазоне соответственно 9–59 и 3–15%. Наблюдало доминирование наружной инфекции над внутренней. При оптимальных условиях для развития данного вида аспергилла, ухудшении качества зерна и заражении его микотоксинами, в том числе охратоксином А [17], в зоне риска находились партии семян с высоким уровнем инфицирования.

Еще меньше была встречаемость зерновок, колонизированных грибом *Aspergillus flavus*. Показатели средней доли зерен с данной наружной и внутренней инфекцией за этот период составляли соответственно 0.4 и 0.2%. Диапазон средних показателей внутренней инфекции за 7 лет достигал 0.3–5.7%. Средние за 7 лет максимальные показатели колонизации *A. flavus* находились для наружной инфекции на уровне 6.6, для внутренней – 3.6% в диапазоне соответственно 0–32 и 0–9%. Наблюдало доминирование наружной инфекции над внутренней. При высоком уровне инфицированности и оптимальных условиях для развития *A. flavus*, ухудшении качества зерна и заражении его микотоксинами, в том числе афлатоксином В₁ [7, 11], в зоне риска находилась незначительная доля партий семян с высоким уровнем инфицирования.

Невысокий уровень колонизации зерна отмечен для возбудителя кладоспориозной плесени гриба *Cladosporium herbarum* (семейство Cladosporiaceae). Показатели средней доли зерен с наружной и внутренней инфекцией за этот период составляли соответственно 0.01 и 0.1%. Диапазон средних показателей внутренней инфекции за 7 лет составлял 0.0–0.4, наружной – 0.0–0.1%. Средние за 7 лет максимальные показатели колонизации *C. herbarum* находились для наружной инфекции на уровне 0.4, для внутренней – 1.8% в диапазоне соответственно 0.0–3.0 и 0.0–10%. Наблюдало доминирование внутренней инфекции над наружной. При высоком уровне инфицированности и оптимальных условиях для развития *C. herbarum*, ухудшении качества зерна и заражении его микотоксинами, в том числе кладоспорином, изокладоспорином, эмодином, эпикладоспоровой кислотой, фагикладоспориевой

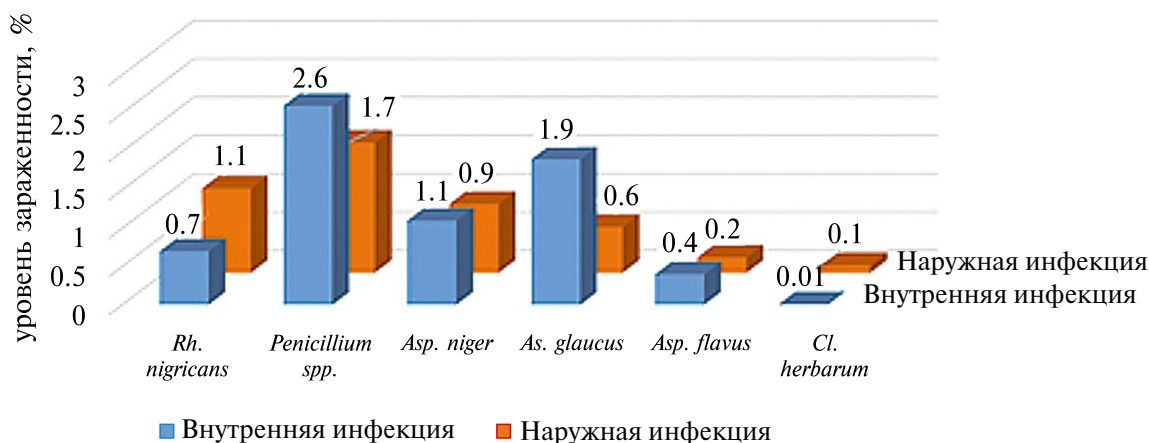


Рис. 2. Уровень зараженности зерна озимой пшеницы возбудителями плесени (Ростовская обл., 2015–2022 гг.).

кислотой, алкалодами [27] в зоне риска находилась незначительная часть партий семян с высоким уровнем инфицирования.

Показано, что наибольший уровень наружной инфекции приходился на группу видов *Penicillium*, *A. glaucus* и *A. niger*, наибольший уровень внутренней инфекции – на группу *Penicillium*, *Rhizopus nigricans* и *A. niger* (рис. 2).

Доминирование наружной инфекции над внутренней наблюдали у пенициллов и аспергиллов, доминирование внутренней над наружной – у ризопуса и кладоспориума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, знание видового состава, закономерностей развития и взаимоотношений отдельных представителей семенной микофлоры (патогенов и токсикантов) позволяет регулировать режимы хранения, продлевать сроки сохранения высокого качества посевного материала, пищевого зерна и фуража. Возбудители плесени являются продуцентами опаснейших микотоксинов: охратоксина А (виды *Penicillium*, *Aspergillus niger*, *A. glaucus*), афлотоксина В₁ (*A. flavus*), ризионинов (*Rhizopus* spp.) и др. Высокий уровень встречаемости на зерне образцов озимой пшеницы из Ростовской обл. за период 2014–2021 гг. проявили плесневые грибы *Mucor* spp., *Aspergillus niger*, *Aspergillus glaucus*, *Aspergillus flavus*, виды рода *Penicillium*. Относительно низкую встречаемость наблюдали у видов *Rhizopus nigricans*, *Cladosporium herbarum*. Доминирующими микромицетами были представители рода *Mucor*, уступали им по встречаемости грибы из родов *Penicillium*, *Aspergillus* (*A. niger*, *A. glaucus*), еще более низкие показатели отмечены для *A. flavus*, *R. nigricans*, *C. herbarum*.

В регионах Юга России при сильной засухе в почве и на нижних частях растений нередко отмечают накопление гриба *Penicillium purpurogenum*, на некоторое время он может стать доминирующим. При восстановлении уровня влагообеспеченности наблюдали снижение встречаемости *P. purpurogenum*, нередко до нулевых показателей и увеличение встречаемости мукоровых грибов, *Fusarium solani*, *F. semitectum*, неспорулирующих грибов *Mycelia sterilia* и др., заметное возрастание общей плотности грибных колоний.

При выявленной структуре зернового комплекса плесневых грибов на пшенице в Ростовской обл. велика вероятность загрязнения зерна микотоксинами нефузариевой природы: охратоксином А (виды пенициллов, *A. glaucus*, *A. niger*), афлотоксином В₁ (*A. flavus*), со значительно меньшей вероятностью из-за низкой встречаемости потенциальных продуцентов – ризионинами А и В (*Rhizopus nigricans*), кладоспорином, изокладоспорином, эмодином, эпикладоспороваоой кислотой, фагикладоспориевой кислотой, алкалодами (*Cladosporium herbarum*).

Наибольший уровень наружной инфекции зерна определяла колонизация зерновок грибами из группы *Penicillium*, а также – *A. glaucus* и *A. niger*, наибольший уровень внутренней инфекции – группой *Penicillium*, *Rhizopus nigricans*, *A. niger*. Доминирование наружной инфекции над внутренней наблюдали при колонизации пенициллами и аспергиллами, доминирование внутренней над наружной – ризопусом и кладоспориумом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будынков Н.И., Михалева С.Н., Проскурин А.В. Микробиологическая деградация агроценозов и возможность ее предотвращения. Растительные остат-

- ки // Эволюция и деградация почвенного покрова. Сб. науч. ст. по мат-лам V Международ. научн. конф. 19–22 сентября 2017 г. Ставрополь. ГАУ. Ставрополь, 2017. С. 10–13.
2. Рудаков В.О., Рудаков О.Л. Природа почвенных фитотоксикозов и проблема защиты растений // АГРО XXI. 2009. № 1–3. С. 14–17.
 3. Наумова Н.А. Анализ семян на грибную и бактериальную инфекцию. М., 1951. 140 с.
 4. Будынков Н.И., Михалева С.Н., Проскурин А.В. Динамика факультативных паразитов грибной природы в полевых агроценозах с минимальной обработкой почвы в западной части Волгоградской области // Агрохимия. 2021. № 1. С. 64–71.
 5. Будынков Н.И., Михалева С.Н. Болезни нута на юге европейской территории России. Семенная инфекция // Достиж. науки и техн. АПК. 2018. Т. 32. № 7. С. 31–35
 6. Кузьмичев А.А., Монастырская Э.И., Соколова Н.К., Фиссюра Н.И. Рекомендации по снижению вредности фузариоза колоса озимой пшеницы. Краснодар: ВНИИБЗР, 1993. 16 с.
 7. Сатин Е. Рост плесеней и формирование микотоксинов // Микотоксины и микозы / Под ред. Д. Диаза. М.: Печатный город, 2006. С. 71–81.
 8. Рудаков О.Л., Олейник К.Н., Рудаков В.О. Пособие по фитопатологии для закрытого грунта. М.: Агроконсалт, 2001. 142 с.
 9. Рудаков О.Л. Микофильные грибы, их биология и практическое значение. М.: Наука, 1981. 160 с.
 10. Будынков Н.И., Михалева С.Н. Прогрессирующее накопление опасных фузариев на зерне озимой пшеницы в хозяйствах Юга России (2014–2020 гг.) // Агрохимия. 2022. № 1. С. 75–87. <https://doi.org/10.31857/S0002188122010057>
 11. Munkvold G.P., Arias S., Tasch I., Gruber-Dorninger C. Mycotoxins in corn: Occurrence, impacts, and management chapter 9 // Corn. 2019. AACCI. Published by Elsevier Inc. in cooperation with AACCI International. P. 235–287. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00009-7>
 12. Perera R.H., Hyde K.D., Maharachchikumbura S.S.N., Jones E.B., McKenzie E.H., Stadler M., Lee H., Samarakoon M.C., Ekanayaka A.H., Camporesi E., Liu J.K., Liu Z.Y. Fungi on wild seeds and fruits // Mycosphere. 2020. V. 11(1). P. 2108–2480. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/11/1/14>
 13. Minutillo S.A., Ruano-Rosa D., Abdelfattah A., Schena L., Malacrino A. The Fungal microbiome of wheat flour includes potential mycotoxin producers // Foods. 2022. V. 11. № 676. P. 1–9. <https://doi.org/10.3390/foods11050676>
 14. Мирошниченко И.И., Зачиняева А.В., Соломенникова И.И., Зачиняев Я.В. Негативные последствия антропогенных изменений комплексов почвенных микроскопических грибов. Мат-лы 5-го Всероссий. конгр. по мед. микологии // Усп. мед. микол. М.: Нац. акад. микологии, 2007. С. 60–63.
 15. Taniwaki M.H., Pitt J.I., Magan N. Aspergillus species and mycotoxins: occurrence and importance in major food commodities // Current Opinion in Food Sci. V. 23. October 2018. P. 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.05.008>
 16. Soares C., Calado T., Venençano A. Mycotoxin production by *Aspergillus niger* aggregate strains isolated from harvested maize in three Portuguese regions // Rev. Iberoam Micol. 2013. V. 30(1)/ P. 9–13.
 17. Jha S.N. Rapid detection of food adulterants and contaminants. Theory and practice // Acad. Press. 2016. 266 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-09801-5>
 18. Девевова Д., Мурти Т.Н.К. Влияние микотоксинов на здоровье птицы и практическое решение проблемы // Микотоксины и микозы / Под ред. Д. Диаза. М.: Печатный город, 2006. С. 179–212.
 19. Котова В.В. Корневые гнили гороха и вики и меры защиты. СПб.: ВИЗР, 2011. 144 с.
 20. Roháčik I.T., Hudec K. Fungal infection of malt barley kernels in Slovak Republic // Plant Protect. Sci. 2007. V. 43. № 3. P. 86–93.
 21. Minati M.H., Mohammed-Ameen M.K. Fungal diversity of winter wheat parts, seed and field soil in Iraq, Basra province // 2nd Inter. Sci. Conf. of Al-Ayen University (ISCAU-2020). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 928. № 062004. P. 1–18. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/6/062004>
 22. Partida-Martinez L.P., Flores de Looss C., Ishida K., Ishida M., Roth M., Buder K., Hertweck C. Rhizonin, the first mycotoxin isolated from the zygomycota, is not a fungal metabolite but is produced by bacterial endosymbionts // Appl. Environ. Microbiol. 2007. V. 73(3). P. 793–797. <https://doi.org/10.1128/AEM.01784-06>
 23. Rabie C.J., Lübben A., Schipper M.A.A., van Heerden F.R., Fincham J.E. Toxicogenicity of *Rhizopus* species // Inter. J. Food Microbiol. 1985. V. 1. Iss. 5. P. 263–270.
 24. Hernández-Lauzardo A.N., Bautista-Baños S., Velázquezdel Valle M.G., Trejo-Espino J.L. Identification of *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill., causal agent of rhizopus rot disease of fruits and vegetables // Revista Mexicana de FITOPATOLOGIA. 2006. V. 24. № 1. P. 65–69.
 25. Wilson T., Rabie C.J., Fincham J.E., Steyn P.S., Schipper M.A. Toxicity of rhizonin A, isolated from *Rhizopus microsporus*, in laboratory animals // Food Chem. Toxicol. 1984. V. 22(4). P. 275–281. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(84\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0278-6915(84)90006-1)

26. Steyn P.S., Tuinman A.A., van Heerden F.R., van Rooyen P.H., Wessels P.L., Rabie C.J. The isolation, structure, and absolute configuration of the mycotoxin, rhizonin A, a novel cyclic heptapeptide containing N-methyl-3-(3-furyl)alanine, produced by *Rhizopus microspores* // J. Chem. Soc. Chem. Commun. 1983. P. 47–49.
27. Alwatban M.A., Hadi S., Moslem M.A., Alwatban M.A., Hadi S., Moslem M.A. Mycotoxin production in *Cladosporium* species influenced by temperature regimes // J. Pure Appl. Microbiol. 2014. V. 8(5). P. 4061–4069.
28. Волкова Т.Н., Селина И.В., Созинова М.С. Биполярис и эпикокк. Изменения в микобиоте зерна ячменя за 2001–2017 гг. // Пиво и напитки. 2018. № 3, С. 62–67.
29. Будынков Н.И., Михалева С.Н. Мониторинг альтернариевых грибов на зерне озимой пшеницы в хозяйствах Юга России (2014–2020 гг.) // Агрохимия. 2022. № 2. С. 92–99. <https://doi.org/10.31857/S0002188122020041>
30. Шпанев А.М., Смух В.В. Влияние азотного питания на фитосанитарное состояние посевов озимой пшеницы в Северо-Западном регионе РФ // Агрохимия. 2019. № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.1134/S0002188119010101>
31. Golosna L. Mycobiota of wheat seeds with signs of “Black Point” under conditions of forest-steppe and forest zones of Ukraine // Chem. Proc. 2022. V. 10. № 93. P. 1–5. <https://doi.org/10.3390/IOACAG2022-12236>
32. Felšöciová S., Kowalczewski P.L., Krajčovič T., Dráb Š., Kačániová M. Effect of long-term storage on mycobiota of barley grain and malt // Plants. 2021. V. 10. 1655. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants10081655>
33. Roháčik T., Hudec K. Fungal infection of malt barley kernels in Slovak Republic // Plant Protect. Sci. 2007. V. 43. № 3. P. 86–93.
34. Minutillo S.A., Ruano-Rosa D., Abdelfattah A., Scheina L., Malacrinò A. The Fungal microbiome of wheat flour includes potential mycotoxin producers // Foods. 2022. V. 11. 676. P. 1–9. <https://doi.org/10.3390/foods11050676>
35. Балбашевская Н.А. Биоэкологические особенности гиперпаразитических грибов и их значение в ограничении численности корневых гнилей зерновых культур: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2005. 20 с.

Fungal Pathogens of Mold of Winter Wheat Grains in Rostov Region

N. I. Budynkov^{a, #}, S. N. Mikhaleva^a, L. N. Ulyanenko^a, A. P. Glinushkin^a

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

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

Long-term monitoring of the colonization of winter wheat grain by fungal mold pathogens that negatively affect the quality of grain during storage, reducing the quality of seed material, food grains and forage, showed that a high level of occurrence on the grain of Rostov winter wheat samples for the period 2014–2021 was manifested by mold fungi *Mucor* spp., *Aspergillus niger*, *Aspergillus glaucus*, *Aspergillus flavus*, species of the genus *Penicillium*. Relatively low occurrence was observed in *Rhizopus nigricans* and *Cladosporium herbarum* species. Mold pathogens are producers of the most dangerous mycotoxins: ochratoxin A (species of *Penicillium*, *Aspergillus niger*, *A. glaucus*), aflatoxin B1 (*A. flavus*), rhizonins (*Rhizopus* spp.), etc. In the regions of Southern Russia, with severe drought in the soil and on the lower parts of plants, the accumulation of the fungus *Penicillium purpureogenum* is often noted, for some time it could become dominant. When restoring the level of moisture supply, a decrease in the occurrence of *P. purpureogenum* was observed, often to zero, and an increase in the occurrence of mucor fungi (*Fusarium solani*, *F. semitectum*), non-circulating *Mycelia sterilia* fungi, etc., a noticeable increase in the total density of fungal colonies. The highest level of external infection of grain was due to colonization of grain by fungi from the *Penicillium* group, as well as *A. glaucus* and *A. niger*, the highest level of internal infection was caused by the *Penicillium* group, *Rhizopus nigricans*, *A. niger*. The dominance of external infection over internal infection was observed during colonization by penicilli and aspergillus, the dominance of internal over external infection by rhizopus and cladosporium.

Keywords: winter wheat, occurrence, colonization, mold pathogens, pathogens, mycotoxins, crop rotation, precursor crop, agrocenosis.

УДК 631.81:631.415.1:631.445.24:631.559:633.853.494

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ И МЕЛИОРАНТОВ НА ВЕЛИЧИНУ ПОЧВЕННОЙ КИСЛОТНОСТИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ, УРОЖАЙНОСТЬ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗЕЛЕННОЙ МАССЫ ЯРОВОГО РАПСА (ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНО-ВЕГЕТАЦИОННОГО ОПЫТА)

© 2024 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, К. М. Нельсон²,
А. В. Лаврищев², П. С. Манаков²

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург–Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия
²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

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

В контролируемых условиях лабораторно-вегетационного опыта, заложенного на очень сильно-кислой дерново-подзолистой супесчаной почве, проведено сравнительное изучение удобрительной ценности и мелиоративных свойств комплексных минеральных удобрений (азофоски и АРАВИВА) и мелиорантов карбонатной природы: конверсионного мела (ККС), отсева щебня (ОЩ), доломитовой (ДМ) и доломитизированной (ДИМ) известняковой муки, а также силикатной природы – доменного шлака (ДШ) и гидроксидной природы – $Mg(OH)_2$. Культура – яровой рапс сорта Лексус. Показано, что мелиоративный эффект, полученный в результате использования ДШ и мелиорантов карбонатной природы мало отличались друг от друга и спустя 45 сут возделывания растений были незначительны. Гидроксид магния мелиоративного эффекта не оказал. Приведены урожайные данные вегетативной массы рапса после уборки растений. Показано, что химический состав мелиорантов оказывал существенное влияние на формирование элементного состава растений.

Ключевые слова: удобрения, мелиоранты разной природы, почвенная кислотность, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, урожайность, химический состав, зеленая масса, яровой рапс, лабораторно-вегетационный опыт.

DOI: 10.31857/S0002188124050055, EDN: CZGYTJ

ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории мелиорации почв АФИ (г. Санкт-Петербург) с 1998 г. проводят опыты, направленные на установление влияния удобрений, мелиорантов и отходов промышленности на формирование химического состава ярового рапса [1–8].

Установлено, что регулирование пищевой ценности рапса с помощью средств химизации является перспективным агрохимическим приемом. Яровой рапс относится к экологически пластичным видам растений, на формирование которого оказывает влияние химическая обстановка в почве [5].

Известкование оказывает комплексное воздействие на почвы: изменяется реакция среды, возрастает емкость катионного обмена, уменьшается подвижность одних и увеличивается подвижность других элементов. Находящиеся в составе удобрений

и мелиорантов примеси макро- и микроэлементов, способны оказывать на формирование элементного состава рапса существенное влияние не только вследствие прямого поглощения, но и в результате сложных процессов адсорбции, комплексообразования, ионного обмена, соосаждения между отдельными элементами, в результате чего доступность их для растений будет меняться [5, 6].

Цель работы – в контролируемых условиях лабораторно-вегетационного опыта установить влияние мелиорантов различной химической природы на урожайность и химический состав растений ярового рапса.

В задачи исследования входило:

– выявить мелиоративные свойства известковых материалов карбонатной, гидроксидной и силикатной природы, используемых для

выращивания растений на очень сильноокислой дерново-подзолистой супесчаной почве;

– получить сравнительные данные об удобрительной ценности использованных в опыте комплексных (азофоски и АРАВИВА) минеральных удобрений;

– установить особенности формирования элементного состава зеленой массы ярового рапса сорта Лексус при использовании различных видов комплексных удобрений и мелиорантов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 11-вариантом вегетационном опыте, заложенном в климатостате в сосудах емкостью 1 кг почвы.

В опыте использовали очень сильноокислую дерново-подзолистую супесчаную почву

со следующими физико-химическими показателями: pH_{KCl} 3.75, H_T – 11.8 ммоль(экв)/100 г почвы, содержание гумуса – 3.02%, частиц <0.01 мм – 18.6 мм. Валовой химический и гранулометрический составы почвы приведены в табл. 1, 2. Схема опыта представлена в табл. 3.

Повторность опыта четырехкратная. Для проведения эксперимента использовали мелиоранты карбонатной, силикатной и гидроксидной природы. Химический состав мелиорантов представлен в табл. 4.

Конверсионный мел – карбонат кальция синтетический (ККС) – отход производства азотных удобрений, получается в результате азотнокислого разложения апатитового концентрата. Обладает тонкодисперсным гранулометрическим составом [9]. Мелиоративные свойства ККС АО “Акрон” (г. Великий Новгород) приведены в работах [10, 11].

Таблица 1. Гранулометрический состав супесчаной дерново-подзолистой почвы

Размер фракций, мм	1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	< 0.001	<0.01
Содержание, %	1.77	58.14	21.50	5.95	7.04	6.86	18.6

Таблица 2. Валовой химический состав почвы, %

Потеря при прокаливании	SiO ₂	R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Σ
6.15	81.1	9.28	1.19	7.97	0.44	0.47	0.11	0.51	101

Таблица 3. Влияние различных видов мелиорантов на величину почвенной кислотности, урожайность и химический состав растений рапса

Вариант	pH_{KCl}	Урожайность, г/сосуд	Ca, %	Mg, %	Zn, мг/кг	Mn, мг/кг	Fe, мг/кг
1. Контроль (без удобрений)	3.98	6.53	0.93	0.225	18.1	233	54.4
2. АРАВИВА НРК(S) (фон)	3.65	10.39	1.07	0.250	19.5	348	68.6
3. Азофоска	4.05	8.66	0.82	0.222	7.6	216	93.7
4. Фон + КМ по 0.7 H_T	4.38	13.39	1.51	0.299	4.7	182	71.2
5. Фон + ДИМ по 0.7 H_T	4.38	9.83	1.76	0.367	6.3	207	76.8
6. Фон + ДМ по 0.7 H_T	4.29	8.73	1.58	0.624	14	245	190
7. Фон + Гидрокарбонат Mg (кат. Б) по 0.7 H_T	3.80	7.57	1.33	0.517	65	315	203
8. Фон + ОЩ по 0.7 H_T	4.43	9.57	1.45	0.539	38	228	206
9. Фон + ДШ по 0.7 H_T	4.30	9.44	1.60	0.494	51	289	278
10. Фон + Гидрокарбонат Mg (кат. С) по 0.7 H_T	3.82	6.09	1.37	0.454	75	301	134
11. Фон + Гидрокарбонат Mg (кат. А) по 0.7 H_T	3.89	6.66	1.27	0.573	66	324	121
НСР ₀₅		1.8	0.25	0.047	13	51	71

Таблица 4. Химический состав мелиорантов

Мелиорант	Массовая доля, %		
	CaO	MgO	SiO ₂
Конверсионный мел (КМ)	50.7	1.7	–
Доломитизированная известняковая мука (ДИМ)	44.7	4.3	–
Доломитовая мука (ДМ)	30.4	21.0	–
Доменный шлак (ДШ)	39.7	19.7	38.5
Гидроксид Mg (категория А)	3.08	59.9	4.7
Гидроксид Mg (категория В)	5.05	58.5	6.32
Гидроксид Mg (категория С)	11.4	49.7	5.12
Отсев доломита	46.1	38.4	–

Экологические аспекты использования конверсионного мела описаны в [12].

Доломитовая мука (ДМ) произведена из доломита (месторождение Республики Беларусь, г. Витебск). Содержит в своем составе углекислые соли кальция и магния ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$).

Доменный шлак (ДШ) – отход производства черных металлов. В опыте использовали ДШ Череповецкого металлургического комбината. Шлак относится к известково-силикатным удобрениям. Сравнительный анализ удобрительной ценности и мелиоративных свойств ДМ и ДШ дан в работах [13, 14].

Отсев производства щебня из карбонатных пород (ОЩ). При производстве щебня из карбонатных пород в отвалы отсеиваются фракции размером <10 мм. Химический состав отсева месторождения Елизаветино (Гатчинский р-н, Ленинградской обл.) приведен в табл. 4. Удобрительная ценность и мелиоративные свойства отсева описаны в работах [15, 16].

Мелиоранты гидроксидной природы представлены в опыте гидроксидами магния с различным содержанием и соотношением Mg : Ca. Гидроксид магния является цитратрастворимым удобрением. В эксперименте использовали 3 категории мелиоранта (А, В, С).

Перед внесением в почву все мелиоранты измельчали и пропускали через сито с диаметром отверстий 0.25 мм. Дозы мелиорантов выравнивали по нейтрализующей способности. Необходимое количество мелиорантов для известкования устанавливали из расчета устранения гидролитической кислотности по 0.7 Н_г. Пересчет вели на массу пахотного слоя 3 млн кг.

В сосуды высевали по 6 растений ярового рапса сорта Лексус. Световой день был равен 15 ч. Уборку растений проводили спустя 45 сут после появления всходов. В опыте использовали лампы UnionPowerStar-40W-T, длина волны диодов: синий (450 нм), красный (660 нм). Влажность почвы

в процессе выращивания растений поддерживали на уровне 60% ППВ.

В качестве вариантов сравнения использовали почву без применения средств химизации (вариант 1), а также почву, удобренную азофоской (NPK = 16 : 16 : 16) и препаратом ARAVIVA (варианты 2 и 3) по 0.2 г д.в./кг почвы. В мелиорированных вариантах в качестве фона применяли удобрение ARAVIVA.

ARAVIVA (NPK = 15 : 15 : 15) производится ПАО “ФосАгро”. Азот в удобрении представлен в форме NH₄, 90% фосфатов составляют водорастворимые формы. Содержит в своем составе 10% серы и 0.3–1.0% MgO.

Химический состав зеленой массы ярового рапса определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре после озоления в муфеле при температуре 550°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование показали, что величина pH в почве варианта без средств химизации после уборки растений осталась в той же группе кислотности (очень сильнокислая почва – 3.98 ед. pH) (табл. 4). Применение азофоски привело к снижению почвенной кислотности (величина pH_{KCl} стала соответствовать 4.05 ед. pH – сильнокислотному уровню). Величины pH почвы при использовании удобрения ARAVIVA зафиксировано на уровне 3.65 ед. pH.

Использование мелиорантов карбонатной природы (ККС, тонкоизмельченного ОЩ, ДМ и ДИМ) способствовало нейтрализации почвенной кислотности. Эффект от их внесения мало отличался друг от друга (pH_{KCl} менялся от 4.29 до 4.48 ед.). Аналогичным образом на величину pH_{KCl} повлиял ДШ (pH_{KCl} 4.3).

Незначительный мелиоративный эффект, достигнутый в результате известкования мелиорантами карбонатной и силикатной природы спустя

45 сут после применения, объясняется невысокой их скоростью растворения. В работах [17–19] было показано, что процесс полного разложения известковых материалов в почвах не заканчивается даже спустя 1 год после применения. Остаточное количество неразложившейся извести в почвах фиксируется даже спустя 3 года после применения.

Гидроксиды магния (кат. А, В, С) мелиоративного эффекта не оказали. pH_{KCl} почвы осталась на уровне показателя до закладки опыта.

Следовательно, использование средств химизации в дозе $0.7 H_T$ на очень сильнокислой дерново-подзолистой почве при выращивании ярового рапса повлияло на величину почвенной кислотности по-разному. Применение удобрения АРАВИВА в чистом виде способствовало некоторому подщелачиванию почвы. При использовании азофоски ни подкисления, ни подщелачивания почвы не произошло. Известкование гидроксидом магния также не привело к росту pH солевой суспензии в течение вегетации рапса. Эффект от применения мелиорантов карбонатной и силикатной природы спустя 45 сут был незначителен и мало различался между собой.

Минимальный урожай зеленой массы растений (табл. 4) в сосудах опыта отмечен в варианте без использования удобрений и мелиорантов (6.49 г/сосуд). Применение комплексных минеральных удобрений способствовало повышению продуктивности вегетативной массы рапса. Рост урожая в варианте опыта с удобрением АРАВИВА (10.4 г/сосуд) составил 159% к контролю. Эффект от внесения азофоски оказался меньше – 133% к контролю. Различия между вариантами, удобренными комплексными удобрениями, были достоверными.

Таким образом, использование на сильнокислой дерново-подзолистой супесчаной почве удобрения АРАВИВА в эквивалентном с азофоской количестве имело преимущество перед азофоской. Выявление причин этого явления требует постановки специальных опытов.

Мелиоранты карбонатной и силикатной природы также способствовали повышению урожая зеленой массы рапса. Максимальная эффективность установлена в варианте с применением КМ. Урожай зеленой массы рапса в вариантах с использованием доломитизированной ИМ, ДМ и отсева щебня был достоверно меньше. Эффективность ДШ оставалась на уровне мелиорантов карбонатной природы. Гидроксиды магния положительного влияния на продуктивность рапса не оказали.

Большинство сильно- и среднекислых почв Северо-Западного региона РФ характеризуется недостаточным содержанием доступных для растений форм кальция. Проявление кальциевого голодания

растений на бедных поглощенными основаниями кислых подзолистых почвах может быть следствием прямого дефицита в них кальция, а также результатом антагонистического действия вносимых с удобрениями катионов NH_4^+ , K^+ и Mg^{2+} , блокирующих как поступление его в растения, так и участие во внутрпочвенных процессах [20].

Минимальным накоплением кальция в вегетативной массе рапса характеризовались варианты без известкования. Изменения концентраций кальция в тканях составили от 0.82 до 1.07%. Выявленные различия были недостоверными.

Известкование положительно сказалось на содержании кальция в растениях. Во всех мелиорируемых вариантах концентрация этого элемента в тканях рапса была достоверно больше, чем в вариантах без известкования. Значимых различий в накоплении кальция растениями из сосудов, известкованных мелиорантами карбонатной природы и доменным шлаком, не установлено. Рост концентрации кальция в тканях в вариантах с гидроксидом магния по сравнению с вариантами без известкования был отмечен в качестве хорошо выраженной тенденции.

Таким образом, мелиоранты карбонатной и силикатной природы оказали существенное влияние на переход кальция в растения рапса уже она первых этапах выращивания. Отрицательное влияние недостатка кальция для растений рапса при известковании устранялось. Следовательно, действие известкования не может быть сведено только к нейтрализации почвенной кислотности. Роль извести как кальциевого удобрения была показана также в работах [21–24].

Полученные результаты подтвердили ранее сделанный вывод о том, что на формирование элементного состава рапса влияет химическая обстановка в почве [5]. Например, разница в содержании кальция в тканях рапса в варианте без применения средств химизации и в варианте, удобренным АРАВИВА на фоне известкования доломитизированной ИМ, составила 1.89 раза.

Недостаток магния, тормозящий рост растений, возможен на легких почвах при низких величинах pH [20]. В России около 20 млн га пахотных почв имеет низкое содержание магния, половина таких почв расположена в Нечерноземной зоне страны [25]. Площадь почв, нуждающихся в первоочередном внесении магния в России, составляет ≈ 7 млн га [26]. В настоящее время, в связи с прекращением поставок магнийсодержащих удобрений сельскохозяйственному производству России, магнийсодержащие отходы промышленности и мелиоранты являются основным источником пополнения запасов магния в почвах.

Данные содержания магния в тканях рапса приведены в табл. 3. Концентрация магния в вегетативной массе растений, установленная в варианте без применения удобрений и мелиорантов, была минимальной (0.225%). Содержание магния в тканях при использовании в опыте комплексных минеральных удобрений возросла до 0.234%. Выявленные различия были недостоверными.

Рост концентрации магния в зеленой массе рапса отмечен в вариантах, мелиорированных магниесодержащими удобрениями. Чем больше была концентрация магния в известковых удобрениях карбонатной природы, тем больше магния накапливал рапс. Например, в сосудах опыта с ККС, содержащих 1.7% Mg, концентрация магния в тканях рапса составила 0.299%, а в варианте с доломитовой мукой возросла до 0.624%. Тем не менее, следует отметить, что концентрация магния в растениях рапса в варианте с применением ККС была лишь незначительно больше, чем в контроле (0.225 и 0.299%), а урожай зеленой массы почти в 2 раза превосходил последний. Следовательно, в варианте с ККС уровень содержания магния в тканях способствовал нормальному развитию растений рапса.

Расширение соотношения MgO : CaO в гидроксиде магния способствовало уменьшению содержания магния в массе рапса. Изменения составили от 0.497 до 0.440%.

В целом, использование мелиорантов, содержащих в своем составе магний, приводило к обогащению почвы доступными для растений соединениями этого элемента и вызывало рост содержания этого элемента в рапсе.

Известно, что кислотность почвы резко увеличивает подвижность некоторых микроэлементов – марганца и цинка, в сильнокислых почвах – железа. Физиологическая роль марганца связана с его участием в окислительно-восстановительных процессах. В качестве элемента, входящего в состав ферментов, он задействован в процессах дыхания, азотном и нуклеиновом обменах [24]. Известкование в целом приводит к осаждению в почвах доступных для растений соединений марганца [27–29]. Максимальное снижение содержания подвижного марганца отмечено при pH_{KCl} в почвах 6.5–7.2. Этот уровень реакции соответствует образованию в почвах нормального увлажнения оксидов Mn_2O_3 и MnO , которые обладают малой растворимостью [24].

В проведенном эксперименте в условиях очень сильнокислой реакции почвы известкование на начальном этапе выращивания растений рапса не привело к снижению содержания марганца в его зеленой массе. Изменения концентрации марганца в вегетативной массе укладывались в диапазон 201–348 мг/кг. Связи между концентрацией

кальция и магния в биомассе рапса и концентрацией марганца в растениях не выявлено.

В литературе приведены пределы изменений содержания марганца в растениях, при которых осуществляется нормальное функционирование растительного организма [30]. Для представителей семейства капустных, к которым относится яровой рапс, они меняются от 50 до 600 мг/кг сухой массы. Пределы верхнего порога содержания при явлениях токсикоза варьируют от 760 до 2035 мг/кг. Таким образом, содержание марганца в растениях рапса в изученных вариантах укладывалось в диапазон концентраций, способных обеспечить нормальное функционирование растений.

Железо – необходимый элемент для роста и развития растений. Участие железа в процессах обмена веществ в растительном организме чрезвычайно обширно и отражается на активности и характере метаболизма потребляемых растениями элементов питания. Физиологическая роль железа – элемента, обладающего переменной валентностью, связана прежде всего с переносом электронов и его участием в окислительно-восстановительных реакциях, таких как окисление углеводов, восстановление сульфатов и нитратов. Большую роль играет железо в фотосинтезе растений, являясь незаменимым компонентом в составе хлоропластов, без него не образуется хлорофилл. Недостаток железа тормозит два важнейших процесса энергообмена растений – фотосинтез и дыхание.

Состояние железа в почвах изучено достаточно полно [31–33]. Степень подвижности железа возрастает от почв с щелочной реакцией к нейтральной и далее к кислым почвам, а максимальное снижение подвижности этого элемента отмечено при pH_{KCl} , соответствующим показателям от 6.5 до 7.2 ед. pH [24].

Концентрация железа в тканях рапса зависела от применения средств химизации. Минимальное содержание было характерно для контрольного варианта. Применение минеральных удобрений, КМ и доломитизированной ИМ не привело к достоверному росту концентрации железа в рапсе. Изменения его содержания укладывались в диапазон 68.6–93.7 мг/кг сухой массы растений.

Достоверный рост содержания железа в зеленой массе растений установлен в вариантах, в которых почву мелиорировали ДМ, ОЩ, ДШ и гидроксидом магния. Вероятно, это в какой-то степени было связано с наличием железа в самих мелиорантах. Например, содержание Fe_2O_3 в доменном шлаке составляло 0.6, в гидроксидах магния – 0.3%.

Изменение концентраций железа в тканях рапса при использовании мелиорантов на фоне

применения удобрения АРАВИВА укладывались в диапазон от 121 до 278 мг/кг и были достоверно больше, чем в варианте без использования средств химизации.

Указанное содержание железа в тканях рапса, выращенного в опыте, укладывалось в диапазон концентраций, позволяющим нормально развиваться растениям [30].

Цинк играет важную роль в азотном, углеводном и фосфорных обменах. Он способствует синтезу нуклеиновых кислот и белка. При недостатке цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, небелковые соединения азота, органические кислоты, нарушается синтез белка. Дефицит цинка приводит также к нарушению фосфорного обмена. При недостатке этого элемента в листьях подавляется скорость деления клеток мезофилла, что приводит к морфологическим изменениям листьев [30]. Возрастание pH_{KCl} почвенного раствора, а также увеличение содержания в почве обменных соединений кальция и магния способствует снижению содержания цинка в растениях.

Из всех изученных элементов цинк характеризовался наименьшим накоплением в растениях рапса. В зависимости от варианта опыта концентрация цинка в тканях рапса менялась от 4.69 до 75.1 мг/кг абсолютно сухой массы растений, т.е. изменялась в 16 раз. Минимальной концентрацией характеризовались варианты, удобренные комплексными минеральными удобрениями и мелиорантами карбонатной природы. В вариантах опыта с применением гидрокарбонатов магния и ДШ концентрация цинка в растениях резко возросла. По-видимому, это объяснялось присутствием Zn в самих мелиорантах.

В целом проведенное исследование показало, что на формирование химического состава ярового рапса существенное влияние оказывала химическая обстановка в почве, а применение удобрений и мелиорантов было фактором, позволившим регулировать элементный состав растений на начальном этапе возделывания рапса.

ВЫВОДЫ

Величина pH_{KCl} в почве варианта без средств химизации после уборки растений рапса соответствовала очень сильнокислоте состоянию — 3.98 ед. рН. При применении азофоски показатель рН почвы стал соответствовать сильнокислоте уровню: $pH_{KCl} = 4.05$ ед. рН. Величина pH_{KCl} при использовании удобрения АРАВИВА зафиксирована на уровне 3.65 ед. Эффект от использования ККС, ОЩ, ДМ и ДИМ мало отличался друг от друга. Изменения составили от 4.9 до 4.48 ед. рН. ДШ на величину pH_{KCl} повлиял аналогичным образом

(pH_{KCl} 4.39 ед.). Гидроксиды магния мелиоративного эффекта не оказали, pH_{KCl} остался на уровне показателей до закладки опыта.

Минимальная урожайность растений в сосудах опыта была характерна для варианта без использования средств химизации (6.49 г зеленой массы/сосуд). Рост урожайности в варианте опыта с удобрением АРАВИВА (10.4 г/сосуд) составил 159% к контролю, в варианте с азофоской — 133% к контролю.

Максимальная продуктивность растений в мелиорированной почве установлена в вариантах с применением ККС. Выход зеленой массы рапса в вариантах с использованием ДИМ, ДМ и ОЩ был достоверно меньше. Эффективность ДШ оставалась на уровне мелиорантов карбонатной природы. Гидроксид магния положительного влияния на продуктивность рапса не оказал.

Известкование положительно сказалось на содержании кальция в растениях. Во всех мелиорированных вариантах концентрация этого элемента была достоверно больше, чем в вариантах без известкования. Значимых различий в накоплении кальция растениями в вариантах, известкованных мелиорантами карбонатной природы и доменным шлаком, не установлено. Рост концентрации кальция в тканях в вариантах с гидроксидом магния по сравнению с вариантом без известкования отмечен в качестве хорошо выраженной тенденции. Концентрация магния в вегетативной массе растений в вариантах без применения минеральных удобрений и с их использованием менялась от 0.225 до 0.234%. Использование мелиорантов, содержащих в своем составе магний, приводило к обогащению почвы доступными для растений соединениями этого элемента и вызывало рост концентрации магния в рапсе. Чем больше концентрация магния в известковых удобрениях карбонатной природы, тем больше магния накапливал рапс. В варианте с ККС концентрация магния составила 0.299, в варианте с ДМ возросла до 0.624%, т.е. в 2.1 раза. Расширение соотношения MgO : CaO в гидроксиде магния способствовало уменьшению содержания магния в рапсе, изменения составили от 0.497 до 0.440%.

Известкование не привело к снижению содержания марганца в зеленой массе рапса. Изменения концентрации укладывались в диапазон от 201 до 348 мг/кг. Такое содержание укладывается в диапазон концентраций, способных обеспечить нормальное функционирование растений. Концентрация железа в тканях рапса зависела от применения средств химизации. Достоверный рост содержания железа в зеленой массе рапса установлен в вариантах, мелиорированных ДМ, ОЩ, ДШ и гидроксидом магния. Вероятно, это связано с наличием железа в самих мелиорантах.

Концентрация цинка в тканях рапса менялась от 4.69 до 75.1 мг/кг. Минимальной концентрацией элемента характеризовались варианты, удобренные комплексными минеральными удобрениями и мелиорантами карбонатной природы. В вариантах с применением гидроксида магния и ДШ концентрация цинка в растениях резко возрастала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Влияние фосфатного шлама на урожай и качество растениеводческой продукции // Удобрения и химические мелиоранты в агроэкосистемах. Мат-лы 5-й науч.-практ. конф. 1998. С. 149–153.
2. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В.* Накопление стабильного стронция сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистых почв конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2000. № 9. С. 80–88.
3. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В.* О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2001. № 2. С. 74–78.
4. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // *Агрохимия*. 2002. № 4. С. 81–87.
5. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Волкова Е.Н.* Влияние различных видов фосфорных удобрений и фосфатного шлама на химический состав зеленой массы ярового рапса на кислой дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 2006. № 3. С. 34–39.
6. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Алексеев Ю.В., Оглуздин А.С.* Химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произвесткованных промышленными отходами // *Агрохимия*. 2008. № 7. С. 50–55.
7. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Нейбауэр А.О.* Поступление стронция в растения рапса в процессе растворения отходов мела, используемого для мелиорации кислых почв // *Агрохимия*. 2012. № 3. С. 77–84.
8. *Литвинович А.В., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О.* Исследование микроэлементного состава ярового рапса на разных стадиях растворения химических мелиорантов // *Агрохимия*. 2014. № 5. С. 66–73.
9. *Кабанина Л.Н., Южанина Е.Н., Юлушев И.Г.* Влияние осаденного карбоната кальция на продуктивность сельскохозяйственных культур в условиях Кировской области // Действие удобрений и отходов промышленности на продуктивность сельскохозяйственных культур, качество урожая и свойства почвы. Тр. Горьков. СХИ. 1984. С. 12–15.
10. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О.* Последствия применения конверсионного мела для мелиорации кислых почв: стронций в системе дерново-подзолистая почва–растение // *Почвоведение*. 2013. № 9. С. 1138.
11. *Лаврищев А.В., Литвинович А.В.* Стабильный стронций в агроэкосистемах Сер. Учебники для вузов. Спец. лит.-ра. СПб., 2019.
12. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Витковская С.Е.* Экологические аспекты известкования почв конверсионным мелом // *Плодородие*. 2005. № 1(22). С. 23–26.
13. *Литвинович А.В., Небольсина З.П., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Куземкин И.А.* Некоторые результаты изучения мелиоративных свойств тонкодисперсных фракций доломитовой муки и доменного шлама Череповецкого металлургического комбината // *Агрофизика*. 2013. № 2. С. 44–51.
14. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Ковлева А.О., Буре В.М.* Химический состав растений яровой пшеницы на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, произвесткованной кальцийсодержащими отходами промышленности. Эмпирические модели транслокации макро- и микроэлементов в вегетативные и генеративные органы растений // *Агрохимия*. 2023. № 1. С. 73–82.
15. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О.* Влияние различных по размеру фракций доломита на показатели почвенной кислотности легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 27–37.
16. *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.
17. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Бирюков В.А.* Разложение конверсионного мела в дерново-подзолистой почве в связи с угрозой ее загрязнения стабильным стронцием // *Агрохимия*. 2001. № 11. С. 64–68.
18. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Салаев И.В.* Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // *Агрохимия*. 2016. № 12. С. 42–50.
19. *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.
20. *Воеводина Л.А., Воеводин О.В.* Магний для почвы и растений // *Научн. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации*. 2015. № 2(18). С. 70–81.
 21. *Кедров-Зихман О.К.* Известкование почв и применение микроэлементов. М.: Сельхозиздат, 1957. 431 с.
 22. *Мазаева М.М.* Недостаток кальция в почве и известкование, как фактор улучшения кальциевого питания растений // *Агрохимия*. 1972. № 3. С. 90–95.
 23. *Мазаева М.М.* О чувствительности растений к недостатку кальция в почве // *Агрохимия*. 1975. № 5. С. 61–66.
 24. *Небольсин А.Н., Небольсина З.П.* Теоретические основы известкования почв. СПб., 2005. 252 с.
 25. *Аристархов А.Н.* Агрохимическое обоснование применения магниевых удобрений // *Плодородие*. 2002. № 3. С. 15–17.
 26. *Зеленов Н.А., Шильников И.А., Аканова Н.И., Швырков Д.А.* Резерв химических мелиорантов и их агроэкологическая эффективность // *Современные проблемы и перспективы известкования кислых почв*. СПб., 2010. С. 30–34.
 27. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В.* Динамика почвенной кислотности и содержание подвижных форм соединений алюминия, марганца и железа в почве при известковании конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2000. № 6. С. 10–15.
 28. *Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю.* Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2015. № 5. С. 61–68.
 29. *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.
 30. *Шеуджен Х.* Биогеохимия. Майкоп, 2003. 1027 с.
 31. *Водяницкий Ю.Н., Лесовая С.Н., Сивцов А.В.* Гидроксидогенез железа в лесных и степных почвах русской равнины // *Почвоведение*. 2003. № 4. С. 465–475.
 32. *Зонн С.В.* Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 207 с.
 33. *Савич В.И., Кауричев И.С., Шишов Л.М.* Окислительно-восстановительные процессы в почвах, агрономическая оценка и регулирование. Кустанай, 1999. 402 с.

Effect of Fertilizers and Meliorants on the Value of Soil Acidity of Sod-Podzolic Light Loamy Soil, Yield and Chemical Composition of the Green Mass of Spring Rapeseed (according to Laboratory and Vegetation Experience)

A. V. Litvinovich^{a,b,#}, K. M. Nelson^b, A. V. Lavrishchev^b, P. S. Manakov^b

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

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

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

Under controlled conditions of laboratory vegetation experience based on very strongly acidic sod-podzolic sandy loam soil, a comparative study of the fertilizing value and reclamation properties of complex mineral fertilizers (azofoska and APAVIVA) and meliorants of a carbonate nature was carried out: conversion chalk (CC), gravel screening (GS), dolomite (DM) and dolomitized (DIM) limestone flour, as well as silicate nature – blast furnace slag (BFS) and hydroxide nature – Mg(OH)₂. Culture – spring rape of the Lexus variety. It was shown that the reclamation effect obtained as a result of the use of BFS and meliorants of a carbonate nature differed little from each other and after 45 days of plant cultivation were insignificant. Magnesium hydroxide did not have a reclamation effect. The yield data of the vegetative mass of rapeseed after harvesting are given. It is shown that the chemical composition of meliorants had a significant effect on the formation of the elemental composition of plants.

Keywords: fertilizers, meliorants of different nature, soil acidity, sod-podzolic light loamy soil, yield, chemical composition, green mass, spring rape, laboratory and vegetation experience.

УДК 631.423.6:631.445.41(571.54)

ЭМИССИЯ CO₂ ИЗ ПАХОТНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ[§]

© 2024 г. Э. О. Чимитдоржиева^{1,*}, Ю. Б. Цыбенков¹, Г. Д. Чимитдоржиева¹¹Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

*E-mail: erzhenach@mail.ru

Изучили эмиссию CO₂ из агрочерноземов дисперсно-карбонатных Тугнуйской котловины и агрочерноземов квазиглеевых Еравнинской котловины западного Забайкалья. Для сравнения эмиссии CO₂ из почв взяты одноименные целинные варианты. Цель исследования – количественное определение и сравнительная оценка продуцирования углекислоты из пахотных черноземов с контрастными условиями температуры и увлажнения. Измерение потоков CO₂ из почвы осуществляли закрытым камерным методом портативным инфракрасным CO₂-газоанализатором AZ 7752 (AZ Instrument Corp., Тайвань). Эмиссия CO₂ в значительной степени зависела от гидротермических условий. Ее минимум в начале вегетации был связан с воздействием пониженных температур почв, максимум чаще отмечали после выпадения осадков. Пики эмиссии CO₂ совпадали с повышением температуры и влажности с июня до начала августа, в условиях недостатка легкодоступной влаги, а также были связаны с режимом увлажнения. Лимитирующим фактором величины потока CO₂ для черноземов квазиглеевых была температура почвы, для черноземов дисперсно-карбонатных – влажность. Установлено, что в пахотных почвах суммарная эмиссия CO₂ значительно меньше, чем в целинных, это объясняется особенностями условий агрогенной среды. Пахотные почвы теплее в летний период, зимой охлаждаются сильнее и глубже. Трансформация водного режима происходит в направлении уменьшения увлажнения и увеличения его контрастности в теплый период. Суммарный показатель потерь углерода меняется в ряду: чернозем дисперсно-карбонатный → чернозем квазиглеевый, целина → пашня.

Ключевые слова: эмиссия CO₂, агрочерноземы, мерзлота, Забайкалье.

DOI: 10.31857/S0002188124050063, EDN: CZCTTF

ВВЕДЕНИЕ

Агроценозы представляют собой экосистемы с высокой степенью изменчивости содержания органического вещества. Неправильное использование пахотных почв приводит к потере углерода и к выделению большего количества парниковых газов, особенно диоксида углерода. Однако, если увеличить продуктивность агроценозов или восстановить многолетнюю растительность на этих почвах, можно уменьшить количество углекислого газа в атмосфере и смягчить парниковый эффект [1]. Использование почв в сельском хозяйстве может привести к негативным последствиям, таким как ухудшение физических, агрохимических

и биологических свойств почв, а также потере естественного плодородия.

Из почв выделяется большое количество углекислого газа, что имеет важное значение для глобального цикла углерода [2]. Факторы, влияющие на этот процесс – растительность, тип почвы, климатические условия [3, 4].

Один из основных парниковых газов – CO₂, и для правильной оценки баланса углерода в системе почва–растения–атмосфера необходимо учитывать его поступление в атмосферу из почвы. Пахотные почвы являются одним из главных источников выбросов углекислого газа в атмосферу, согласно исследованию [1].

Известно, что изменения в землепользовании приводят к изменениям запасов органического углерода в почвах. Например, когда целинные земли превращаются в пахотные угодья, это приводит к значительным потерям органического углерода. Потери происходят из-за усиления процессов

[§] Работа выполнена по теме Госзадания № 121030100228-4 “Эволюционно-генетические, биогеохимические и продукционные функции почв Байкальского региона как компонента биосферы, оценка их ресурсного потенциала и разработка технологий рационального использования и охраны”.

минерализации органического вещества и из-за ежегодного сбора растительного материала в качестве урожая, который ранее служил источником обновления органического углерода в почвах. Это было отмечено в работах [5–7].

Поэтому в настоящее время особенно важно заниматься контролем выбросов парниковых газов и изучением способности земных экосистем поглощать углерод, а также разрабатывать научно обоснованные методы для увеличения емкости основных углеродных резервуаров в биогеохимическом цикле [8]. Одна из стратегических задач в решении проблемы избыточного уровня диоксида углерода в атмосфере – рекарбонизация наземных экосистем.

Изучение количества CO_2 , выбрасываемого из почвы в различных экосистемах, является важным для определения общего вклада почвенного покрова России в глобальную эмиссию CO_2 . В процессе изучения доступной литературы о выделении углекислого газа почвами было обнаружено, что Восточная Сибирь является одним из ключевых районов, которые следует принять во внимание при организации системы мониторинга выбросов CO_2 [9]. Очень интересными являются мерзлотные экосистемы, т.к. их высокая чувствительность позволяет использовать их в качестве индикатора и удобной модели для изучения глобальных климатических изменений [10]. Взаимосвязь между верхним слоем мерзлоты и растительностью криогенных биотопов очень тесная, что изменение или исчезновение одной из них неминуемо приведет к быстрой деградации другой.

Актуальность нашего исследования вызвана необходимостью оценки основных наземных источников углекислого газа в экосистемы России и их влияние на биосферу и глобальный климат. Цель работы – определение эмиссии CO_2 из дисперсно-карбонатных и квазиглеевых агрочерноземов Забайкалья и сравнительная их оценка с целинными аналогами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили агрочерноземы квазиглеевые (*Turbic Chernozem Molliglossic*) юга Витимского плоскогорья и агрочерноземы дисперсно-карбонатные (*Humic Chernozems Nurosalcic*) Селенгинского Среднегорья Западного Забайкалья. Для сравнения в качестве фоновых почв были взяты целинные аналоги агрочерноземов. Почвы классифицировали по [11–13].

Основные физико-химические параметры почв были определены классическими в почвоведении методами [14].

Измерение потоков CO_2 из почвы осуществляли закрытым камерным методом по изменению концентрации в непрозрачных цилиндрических ПВХ-камерах. Объем камер составлял от 1.2 до 1.5 л, их площадь – 90 см². Камеры были вкопаны в почву на глубину 3–4 см ($n = 3$). В камерах удаляли наземную растительность. Камеры вне измерений были постоянно открыты. Оценки потоков была выполнена с использованием портативного инфракрасного CO_2 -газоанализатора AZ 7752 (AZ Instrument Corp., Тайвань). Детали измерительной методики и расчета потоков приведены в работе [15].

На экспериментальных площадках одновременно с определением эмиссии CO_2 производили измерение температуры и влажности почвы в слое 0–20 см. Для оценки суммарных потерь углерода из почвы в виде CO_2 за исследованный период использовали метод линейной интерполяции.

Температуру почвы определяли с помощью логгеров – комплекса TCR-0-U с регистратором DS1921, влажность почвы – с помощью портативного прибора Decagon с датчиком 5 tm.

В табл. 1 приведены некоторые характеристики условий формирования черноземов квазиглеевых и черноземов дисперсно-карбонатных.

Для статистической обработки данных использовали программы Microsoft Excel и Statistica 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показали, что черноземы дисперсно-карбонатные и агрочерноземы дисперсно-карбонатные характеризуются укороченным гумусовым профилем, который не превышает 25–35 см. Содержание гумуса составляет 4.1 в пахотной почве и 5.3% – в целинной. Гранулометрический состав легкосуглинистый. В гумусовом горизонте сумма поглощенных оснований составляла 22.6 и 29.7 смоль(экв)/кг почвы на пашне и целине соответственно. Для верхних горизонтов реакция среды была равна 6.7–6.9 ед. рН, в средней и нижней частях профиля показатель находится в диапазоне 7.6–8.4 ед. (табл. 2).

Черноземы квазиглеевые и агрочерноземы квазиглеевые характеризовались небольшой мощностью гумусового горизонта 15–25 см. Верхний слой почвы содержит гумуса 7.2–7.5%. Сумма поглощенных оснований в гумусовом горизонте составляла 35.4–36.8 смоль(экв)/кг почвы. В верхней части профиля реакция почвенного раствора была близка к нейтральной с рН 6.8–6.9, с переходом в нижние горизонты сменялась на слабощелочную и щелочную с рН 7.3–8.3.

Таблица 1. Характеристика условий формирования исследованных почв

Показатель	Тип почвы	
Классификация и диагностика почв России (1977)	Лугово-черноземные мерзлотные почвы	Чернозем мучнисто-карбонатный
Классификация и диагностика почв России (2004)	Чернозем квазиглеевый* Агрочернозем квазиглеевый**	Чернозем дисперсно-карбонатный* Агрочернозем дисперсно-карбонатный**
Классификация почв WRB (2022)	Turbic Chernozem Molliglossic	Нарплиц Чернозем Нуропалич
Котловина	Еравнинская котловина	Тугнуйская котловина
JPS	52°29'48.2" N 111°33'48.9" E	51°09'12.9" N 108°14'21.9" E
Растительные сообщества	Разнотравно-злаковое сообщество	Злаково-разнотравная травянистая растительность
Почвообразующие породы	Промороженные аллювиально-лимнические фациальные комплексы	Делювиальные и пролювиально-делювиальные отложения
Рельеф	Приурочены к недренированным равнинам, к пониженным элементам рельефа	Склоны в межгорных котловинах: в южной части Бурятии – склоны северной экспозиции, в северной – в виде пятен по склонам южной экспозиции
Температура >10°C	1270	1637
Температура самого холодного месяца, °C	-25.4	-24.8
Температура самого теплого месяца (июль), °C	+17.1	+18.3
Осадки, мм	305	255–280
Безморозный период, сут	75–90	90–110
Коэффициент увлажнения	0.72	0.48
Тип водного режима	Чередование более или менее глубокого промачивания и возвратно-капиллярного подпитывания нижней части почвенного профиля	Непромывной с периодическим сквозным промачиванием до почвенно-грунтовой толщи в позднелетний период
C _{орг} , %	4.4 ± 0.35* 3.8 ± 0.51**	3.1 ± 0.37* 2.4 ± 0.12**
Сумма поглощенных оснований, смоль(экв)/кг	34.3 ± 2.80* 32.1 ± 0.65**	29.7 ± 3.20* 27.5 ± 1.08**
pH	7.1 ± 0.30* 6.9 ± 0.12**	6.9 ± 0.25* 6.9 ± 0.02**
Гранулометрический состав	Средний и тяжелый суглинок	Легкий суглинок
Элементарные почвенные процессы	1. Дерновый 2. Биогенное и коагуляционное оструктуривание 3. Элювиально-иллювиальное перераспределение карбонатов 4. Оглеение слабое	1. Подстилкообразование слабое 2. Дерновый 3. Биогенное и коагуляционное оструктуривание 4. Элювиально-иллювиальное перераспределение карбонатов

* Целина.

** Пашня.

Таблица 2. Основные физико-химические свойства почв

Почва	Горизонт	Глубина, см	Гумус, %	pH _{H₂O}	Поглощенные основания, смоль(экв)/кг		
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сумма
Чdc	AU	0–33	5.3	6.7	24.9	4.8	29.7
	B	33–50	1.4	7.0	20.6	4.2	24.8
	BСА1	50–75	0.4	7.9		20*	20
	BСА2	75–137	0.2	8.2		22*	22
	Сса	137–170	–	8.3		18*	18
АЧdk	PU	0–20	4.1	6.7	18.1	4.5	22.6
	AU	20–49	2.2	7.4	18.6	3.7	22.3
	BСА	49–85	0.4	8.3	16.0*		16.0
	BСА+Сса	85–145	–	8.3	13.0*		13.0
Чq	AU	0–20	7.5	6.9	25.3	10.1	35.4
	AU+B	20–34	0.8	7.9	18.6	10.5	29.1
	B	45–55	0.7	7.8	19.0	10.7	29.7
	BСА	60–70	–	8.3	–		–
АЧq	PU	0–20	7.2	6.8	29.2	7.6	36.8
	AU+B	20–25	2.6	7.2	22.5	5.0	27.5
	B	35–45	0.7	7.4	13.2	5.7	18.9

* Емкость поглощения.

Разное количество CO₂ выделялось почвами в разные периоды роста растений и зависело от погодных условий, видового состава растений, плотности растительного покрова, состояния растений и микробных сообществ. В 2018 г. исследования эмиссии CO₂ из почв показали, что в начале изученного периода скорость выделения углекислого газа на всех экспериментальных точках была низкой. Это связано с тем, что почва была в глубоко промерзшем состоянии и медленно прогревалась весной. Динамика дыхания холодных почв характеризуется кривой, имеющей 2 пика: один в конце июня и другой во второй декаде июля. Для мерзлотных черноземов кривая сезонной эмиссии CO₂ имеет только один пик в конце июня (рис. 1).

Почвы, находящиеся длительное время в промерзшем состоянии, выделяют больше углекислого газа в течение вегетационного периода по сравнению с мерзлотными почвами. Из черноземов квазиглеевых юга Витимского плоскогорья наблюдают низкие показатели эмиссии CO₂, что обусловлено наличием многолетней мерзлоты. Мерзлота, контактируя с почвой, приводит к охлаждению всего почвенного профиля. В нижней части профиля температура остается отрицательной даже в течение вегетационного сезона. Биологически активная температура (>10°C) опускается только до глубины 60–80 см от поверхности. Когда почва

начинает оттаивать, верхний полуметровый слой освобождается от мерзлоты к концу мая, а второй полуметровый слой – к середине июня [16], в то время как длительно-сезоннопромерзающие почвы оттаивают до глубины 120 см к середине мая и до 190 см к началу июня. Из-за этого биологические процессы в мерзлотных вариантах отстают на 14–15 сут от длительно-сезонномерзлотных черноземов.

Из-за низких температур почвы в начале вегетации скорость выделения CO₂ из всех исследованных почв была невелика, т.к. биологическая активность почвы низкая. Например, из черноземов дисперсно-карбонатных интенсивность продуцирования углекислоты составила 9.4 г CO₂ и в агрочерноземах дисперсно-карбонатных – 2.8 г CO₂/м²/сут. Температура почвы в слое 0–20 см находилась в пределах 8.0–10.1°C – в пахотных и 6.7–10.5°C – в целинных черноземах. Для исследованных почв в этот период была характерна низкая влажность, находящаяся в пределах 4.7–7.1% на пашне и 8.2–10.1% на целине (рис. 2).

В квазиглеевых черноземах интенсивность продуцирования углекислоты составляла всего 1.7 г CO₂/м²/сут. Температура почвы в слое 0–20 см изменялась от 5.6 до 9.0°C при низкой влажности, находящейся в пределах 14.8–17.0%.

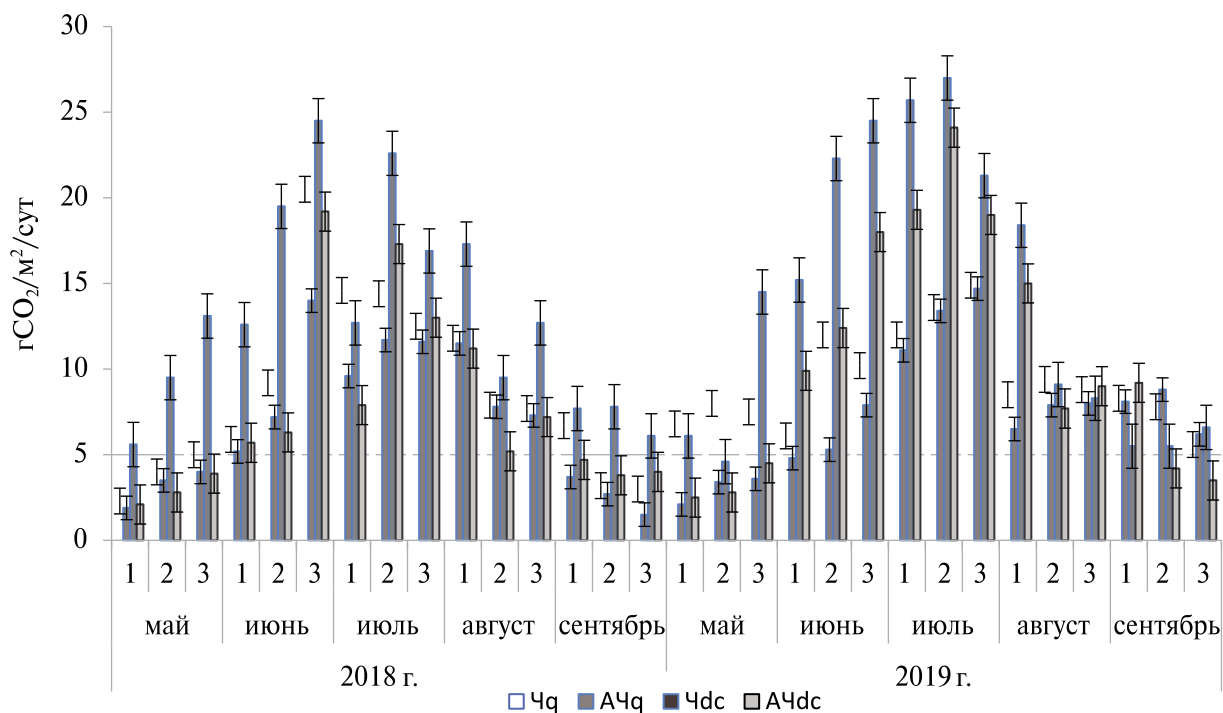


Рис. 1. Динамика эмиссии CO₂ из черноземов за вегетационный сезон 2018–2019 г. Чq – чернозем квазиглеевый, Чdc – чернозем дисперсно-карбонатный, АЧq – агрочернозем квазиглеевый, АЧdc – агрочернозем дисперсно-карбонатный, то же на рис. 2, 3; 1–1-я декада, 2–2-я декада, 3–3-я декада.

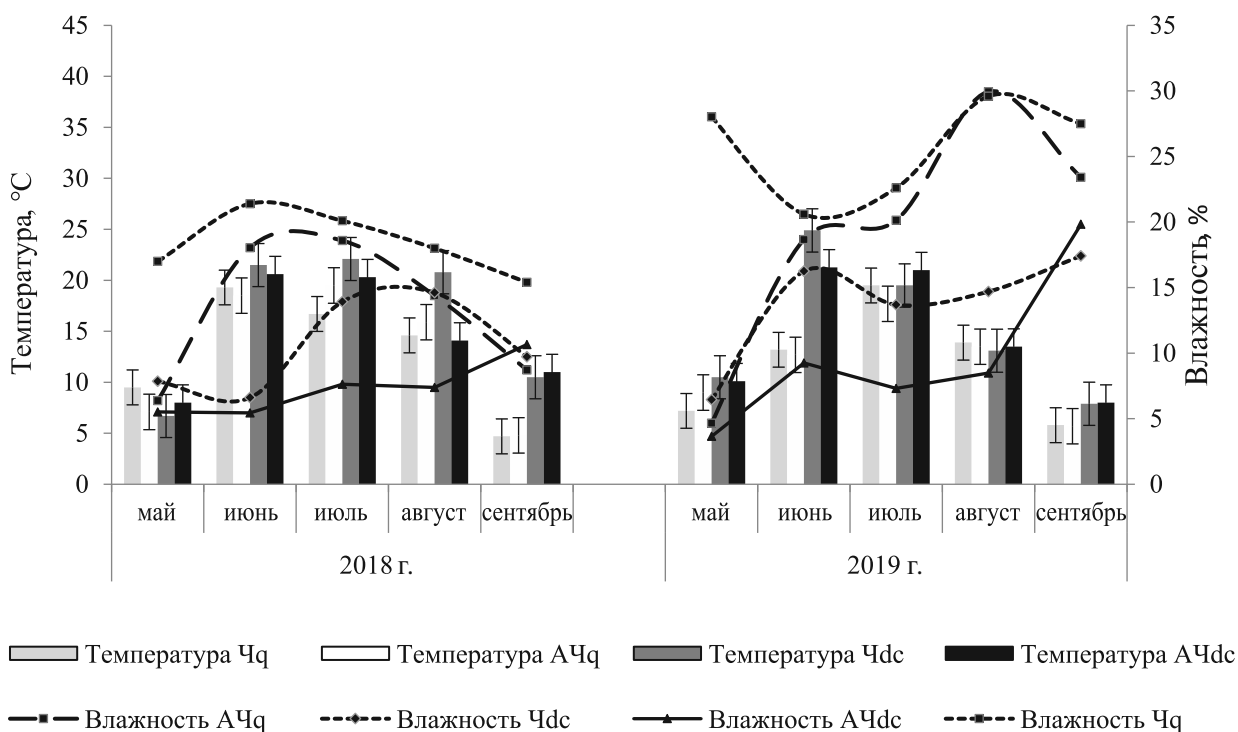


Рис. 2. Влажность и температура черноземов за вегетационный период 2018–2019 гг.

Затем, в начале июня при росте температуры и прогреве верхних слоев почвы наблюдали постепенное увеличение эмиссии CO_2 , вызванное усилением активности биоты. Первый всплеск эмиссии CO_2 из черноземов дисперсно-карбонатных и агрочерноземов дисперсно-карбонатных совпадал с предшествующим выпадением осадков и быстрым прогреванием почвы до 18 и 21°C, обусловившим увеличение эмиссионной составляющей из черноземов дисперсно-карбонатных – до 12.5 и в агрочерноземах дисперсно-карбонатных – до 5.6 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$, из черноземов квазиглеевых – до 5.9–9.2 и в агрочерноземах квазиглеевых – до 3.9–4.2 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$.

Максимальная среднесуточная эмиссия CO_2 отмечена из черноземов дисперсно-карбонатных и агрочерноземов дисперсно-карбонатных в конце июня, когда оптимальные температура и влажность совпадали. На целине показатель составлял 24.4 г, на пашне – 19.1 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$. В летний период, когда температура пахотного слоя достигала 21–25°C и после выпадения осадков, отмечали 2-й пик эмиссии CO_2 из черноземов дисперсно-карбонатных (22.5 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$), из агрочерноземов дисперсно-карбонатных – 17.2 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$. Было отмечено, что максимальную эмиссию CO_2 из черноземов квазиглеевых наблюдали в конце июня, что достигало 20.5 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ и из агрочерноземов квазиглеевых – 14.1 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$.

Во второй половине августа наблюдали уменьшение скорости выделения CO_2 : из черноземов дисперсно-карбонатных – до 9.4 г, из агрочерноземов дисперсно-карбонатных – до 5.1 г, из черноземов квазиглеевых – до 7.9 г и из агрочерноземов квазиглеевых – до 7.8 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$, что объясняется понижением температуры почвы. Различия полученных данных эмиссии CO_2 из почв на типовом уровне свидетельствуют о разном содержании гумуса в почвах и в зависимости от вида угодья.

В конце августа в черноземах дисперсно-карбонатных отмечено небольшое увеличение эмиссии углекислого газа, которое затем снизилось в связи с тем, что биологические процессы в почве постепенно снижались. На черноземе квазиглеевом в это время отмечали первые осенние заморозки. Под действием резких перепадов температуры и влажности происходило отмирание мелких корней и отдельных микробных клеток, и показатель эмиссии CO_2 снижался.

Повторное прогревание почвы в сентябре на дисперсно-карбонатных и квазиглеевых черноземах вызвало незначительный подъем эмиссии CO_2 из почвы, которое, вероятно, было связано с разложением свежих растительных остатков, поступивших в почву.

В 2019 г. в черноземах дисперсно-карбонатных интенсивность эмиссии CO_2 имела один пик в середине сезона с постепенным снижением показателя в холодные периоды, в черноземах квазиглеевых кривая продуцирования углекислоты характеризовалась многовершинной кривой (рис. 1). Например, в мае и первой декаде июня количество продуцируемой углекислоты из черноземов дисперсно-карбонатных менялось в пределах 6.1–15.2 г CO_2 и из агрочерноземов дисперсно-карбонатных – 2.5–9.9 г CO_2 , из черноземов квазиглеевых – 6.8–8.0 г CO_2 и агрочерноземов квазиглеевых – 4.8 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$.

До середины июля в черноземах дисперсно-карбонатных происходило постепенное нарастание эмиссионной составляющей. В это время создавались благоприятные условия для активной деятельности почвенного микробного комплекса, слой 0–20 см почвы прогревался до 21–22°C, влажность почвы достигала 9.4 и 17.6% на пашне и целине соответственно (рис. 2). Увеличивалось дыхание корней, что приводило к высоким показателям эмиссии углекислоты из черноземов. В этом случае наблюдали наибольшие показатели продуцирования углекислоты за весь вегетационный период – 26.9 – на целине и 24.1 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ – на пашне. По мере снижения температуры почвы интенсивность ее дыхания к концу периода активной вегетации растений значительно снижалась. В августе этот показатель варьировал в пределах 5.1–11.1 на пашне и от 9.4 до 17.3 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ – на целине. Далее следовал значительный спад эмиссии, составлявший из черноземов дисперсно-карбонатных 7.6–5.2 и из агрочерноземов дисперсно-карбонатных 4.7–3.4 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ и находившийся в этих пределах до октября.

Из черноземов квазиглеевых в конце июня интенсивность продуцирования углекислоты была равна 12.0 г CO_2 , из агрочерноземов квазиглеевых – 11.1 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$. Максимальные показатели среднесуточной эмиссии зафиксированы во второй половине июля из черноземов

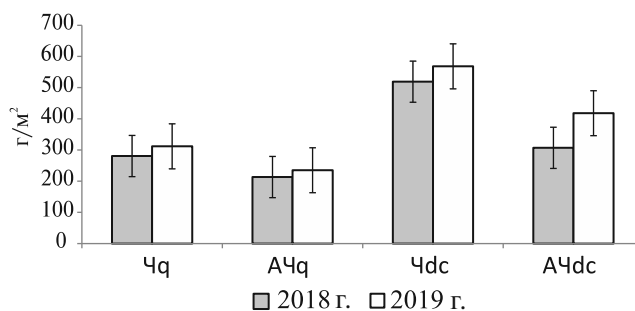


Рис. 3. Суммарное выделение углекислоты из черноземов за вегетационный сезон 2018–2019 гг.

Таблица 3. Вариационно-статистическая характеристика эмиссии CO₂ из черноземов

	Чq	АЧq	Чq	АЧq	Чdc	АЧdc	Чdc	АЧdc
	2018 г.		2019 г.		2018 г.		2019 г.	
Среднее	9.4	5.7	9.8	8.9	13.1	9.6	14.2	9.9
Коэффициент вариации	58.5	63.1	28.2	37.1	45.0	63.6	51.9	67.6
Стандартное отклонение	5.5	3.6	2.7	3.2	5.8	6.1	7.3	6.7
Доверительный интервал	5.7–13.1	3.3–8.1	8.0–11.5	6.5–11.2	9.8–16.3	6.2–13.1	10.1–18.3	6.2–13.7

Примечание. Чq – чернозем квазиглеевый, Чdc – чернозем дисперсно-карбонатный, АЧq – агрочернозем квазиглеевый, АЧdc – агрочернозем дисперсно-карбонатный.

квазиглеевых – 13.6–14.9 г CO₂ и из агрочерноземов квазиглеевых – 13.4–14.7 г CO₂/м²/сут. Далее интенсивность эмиссии CO₂ в связи со снижением биологической активности почв и наступлением низких температур уменьшалась.

Суммарные потери углерода в виде углекислоты из исследованных почв за 2 вегетационных сезона позволили определить их вклад в уровень CO₂ в атмосфере. Потеря углерода за вегетационный период 2018 г. из черноземов дисперсно-карбонатных составила 519 г CO₂/м² и агрочерноземов дисперсно-карбонатных – 307 г, из черноземов квазиглеевых – 281 г и из агрочерноземов квазиглеевых – 213 г CO₂/м² (рис. 3).

Суммарное выделение CO₂ из почв за вегетационный период 2019 г. было значительно больше, чем в 2018 г. и составило из черноземов дисперсно-карбонатных 568 г CO₂/м², из агрочерноземов дисперсно-карбонатных – 418 г, из черноземов квазиглеевых – 312 г и из агрочерноземов квазиглеевых – 235 г CO₂/м².

Из пахотных почв суммарная эмиссия CO₂ за сезон была значительно меньше, чем из целинных. Это можно объяснить различиями в условиях окружающей среды, такими как изменение биологической активности и круговорота веществ. Пахотные почвы теплее в летний период, зимой охлаждаются сильнее и глубже. Трансформация водного режима происходит в направлении уменьшения увлажнения и увеличения его контрастности в теплый период. Это обусловлено непродуктивным использованием влаги на пахотных угодьях за счет сдувания снега, бокового стока талых вод и физического испарения.

Температура почвы является ключевым фактором, определяющим количество эмиссии CO₂ в мерзлотных экосистемах. Интенсивность эмиссии CO₂ значительно меньше из мерзлотных почв. В осенне-весенний период для холодных экосистем величина потока CO₂ зависела от температуры почвы, в то время как в летний период – от влажности. В соответствии с исследованиями

[17], климат генетических горизонтов в почвах мерзлотной и холодной формации оказывает влияние на биологическую активность и эмиссию CO₂ из почвы. Закономерен вывод о том, что мерзлотные почвы менее активны с биологической точки зрения, чем аналогичные немерзлотные почвы.

В исследовании [18] была изучена активность выделения углекислого газа из черноземов квазиглеевых в долине р. Амги. Максимальное выделение углекислоты под целиной было обнаружено в конце июня и оставило 16.8–18.0 г CO₂/м²/сут. В июле отмечали снижение эмиссии CO₂ до 10.8–12.0 г CO₂/м²/сут, и она держалась на одном уровне. В условиях пара интенсивность эмиссии CO₂ была самой высокой в начале сезона и постепенно уменьшалась от 10.8 до 7.2–8.4 г CO₂/м²/сут. Эти данные согласуются с нашими результатами.

В Кулундинской степи Северного Казахстана интенсивность продуцирования CO₂ черноземами южными составляет 18.4–35.5 г CO₂/м²/сут [19]. Указанные данные различаются с исследованными черноземами, что связано с комплексом региональных погодных-климатических и гидротермических условий.

На всех экспериментальных площадках в вегетационные сезоны 2018–2019 гг. потоки CO₂ из почвы достоверно различались в зависимости от даты измерения, о чем свидетельствовали высокие коэффициенты вариации для черноземов дисперсно-карбонатных ($V = 45–67\%$) и черноземов квазиглеевых ($V = 28–63\%$) (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты наблюдений за интенсивностью продуцирования углекислоты почвой указывали на значительную изменчивость процесса дыхания почвы на протяжении вегетационного периода. Минимум эмиссии CO₂ в начале вегетации был связан с воздействием пониженных температур почв, максимум чаще отмечали после выпадения

осадков. Пики эмиссии CO₂ совпадали с повышением температуры и влажности с июня до начала августа, в условиях недостатка легкодоступной влаги, с изменением режима увлажнения.

Из пахотных почв суммарная эмиссия CO₂ была значительно меньше, чем из целинных, это объясняется особенностями условий агрогенной среды. Для черноземов квазиглеевых юга Витимского плоскогорья выявлены низкие показатели сезонной эмиссии CO₂, обусловленные непродолжительным вегетационным периодом, низкой биологической активностью, недостаточным прогреванием почвогрунтов.

Выявлена тесная связь между дыханием почвы и температурой, особенно в осенне-весенние периоды, что подчеркивает приоритетную роль тепла в мерзлотных почвах. Величина продуцирования диоксида углерода мерзлотными почвами в большей степени определяется их температурным режимом, где сдерживающим факторам выступает присутствие мерзлоты. В степях интенсивность продуцирования углекислоты привязана к периодам выпадения осадков внутри теплого сезона.

Суммарный показатель потерь углерода из почв в виде CO₂ за вегетацию уменьшался в ряду: целина > пашня, холодные почвы > мерзлотные, что связано с различиями в скорости минерализации, качестве и количестве органического вещества, определяемым гидротермическим режимом почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларионова А.А., Курганова И.Н., Лонес де Гереню В.О., Золотарева Б.Н., Евдокимов И.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата // Почвоведение. 2010. № 2. С. 186–195.
2. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестн. РАН. 2006. Т. 76. № 1. С. 14–29.
3. Rustad L.E., Huntington T.G., Boone R.D. Controls on soil respiration: Implications for climate change // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1023/A:1006255431298>
4. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 207 с.
5. Post W.M., Mann L.K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation // Soils Greenhouse Effect / Ed. A.F. Bouwman. N.Y.: John Wiley, 1990. P. 401–406.
6. Davidson E.A., Ackerman I.L. Changes in carbon inventories following cultivation of previously untilled soils // Biogeochemistry. 1993. V. 20. P. 161–193.
7. Титлянова А.А., Наумов А.В. Потери углерода из почв Западной Сибири при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1995. № 11. С. 1357–1362.
8. Курганова И.Н., Лонес Д.Г., Инн С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ состояния почв и запасы углерода в лесной растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. С. 169.
<https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
9. Кудеяров В.Н., Курганова И.Н. Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, общие оценки // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1112–1121.
10. Карелин Д.В., Замолдчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
11. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
12. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
13. IUSS Working Group WRB. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. 2022. Available online: https://wrb.isric.org/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf (accessed 27 September 2023).
14. Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолдчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
15. Дугаров В.И., Куликов А.И. Агрофизические свойства мерзлотных почв. Новосибирск: Наука, СО, 1990. 255 с.
16. Худяков О.И. Климат генетических горизонтов и его влияние на эмиссию CO₂ мерзлотных и холодных почв // Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2004. С. 106–110.
17. Волотовская Т.Н., Саввинов Г.Н. Биологическая активность мерзлотных лугово-черноземных почв долины р. Амга // Проблемы гидротермики мерзлотных почв. Новосибирск: Наука, СО, 1988. С. 37–40.
18. Мендешев А., Жердева С.В. Динамика выделения CO₂ орошаемыми степными почвами Северного Казахстана // Изв. АН КазССР. Сер. биол. 1989. № 1. С. 77–79.

CO₂-Emission from Arable Chernozems of Western Nransbaikalia**E. O. Chimitdorzhieva^{a,*}, Yu. B. Tsybenov^a, G. D. Chimitdorzhieva^a**

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

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

CO₂-Emissions from agrochernozems of dispersed carbonate Tugnui basin and agrochernozems of quasi-clay Yeravninsky basin of western Transbaikalia were studied. To compare CO₂-emissions from soils, the virgin land variants of the same name are taken. The aim of the study is to quantify and comparatively evaluate the production of carbon dioxide from arable chernozems with contrasting temperature and moisture conditions. The measurement of CO₂ fluxes from the soil was carried out by a closed chamber method with a portable infrared CO₂ gas analyzer AZ 7752 (AZ Instrument Corp., Taiwan). CO₂-emissions were largely dependent on hydrothermal conditions. Its minimum at the beginning of the growing season was associated with the effect of low soil temperatures, the maximum was more often noted after precipitation. The peaks of CO₂-emissions coincided with an increase in temperature and humidity from June to early August, in conditions of a lack of readily available moisture, and were also associated with a humidification regime. The limiting factor of the CO₂ flux for quasi-clay chernozems was the soil temperature, for dispersed carbonate chernozems – humidity. It has been established that the total CO₂-emission in arable soils is significantly less than in virgin soils, this is explained by the peculiarities of the agrogenic environment. Arable soils are warmer in summer, and they cool down more and deeper in winter. The transformation of the water regime occurs in the direction of reducing moisture and increasing its contrast during the warm period. The total carbon loss index varies in a series: dispersed-carbonate chernozem → quasi-clay chernozem, virgin soil → arable land.

Keywords: CO₂-emission, agrochernozems, permafrost, Transbaikalia.

УДК 631.81:631.416:631.433(430)

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА БАЛАНС ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ И ЭМИССИЮ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ГЕРМАНИИ

© 2024 г. С. В. Митрофанов^{1,*}, Е. В. Серова¹, Н. В. Орлова¹¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”
109028 Москва, Покровский б-р, 11, Россия

*E-mail: smitrofanov@hse.ru

Изучили влияние применения удобрений на баланс макроэлементов и устойчивость земледелия в Германии. Установлено, что баланс основных элементов питания в почве поддерживается на бездефицитном уровне благодаря систематическому и сбалансированному использованию минеральных и органических удобрений. Однако в настоящее время правительство ФРГ активно внедряет политику, направленную на сокращение использования традиционных форм органических и минеральных удобрений, внедряя альтернативные способы обеспечения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур. Целью такой политики является снижение негативного воздействия агрохимикатов на окружающую среду и эмиссию парниковых газов, в частности.

Ключевые слова: устойчивое земледелие Германии, удобрения, баланс элементов питания растений, эмиссия парниковых газов.

DOI: 10.31857/S0002188124050078, EDN: CYWTTL

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных глобальных вызовов, связанных с устойчивым развитием и обеспечением продовольственной безопасности, проблема удовлетворения пищевых потребностей растущего мирового населения становится все более актуальной [1–3]. Эти вызовы обусловлены изменением климата, нестабильностью рынков и ограниченным доступом к пище. В контексте столь значимых глобальных проблем, использование удобрений играет критическую роль в повышении урожайности сельскохозяйственных культур и улучшении пищевой ценности получаемых продуктов [4–6]. Однако следует отметить, что интенсивное использование удобрений может привести к серьезным проблемам, таким как загрязнение почвы, воды и воздуха, а также угрозе биоразнообразию в природе и здоровью людей [7–11]. Процессы нитрификации, денитрификации и аммонификации, которые связаны с использованием удобрений, являются крупным источником эмиссии оксида азота. Кроме того, разложение органических веществ в сточных водах и почвах, вызванное использованием удобрений, может способствовать эмиссии метана [12–16].

В связи с этим разработка мер государственной политики, эффективных стратегий в области управления и применения удобрений является неотъемлемой частью устойчивого сельского хозяйства и охраны окружающей среды [17, 18].

Данная статья входит в цикл работ, целью которого является оценка влияния сельскохозяйственного применения удобрений на баланс макроэлементов и устойчивость земледелия основных стран-производителей сельскохозяйственной продукции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении данного исследования применяли общенаучные методологические подходы и методы экономической статистики. В основе информационной базы лежат данные из различных источников, таких как FAOSTAT – база данных Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций, а также данные Международной ассоциации производителей удобрений (IFA) и Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Азот. Согласно данным FAOSTAT, в земледелии Германии в период 2011–2020 гг. ежегодно, кроме 2009 г., отмечали положительный баланс азота в почве. В среднем за данный период положительный баланс азота составлял 12.5 кг/га (рис. 1).

Основным источником поступления азота в пахотные земли страны были минеральные удобрения. В период 2001–2007 гг. внесение азота в виде

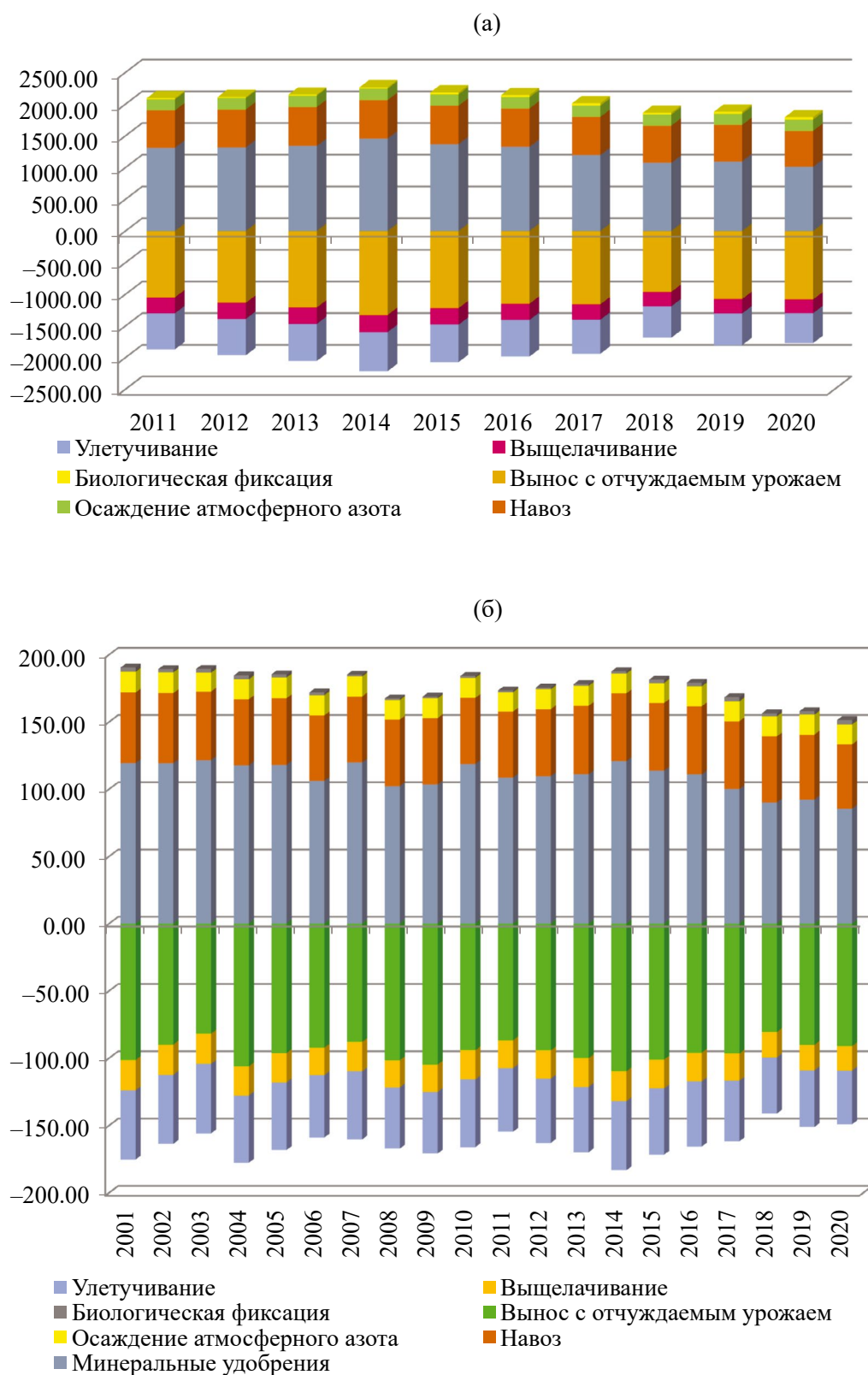


Рис. 1. Баланс азота в земледелии Германии: (а) – тыс. т/год, (б) – на единицу площади, кг/га.

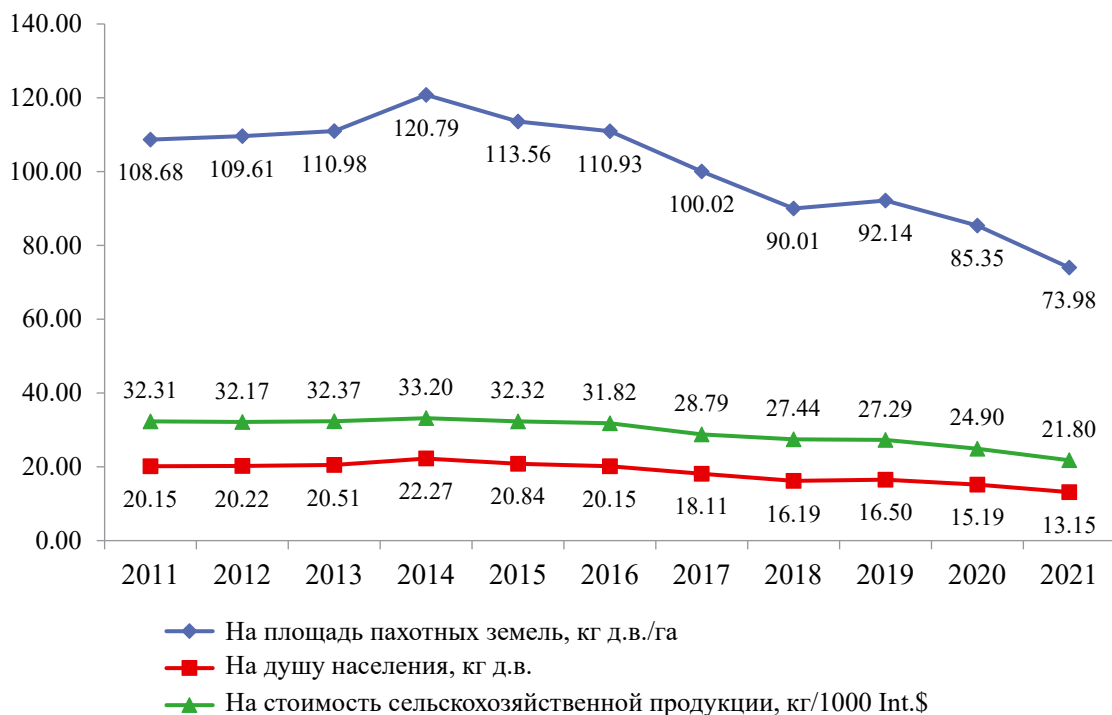


Рис. 2. Динамика внесения азотных удобрений в Германии (2011–2021 гг.).

минеральных удобрений составляло в среднем 117.3 кг д.в./га (рис. 2).

Однако с началом мирового экономического кризиса применение данных удобрений сократилось, достигнув минимума 102.3 кг д.в./га в 2008 г. Начиная с 2010 г., после снижения негативного действия кризиса объемы применения азотных удобрений начали расти и достигли пика в 120.8 кг д.в./га в 2014 г.

Начиная с 2015 г., можно было наблюдать нисходящий тренд применения азотных минеральных удобрений на пахотных угодьях, который в период 2014–2021 гг. составил – 5.94%. Данный факт связан с проводимой в стране политикой по сокращению применения удобрений с целью снижения негативного действия химикатов, в данном случае нитратов, на окружающую среду и человека.

Правительством Германии принята Национальная стратегия устойчивого развития. Одна из ее основных целей – достижение более устойчивого и экологически ответственного сельского хозяйства. Эта стратегия была разработана при участии Берлинского университета имени Гумбольдта и включает в себя ряд мероприятий, направленных на снижение использования химических удобрений в сельском хозяйстве.

Также стоит отметить законодательные акты, ориентированные на сокращение применения азотных минеральных удобрений. Например, Закон об удобрениях (Düngemittelgesetz) был принят с целью регулирования использования удобрений и минимизации

негативного воздействия на окружающую среду. Закон устанавливает стандарты и требования к использованию удобрений, включая установление предельных величин содержания соединений азота в почве и питьевой воде. Кроме того, Европейский союз также принимает меры для сокращения применения азотных минеральных удобрений. Например, Директива ЕС по нитратам устанавливает меры для предотвращения загрязнения воды нитратами из сельскохозяйственного производства. Германия должна соблюдать эти нормативы и предпринимать меры по их исполнению.

Баланс фосфора в земледелии страны в период 2011–2020 гг. являлся бездефицитным. В период 2001–2007 гг. баланс фосфора в почве на единицу площади в среднем составлял +52.1 кг/га (рис. 3).

Однако в условиях мирового экономического кризиса в стране было сокращено применение минеральных удобрений, в связи с чем этот показатель начал снижаться, минимальным он был в 2008 г. – 0.18 кг/га. В 2010 г. применение фосфорных минеральных удобрений вернулось на уровень 2001–2007 гг., ввиду чего баланс элемента достиг +5.3 кг/га. В период 2011–2020 гг. показатель стабилизировался на уровне +4.1 кг/га.

В Германии основным источником поступления фосфора в почву являются органические удобрения. В период 2001–2007 гг. с навозом в почву поступало в среднем 61–1% от внесенного P_2O_5 ,

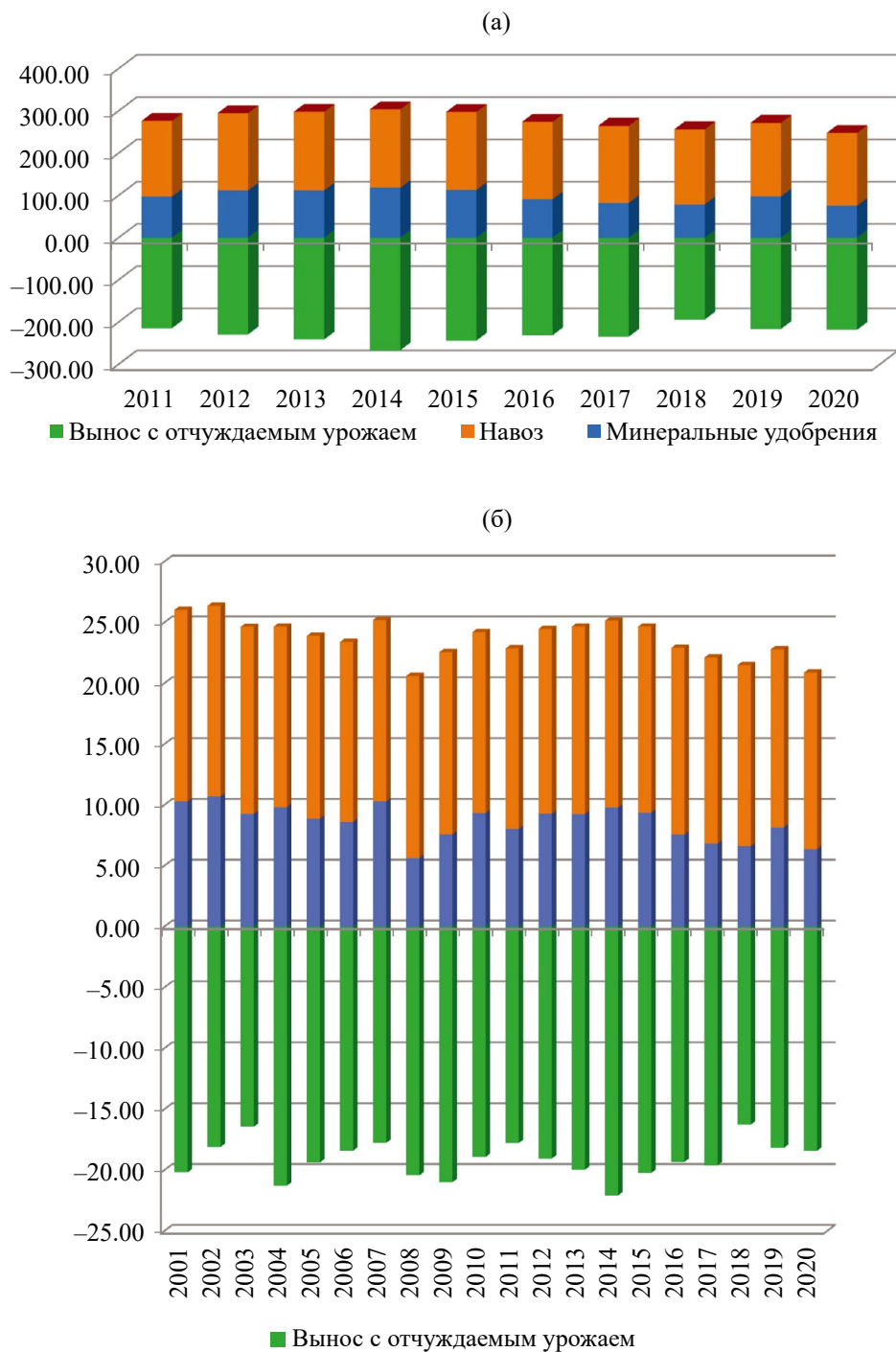


Рис. 3. Баланс фосфора в земледелии Германии: (а) – тыс. т/год, (б) – на единицу площади, кг/га.

в 2008–2009 гг. – порядка 70.0%, начиная с 2010 г. – в среднем 64.8%. Однако объемы производства и применения органических удобрений животного происхождения в стране ежегодно снижаются, что в период 2001–2020 гг. составило –0.4%. Данный факт связан с сокращением поголовья скота в Германии в рамках выполнения Парижского соглашения

по климату, а также проведения политики по достижению углеродно-нейтральной экономики.

В соответствие с данными сельскохозяйственной переписи, проведенной Федеральным статистическим управлением Германии (Destatis) в 2020 г., установлено, что в сравнении с 2010 г. количество занятых животноводством сельскохозяйственных предприятий

снизились на 22% — с 216.1 до 168.8 тысяч. Число ферм с крупным рогатым скотом за 10 лет снизилось с 144.9 до 108.0 тысяч. поголовье крупного рогатого скота за этот же период сократилось с 12.5 до 11.3 млн голов. В то же время количество молочных ферм снизилось на 40% до 54.3 тыс., на которых насчитывается 3.9 млн дойных коров. Вместе с тем отмечено, что общее число поголовья дойных коров выросло из-за того, что среднее число содержащихся на ферме коров увеличилось с 46 до 72.

На 2020 г. в Германии насчитывалось ≈ 31.9 тыс. свиноферм, что на 47% меньше, чем было в 2010 г. — 60.1 тыс. Однако укрупнение предприятий позволило сократить темпы снижения поголовья. За этот период оно уменьшилось с 27.6 до 26.3 млн голов.

Специалисты отмечают, что численность кур и кур-несушек в стране сильно меняется из-за коротких производственных циклов и поэтому не является репрезентативной. Тем не менее, количество птицеферм сократилось в период 2011–2020 гг. примерно на 15% — с 58.2 до 49.4 тыс. Однако по состоянию на 2020 г., в Германии количество мест содержания кур составило 186.3 млн что на 1.2% больше, чем в 2016 г. — 184.1 млн мест.

Также по данным, представленным на рис. 4, можно сделать вывод о тенденции к снижению объемов применения фосфорных минеральных удобрений.

В 2021 г. в пахотные земли вносили 8.7 кг д.в./га, что на 63.2% меньше, чем в 2001 г., уменьшение в период 2001–2021 гг. составило — 4.64%. Это способствовало снижению применения P_2O_5 на душу населения на 64.6% — с 3.87 до 1.37 кг д.в./человека, на стоимость сельскохозяйственной продукции — с 6.28 до 2.28 кг/1000 Int.\$ (на 63.7%).

В складывающихся условиях сокращения объемов применения традиционных органических и минеральных удобрений в стране проводят исследования по глубокой переработке навоза и извлечению из него фосфора, использованию альтернативных источников фосфора: бытовых сточных вод, сточных вод с очистных сооружений в сельскохозяйственных предприятиях, разработке технологий, повышающих биодоступность P_2O_5 в существующих запасах почв.

Баланс калия в земледелии Германии в период 2001–2020 гг. был положительным. В период 2001–2006 гг. баланс калия в почве на единицу площади в среднем составлял +57.1 кг/га (рис. 5).

Баланс калия имел медленный нисходящий тренд, что во многом связано со снижением объемов применения калийных минеральных удобрений (рис. 6).

Данный факт обусловлен ростом цен на удобрения ввиду затянувшихся переговоров между производителями калийных удобрений и Китаем, являющимся крупнейшим импортером данных удобрений.

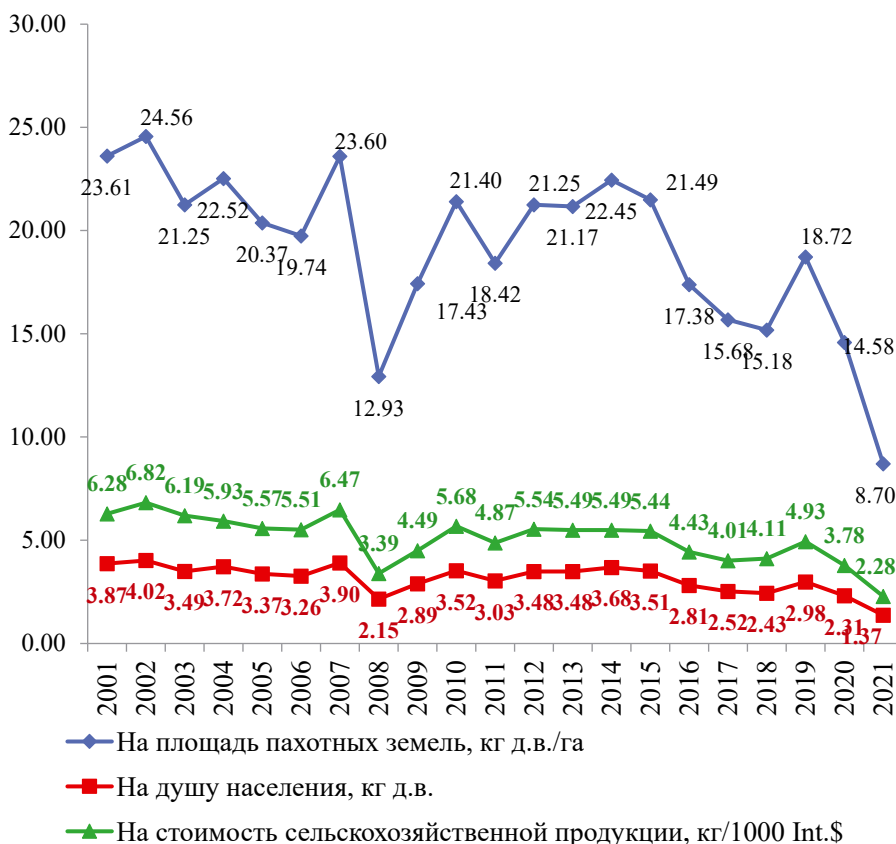


Рис. 4. Динамика внесения фосфорных удобрений в Германии (2001–2021 гг.).

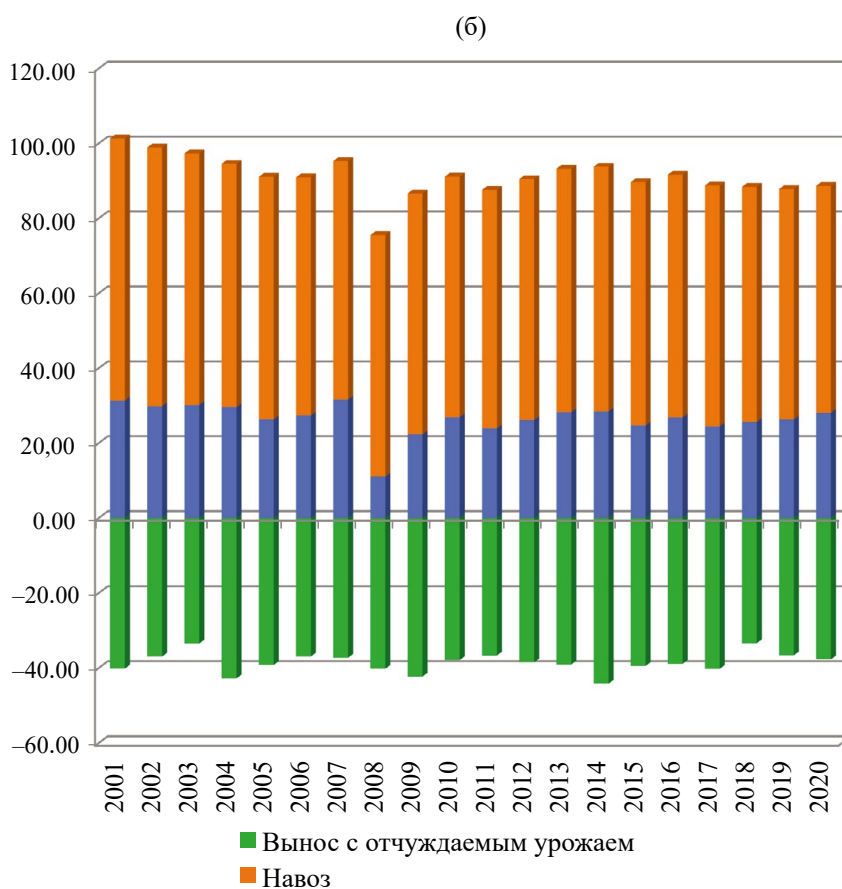
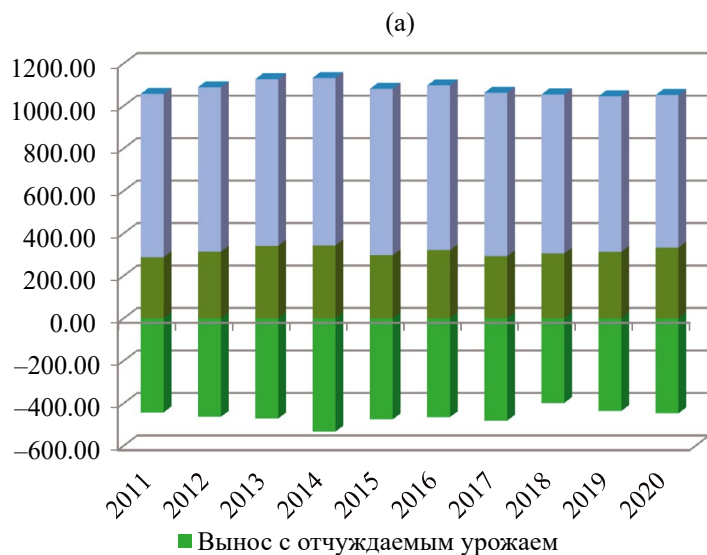


Рис. 5. Баланс калия в земледелии Германии: (а) – тыс. т/год, (б) – на единицу площади, кг/га.

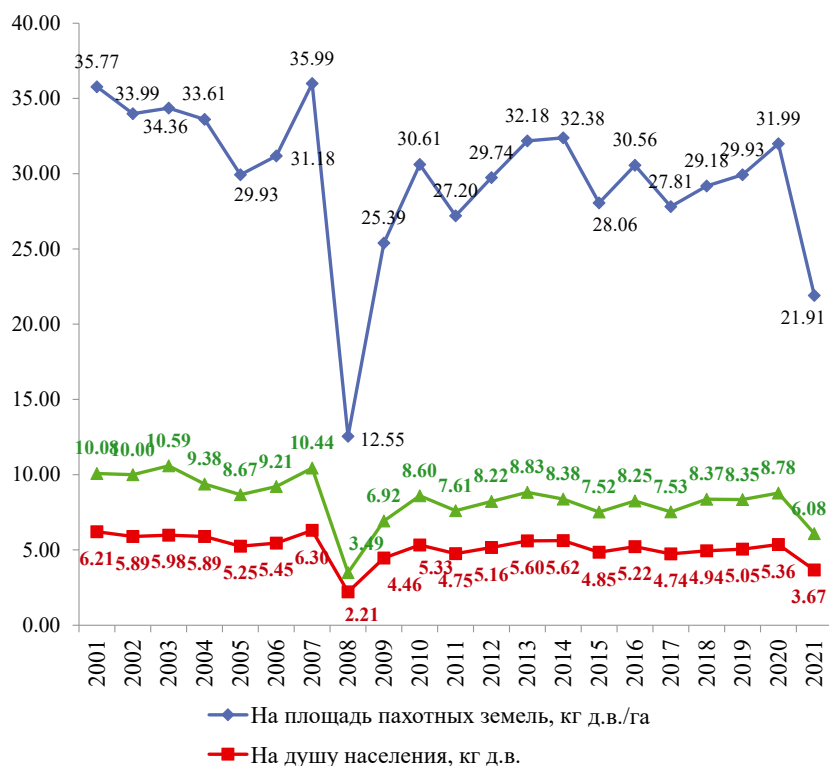


Рис. 6. Динамика внесения калийных удобрений в Германии (2011–2021 гг.).

В 2007 г. в Германии произошел рост применения минеральных удобрений — на 15.4% к 2006 г., что было связано с мировым кризисом цен на продовольствие 2007–2008 гг. В 2007 г. наблюдали беспрецедентный рост цен на сельскохозяйственные товары. По итогам года, индекс S&P GSCI Agriculture, отражающий динамику цен на 7 важнейших видов сельхозпродукции, вырос на 41% — рекорд за всю историю наблюдений. Причин столь бурного роста было несколько: среди основных можно выделить стремительное развитие индустрии биотоплива, плохие погодные условия, вызвавшие неурожай пшеницы в Австралии и Канаде, высокий спрос на продовольствие со стороны развивающихся стран, а также оживление спекулятивного интереса к данному сектору товарных рынков, связанное со сравнительно слабой его динамикой в предыдущие годы, а также со стремлением инвесторов избежать инфляционные риски [19].

В 2008 г. с началом мирового экономического кризиса в стране произошел спад применения минеральных удобрений до 11.0 кг д.в./га, в связи с чем баланс калия сократился до 35.3 кг д.в./га. В 2009 г. произошло увеличение применения калийных минеральных удобрений до 25.4 кг д.в./га. В период 2011–2020 гг. этот показатель стабилизировался на уровне 30.0 кг д.в./га.

Однако в 2021 г. произошел резкий спад применения калийных удобрений до 21.9 кг д.в./га (на 31.5%

к 2020 г.), что связано с рядом причин, основными из которых были удорожание удобрений, произведенных внутри страны, ввиду роста цен на энергоносители, в первую очередь на природный газ; соблюдение требований к использованию минеральных удобрений и пестицидов в рамках Европейской зеленой сделки.

Общий вклад сельскохозяйственного сектора Германии в эмиссию парниковых газов оценивали в 9% от общего объема выбросов в 2020 г. Правительство страны относит агропромышленный комплекс к трудно декарбонизируемым отраслям экономики. Однако принимаемые в Германии меры, в первую очередь по сокращению поголовья скота, позволили сократить за последние годы эмиссию газов на 24% по отношению к 1990 г. Существенный вклад в сокращение выбросов парниковых газов внесли изменения в землепользовании страны — 4.4% [20].

Закон Германии о борьбе с изменением климата устанавливает бюджет выбросов для сельскохозяйственного сектора в размере 56 млн т эквивалента CO₂ в 2030 г. (в 2020 г. — 70 т). Программа действий по изменению климата до 2030 г. включает такие меры, как сокращение применения азотных удобрений, усиление ферментации навоза, расширение органического земледелия, сокращение выбросов парниковых газов в животноводстве, а также продвижение потенциала

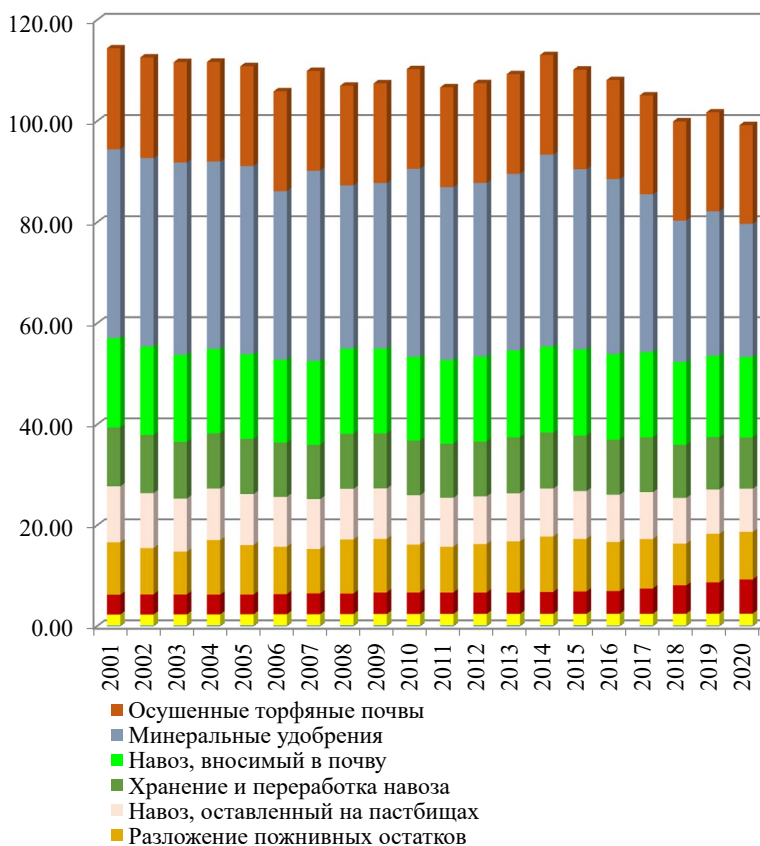


Рис. 7. Структура выбросов закиси азота в ходе сельскохозяйственной деятельности Германии, кт.

сохранения углерода в сельскохозяйственных угодьях, например, при накоплении гумуса.

Благодаря данным мерам общий объем эмиссии оксида азота в ходе сельскохозяйственного производства сократился на 12.2% – с 113.1 кт в 2014 г. до 99.2 кт в 2020 г. (рис. 7), прежде всего за счет сокращения выбросов от минеральных удобрений (с 38.0 до 26.4 кт), а также хранения, переработки и внесения навоза, а также навоза, остановленного на пастбищах (с 37.0 до 34.7 кт).

Однако в период 2001–2020 гг. отмечена тенденция к увеличению эмиссии N_2O от утилизации отходов агропродовольственных систем и внутрихозяйственного использования энергии – на 5.8 и 8.7% соответственно.

Выбросы закиси азота от возделывания сельхозкультур на торфяных почвах, сжигания и разложения растительных остатков являются стабильными и составляли в период 2001–2020 гг. в среднем 19.7, 0.12 и 9.75 кт соответственно.

Согласно данным FAOSTAT, благодаря сокращению поголовья скота в 2016 г. произошел слом возрастающего тренда эмиссии метана (рис. 8а).

В 2020 г. суммарные выбросы метана от сельскохозяйственного производства сократились по отношению к 2015 г. на 122.0 кт (на 7.4%), в том числе: от кишечной ферментации сельскохозяйственных животных и птиц – на 100.2 кт, хранения и переработки навоза – на 22.9 кт. В данный период также отмечают тенденцию к сокращению эмиссии метана от сжигания растительных остатков и внутрихозяйственного использования энергии – на 12.3 и 10.5% соответственно.

Однако объемы выбросов CH_4 от утилизации отходов агропродовольственных систем в период 2010–2020 гг. ежегодно нарастали – с 220.6 кт в 2010 г. до 278.8 кт в 2020 г. (на 20.9%).

Суммарные объемы эмиссии углекислого газа в период 2010–2020 гг. были практически неизменными и находились в пределах 36.9–37.3 тыс. кт (рис. 8б), в том числе в среднем по годам: от внутрихозяйственного использования энергии – 7.5, утилизации отходов агропродовольственных систем – 1.8, выращивания сельхозкультур на торфяных почвах – 27.7 тыс. кт.

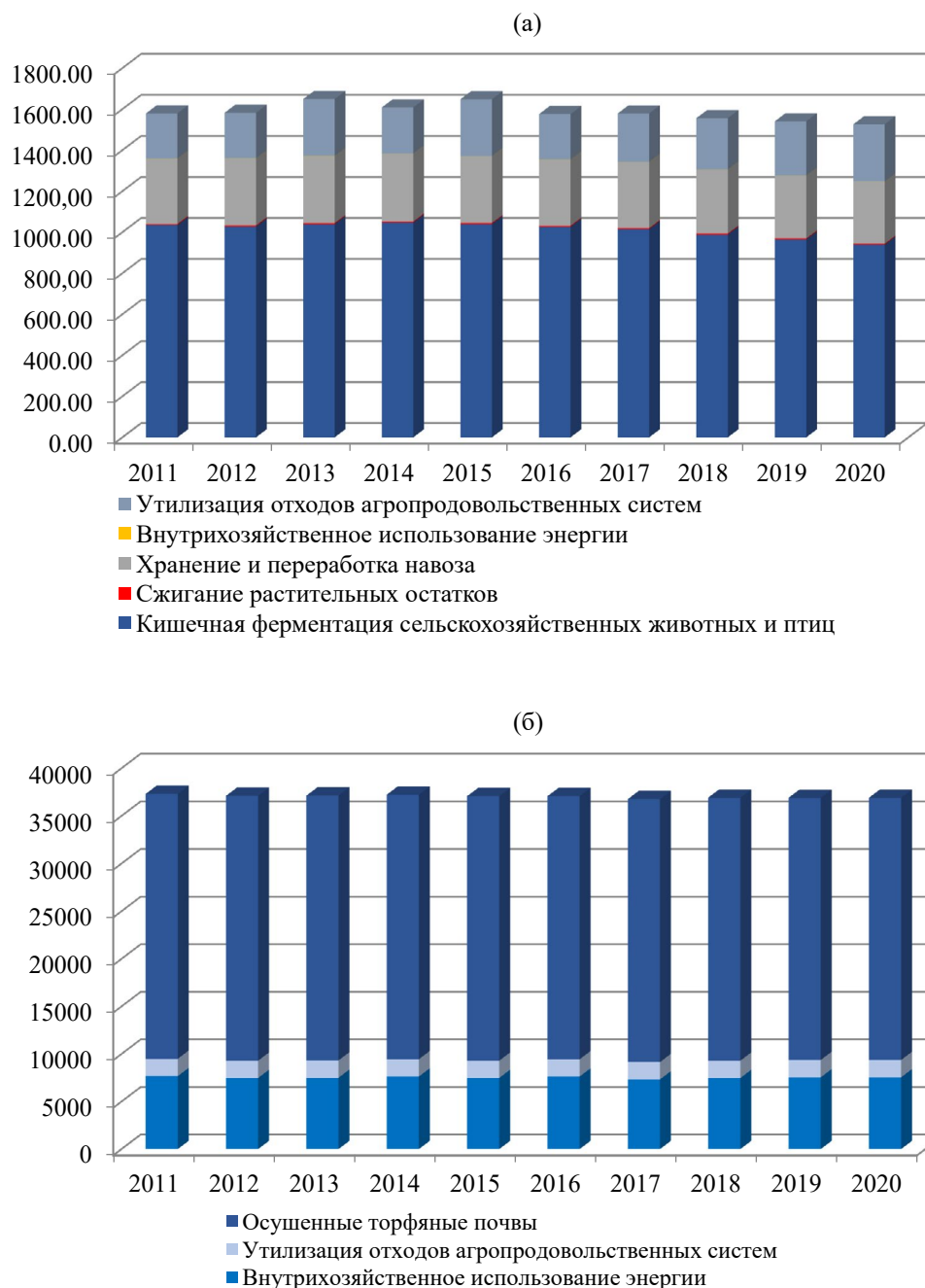


Рис. 8. Выбросы парниковых газов в ходе сельскохозяйственной деятельности Германии: (а) – метана, (б) – углекислого газа, кт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Политика, проводимая правительством Германии в области применения удобрений, имеет важное значение для охраны окружающей среды и достижения устойчивого развития в сельском хозяйстве. В последние годы страна предприняла ряд мер для уменьшения негативного воздействия удобрений на окружающую среду и водные ресурсы. Результаты этой

политики уже начали давать позитивные результаты, в частности, наблюдают сокращение эмиссии оксида азота и метана. Однако необходимо отметить, что эти результаты достигаются не без вызовов. Некоторые фермеры сталкиваются с трудностями в адаптации к новым методам и ограничениям, связанным с применением удобрений. Это требует дополнительной поддержки и обучения со стороны правительства и сельскохозяйственных организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FAO. The State of food security and nutrition in the World. Rome, 2018. URL: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3017en> (дата обращения: 15.08.2023).
2. United Nations. Transforming our World: the 2030 Agenda for sustainable development. URL: https://www.icnl.org/wp-content/uploads/A_RES_70_1_E.pdf (дата обращения: 15.08.2023).
3. Митрофанов С.В., Орлова Н.В. Использование биомодификации удобрений с целью повышения устойчивости растениеводства // *Агрохим. вестн.* 2023. № 1. С. 23–30.
4. Tilman D. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture // *Proceed. Nat. Acad. Scie.* 2011. V. 108. № 50. P. 20260–20264.
5. Cordell D. The story of phosphorus: Global food security and food for thought // *Global Environ. Change.* 2009. V. 19. № 2. P. 292–305.
6. Митрофанов С.В., Орлова Н.В., Благов Д.А., Панферов Н.С., Тетерин В.С. Анализ тенденций развития тукосмесительного оборудования // *Аграрн. наука.* 2023. № 6. С. 98–110.
7. Bouwman A.F. Exploring changes in world ruminant production systems // *Global Biogeochem. Cycl.* 2000. V. 14. № 3. P. 1107–1121.
8. Galloway J.N. Nitrogen cycles: Past, present, and future // *Biogeochemistry.* 2008. V. 70. № 2. P. 153–226.
9. Zhang F.S. Managing nutrient for both food security and environmental quality in China // *J. Agricult. Environ. Ethics.* 2015. V. 28. № 5. P. 833–857.
10. Sharpley A.N. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment // *J. Environ. Qual.* 2009. V. 38. № 5. P. 1939–1948.
11. Guzman G.I. Fertilizer management effects on water quality and crop production // *J. Environ. Qual.* 20–15. V. 44. № 6. P. 1859–1871.
12. Davidson E.A. Nitrous oxide emissions from agricultural fields: assessment, measurement and mitigation // *Plant and Soil.* 2000. V. 219. № 1–2. P. 249–252.
13. Mandell S.V. Global crop nitrogen use efficiency as affected by nitrogen deposition // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. № 4. 044013.
14. Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО) // *Агрохимия.* 2019. № 5. С. 3–20.
15. Кудеяров В.Н. Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России // *Агрохимия.* 2021. № 11. С. 3–15.
16. Yan X. Methane emissions from rice fields: quantification, mechanisms, and mitigation strategies // *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 2017. V. 241. P. 129–158.
17. Bouwman A.F. Exploring changes in world ruminant production systems // *Agricult. Syst.* 2002. V. 84. № 2. P. 121–153.
18. Sogbedji J.M. Nutrient management strategies to reduce environmental impact of fertilizers in agricultural soils: a review // *Agron. Sustain. Develop.* 2015. V. 35. № 4. P. 1217–1245.
19. Zhang X. The use of biodegradable fertilizers to improve crop yield and quality // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2020. V. 293. 106862. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106862>
20. Climate-friendly farming: The proposals of Germany's agriculture commission. URL: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/climate-friendly-farming-proposals-germanys-agriculture-commission> (дата обращения: 18.08.2023).

Impact of Fertilizer Use on the Balance of Essential Nutrients and Greenhouse Gas Emissions in Germany

S. V. Mitrofanov^{a, #}, E. V. Serova^a, N. V. Orlova^a

^a National Research University "Higher School of Economics",
Pokrovsky b-r, 11, Moscow 109028, Russia

[#] E-mail: smitrofanov@hse.ru

The effect of fertilizers on the balance of trace elements and the sustainability of agriculture in Germany was studied. It has been established that the balance of basic nutrients in the soil is maintained at a deficiency-free level due to the systematic and balanced use of mineral and organic fertilizers. However, the German Government is currently actively implementing policies aimed at reducing the use of traditional forms of organic and mineral fertilizers, introducing alternative ways to ensure soil fertility and crop yields. The aim of such a policy is to reduce the negative impact of agrochemicals on the environment and greenhouse gas emissions, in particular.

Keywords: sustainable agriculture in Germany, fertilizers, balance of plant nutrition elements, greenhouse gas emissions.

УДК 632.122.1:631.461.52:633.358

ВЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА МИКОРИЗАЦИЮ КОРНЕЙ БОБОВО-РИЗОБИАЛЬНОЙ СИМБИОСИСТЕМЫ ГОРОХА ПОСЕВНОГО (*Pisum sativum* L.)[§]

© 2024 г. Н. И. Воробьев¹, Я. В. Пухальский^{1,2,*}, Т. С. Азарова¹, С. И. Лоскутов^{2,3}, Ю. В. Лактионов¹, Ю. В. Косульников¹, А. И. Ковальчук¹, А. П. Кожемяков¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, ш. Подбельского, 3, Россия

²Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина
196605 Санкт-Петербург–Пушкин, Петербургское ш., 10, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок –
филиал ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова
191014 Санкт-Петербург, Литейный просп., 55, Россия

*E-mail: puhalskyyan@gmail.com

Изучили влияние микробного консорциума, состоящего из клубеньковой бактерии *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* штамм CIAM1079, ассоциативной ризобактерии *Variovorax paradoxus* штамм 5С-2 и арбускулярного гриба *Glomus* sp. 1Fo. на биомассу корней и формирование микоризной инфекции у различных генотипов гороха, выращенных на загрязненной тяжелыми металлами залежной дерново-подзолистой почве. Показано, что искусственная инокуляция растений в среднем способствовала увеличению параметров микоризации примерно в 4 раза. При этом в большинстве случаев это практически не влияло на интенсивность роста корневой системы растений на фоне загрязнения почв токсикантами. Использование метода нейросетевого анализа данных показало, что морфометрические показатели не были достоверным критерием оценки степени микоризации макросимбионта. Расчет индексов когнитивной значимости дал предпосылку создания программы оценки экохимических процессов, лежащих в основе интегрального взаимодействия симбиотических партнеров в условиях множественного симбиоза и стрессового влияния факторов внешней среды.

Ключевые слова: горох посевной (*Pisum sativum* L.), тяжелые металлы, симбиоз, везикулярно-арбускулярная микориза.

DOI: 10.31857/S0002188124050086, **EDN:** CYTCUS

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большую актуальность приобретает проблема загрязнения почв сельскохозяйственных угодий солями тяжелых металлов (ТМ) [1, 2]. Причем, как правило, эти загрязнения характеризуются полиэлементным типом [3]. Связано это в первую очередь с нерациональным применением

минеральных удобрений (в частности, фосфорных), а также осадков сточных вод, используемых в качестве нетрадиционных мелиорантов [4, 5].

Известно, что представители семейства Бобовых (Fabaceae) более чувствительны к воздействию ТМ, нежели, например, Мятликовые (Poaceae) или Капустные (Brassicaceae). При этом данные виды культивируются повсеместно и являются более экологически пластичными за счет способности к образованию множественного симбиоза с широким спектром почвенных микроорганизмов, в частности, с арбускулярными грибами, формирующими на их корневой системе везикулярно-арбускулярную микоризу (ВАМ) [6, 7]. Данный симбиоз взаимовыгоден обоим партнерам, поскольку микоризные грибы обеспечивают растения водой и минеральными веществами, в основном фосфором. Последний

[§] Работа проведена в рамках выполнения государственного задания № FGEW-2021-0004 “Выделение, изучение и скрининг перспективных штаммов симбиотических, ассоциативных бактерий и грибов арбускулярной микоризы, для создания высокоэффективных и технологичных биопрепаратов широкого спектра действия и разработки подходов к сочетанию комбинированных биопрепаратов на основе геномного анализа и отбор штаммов, обладающих комплекментарными наборами генов, ответственных за взаимодействие с растениями”.

играет важную роль в энергетическом обмене и особенно в таком энергозатратном процессе как азотфиксация [8]. Совместная инокуляция арбускулярными грибами и ризобактериями (Plant Growth Promoting Rhizobacteria – PGPR) также оказывает положительное действие на растения, главным образом за счет ингибирования развития грибных фитопатогенов [9]. Растения взамен выделяют в ризосферу различные низкомолекулярные органические соединения (экзометаболиты), используемые микробами в качестве дополнительного источника доступного углерода [10].

За счет улучшения общих (неспецифических) ответных реакций растительного организма к воздействию стрессов, связанных с повышением проницаемости мембран корневой системы для поступления в нее воды и растворенных в ней минеральных элементов, эктомикоризная колонизация также влияет на толерантность растений к ТМ, в частности, к токсичным ионам Cd, Cu, Pb, Ni, Zn [11]. Механизм влияния арбускулярных грибов на снижение аккумуляции токсикантов в растениях связан с возможностью их детоксикация внутри клеточных гиф ВАМ с участием сернистых соединений (тиолов). Проявление данного эффекта, напрямую зависит от выбора инокулянтов, поскольку устойчивость микроорганизмов к ТМ видоспецифична и может быть гораздо более высокой, чем у растений. Выделено лишь несколько линий грибов, относительно устойчивых к ТМ и относящихся к роду *Glomus*.

Способность хелатирования и иммобилизации ионов ТМ описана и для многих типичных представителей PGPR-бактериальной микрофлоры: *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* и др. [12, 13]. Воздействие арбускулярных грибов и ризобий на растение при совместной инокуляции будет сильно варьировать в зависимости от конечного выбора штаммов, формирующих микробный консорциум. Механизмы, лежащие в основе взаимного влияния микроорганизмов, остаются пока недостаточно детально изученными. Однако в большинстве случаев дополнительная инокуляция бобовых культур бактериальными штаммами проявляется в положительном аспекте, связанном с усилением процессов стимуляции роста и микоризации корневой системы растений, даже в отсутствие металл-индуцированного стресса.

Цель работы – оценка изменения формирования ВАМ на корнях бобово-ризобияльной симбиосистемы гороха посевного, выращенного на загрязненной ТМ почве при инокуляции микробным консорциумом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили разные генотипы гороха (*Pisum sativum* L.), полученные

из коллекции ФИЦ ВИГРР им. Н. И. Вавилова (табл. 1), а также 2 генотипа из коллекции ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии – дикая линия SGE и созданный на ее основе в результате мутагенеза этилметансульфонатом Cd-устойчивый генотип SGECdt [14].

Растения выращивали в эмалированных сосудах, заполненных 2.0 кг залежной дерново-подзолистой почвы слабой степени окультуренности. Агрохимическая характеристика почвы: pH_{KCl} 4.63 ± 0.62 , pH_{H_2O} 5.43 ± 0.32 , содержание гумуса – $1.47 \pm 0.01\%$, гидролитическая кислотность – 4.89 ± 0.02 мг-экв/100 г, сумма обменных оснований – 7.30 ± 0.70 мг-экв/100 г, подвижные K_2O – 87.7 ± 7.3 и P_2O_5 – 106 ± 5 мг/кг. На каждый сосуд приходилось по 5 семян, что примерно соответствовало норме высева 100 семян/м². Одновременно с посевом каждый проросток инокулировали смесью микроорганизмов (РКСМ, Санкт-Петербург, РФ, <http://www.ariam.ru/kollekciya-kul-tur1/>): водными суспензиями клубеньковой бактерией *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* штамм CIAM1079, ассоциативной бактерией *Variovorax paradoxus* штамм 5C-2 (10^7 КОЕ/мл) и 1.0 г почвенно-корневой смеси из накопительной культуры гриба *Glomus* sp. 1Fo.

Удобрения вносили в почву в виде питательного раствора солей из расчета конечного содержания их в почве (мг/кг): NH_4NO_3 – 15, KNO_3 – 200, KH_2PO_4 – 200, $MgSO_4$ – 35, $CaCl_2$ – 25, H_3BO_3 – 3, $MnSO_4$ – 3, $ZnSO_4$ – 3, Na_2MoO_4 – 2. Дальнейшее внесение удобрений в виде подкормок в период вегетации в схеме опыта не было предусмотрено, т.к. это могло нарушить развитие и полезное действие АМГ.

ТМ вносили в почву в виде смеси солей (мг/кг почвы): Cd – 5, Co – 25, Cr – 60, Cu – 10, Fe – 10, Hg – 3, Mn – 1, Ni – 15, Pb – 100, Sr – 50, Zn – 50. Контролем служили сосуды с неинокулированными растениями. В пределах каждого генотипа и варианта было 4 аналитических повторности. Влажность субстрата в опыте поддерживали на уровне 70% ППВ путем ежедневного полива под корень, согласно расчетным формулам в зависимости от фаз онтогенеза, основанным на весовом методе. Общая продолжительность опыта составила 75 сут, до фазы полной спелости бобов.

В фазе начала созревания растения вместе с корневой системой осторожно вынимали из почвы. Корневую систему отделяли, промывали в проточной воде, избыток поверхностной влаги удаляли фильтровальной бумагой и взвешивали. Корни отделяли и фиксировали в формалине. Гистохимический анализ и количественный учет ВАМ проводили с применением метода мацерации (кипячение при 95°C) и последующим окрашиванием в течение 3 мин в растворе 10%-ной уксусной кислоты с добавлением 5% черной туши (Sheaffer Pen, Shelton, Connecticut,

Таблица 1. Образцы гороха посевного (*Pisum sativum* L.), оцененные по способности аккумулировать и транспортировать ТМ из побега в семена (коллекция Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург)

№ в каталоге ВИР	Название	Происхождение	Направление использования
1027	Без названия	Германия до 1949 г.	Кормовое
1658	Вейбуля	Швеция	Кормовое
4788	Без названия	Монголия	Кормовое
5012	Ojo negro especial	Аргентина	Зерно-овощное
8093	Telephone	Мадагаскар	Овощное
8862	Агат	Белоруссия	Кормовое
9283	Николка	РФ, Тюменская область	Кормовое
9385	Борей	РФ, Кировская область	Кормовое
9540	ID29001914	Австралия	Кормовое

USA) по методике Филипс–Хейман [15]. Микроскопирование зафиксированных корней проводили с помощью светового микроскопа Axio Lab.A1 (Carl Zeiss, Germany) по методу Травло [16]. Расчет частоты микоризации и относительного количества микоризных структур (арбускул и везикул) оценивали согласно методике Воробьева с соавт. [17].

Обработку экспериментальных данных проводили с помощью статистических программ Excel 2010 (Microsoft Corp., USA). Также проводили расчет индекса когнитивной значимости (*CSI*) [18], с помощью вычислительной нейронной сети EuclidNN [19], анализирующей показатели микоризации и биомассы корней растений в вариантах опыта. Своей величиной данный показатель количественно характеризует уровень симбиотической активности микоризы по отношению к растению.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

У всех 11-ти изученных генотипов гороха, выращенных на загрязненной ТМ почве, инокуляция растений микробным консорциумом способствовала развитию ВАМ (табл. 2).

На корнях некоторых неинокулированных растений также была обнаружена ВАМ, вероятно образованная аборигенными штаммами, но интенсивность микоризации в этом случае была существенно меньше, чем при инокуляции.

Искусственная инокуляция растений микробным консорциумом, в составе которого присутствовал арбускулярный гриб *Glomus* sp. 1Fo, в среднем способствовала увеличению встречаемости ВАМ инфекции в образцах и обилия арбускул в образце примерно в 4 раза (рис. 1). При этом, обилие везикул в образце при инокуляции растений по сравнению с контрольным вариантом повысилось незначительно.

Наиболее отзывчивыми к искусственной микоризации оказались генотипы 1027 и 9540, в которых частота микоризной инфекции в опытных вариантах возросла соответственно с 1.8 до 27.5% (рост на 25.7%), и с 3.2 до 37% (рост на 33.8%) в сравнении с контрольными.

Наименее отзывчивыми к искусственной микоризации оказались генотипы 9283 и SGE, в которых частота микоризной инфекции в опытных вариантах возросла с 8.2 до 13.0% (рост на 4.8%) и с 5.2 до 10.0% (рост на 4.8%) соответственно. Отметим, что доля обилия арбускул в инокулированных растениях возросла во всех образцах, в особенности максимальное увеличение данного показателя наблюдали у генотипов гороха 1027 и 8093, где количество арбускул в образцах увеличилось с 0.3 до 17.0% и с 3.0 до 15.0%. Было показано, что в большинстве случаев микоризация различных генотипов гороха не повлияла на интенсивность роста растений на фоне загрязнения почв ТМ (рис. 2).

Исключение составили растения генотипа 1658, где в инокулированных образцах в сравнении с контролем биомасса побегов увеличилась примерно на 25%, и генотип 9385, инокуляция которого увеличила биомассу корневой системы почти в 2 раза. Были отмечены также случаи, когда инокуляция растений приводила к снижению роста корневой системы. Например, для генотипов SGECDt, 9283 и 9540 биомасса корней в опытном варианте была приблизительно в 2 раза меньше, чем у контрольных растений.

Расчет *CSI*-индекса показал, что микориза проявляла наибольшую симбиотическую активность для генотипа 1658 (рис. 3).

При этом в отличие от показателей биомассы инокуляция микробным консорциумом для данного генотипа приводила к существенному снижению степени микоризации. Значимо рост консолидации *CSI* наблюдался только в отношении генотипов 8093 и SGE.

Таблица 2. Параметры развития микоризных структур у различных генотипов гороха, выращенных на загрязненной ТМ почве, при инокуляции комплексом микроорганизмов (%)

Вариант	Частота микоризной инфекции	Обилие в образце		Обилие в микоризированной части 1 см корня	
		арбускул	везикул	арбускул	везикул
1027 – М	1.8 ± 0.6	0.3 ± 0.3	0.0	7.5 ± 2.5	0.0
1658 – М	4.2 ± 0.9	4.2 ± 1.0	0.0	18.3 ± 2.9	0.0
4788 – М	4.3 ± 1.5	3.1 ± 1.1	0.2 ± 0.2	30.8 ± 12.0	2.5 ± 2.5
5012 – М	2.3 ± 1.6	1.4 ± 0.9	0.2 ± 0.2	10.0 ± 7.1	0.0
8093 – М	4.8 ± 1.5	3.0 ± 1.4	2.0 ± 1.7	20.8 ± 10.8	12.5 ± 12.5
8862 – М	0.7 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.1 ± 0.1	2.5 ± 2.5	0.0
9283 – М	8.2 ± 1.6	4.3 ± 1.3	0.7 ± 0.4	28.7 ± 9.0	5.0 ± 2.9
9385 – М	1.7 ± 0.7	1.0 ± 0.3	0.0	7.5 ± 2.5	0.0
9540 – М	3.2 ± 0.8	2.4 ± 1.4	0.2 ± 0.2	20.0 ± 10.0	2.5 ± 2.5
SGE – М	5.2 ± 0.7	2.1 ± 0.8	0.0	30.0 ± 11.5	0.0
SGECDt – М	6.7 ± 1.4	4.3 ± 0.1	0.4 ± 0.4	30.0 ± 0.1	3.3 ± 3.3
1027 + М	27.5 ± 7.5	17.0 ± 6.0	0.0	24.8 ± 6.2	0.0
1658 + М	12.0 ± 1.2	6.8 ± 1.5	0.1 ± 0.1	36.2 ± 6.7	5.0 ± 2.9
4788 + М	16.0 ± 3.0	10.6 ± 2.6	1.3 ± 0.8	25.8 ± 7.9	15.0 ± 11.9
5012 + М	10.7 ± 4.7	7.3 ± 4.4	0.5 ± 0.2	19.1 ± 7.3	5.0 ± 2.9
8093 + М	17.0 ± 2.3	15.0 ± 3.2	1.5 ± 1.1	54.8 ± 6.6	10.8 ± 4.8
8862 + М	6.8 ± 2.8	4.9 ± 2.3	0.8 ± 0.8	30.3 ± 12.9	12.5 ± 12.5
9283 + М	13.0 ± 5.7	9.5 ± 5.3	0.3 ± 0.2	25.8 ± 9.1	5.0 ± 2.9
9385 + М	10.0 ± 4.3	7.8 ± 3.1	0.2 ± 0.2	32.7 ± 8.3	2.5 ± 2.5
9540 + М	37.0 ± 4.3	4.7 ± 4.2	0.2 ± 0.2	15.5 ± 12.4	2.5 ± 2.5
SGE + М	10.0 ± 5.9	7.8 ± 3.2	0.0	23.8 ± 8.7	0.0
SGECDt + М	20.3 ± 6.1	14.2 ± 4.3	1.0 ± 0.8	32.8 ± 3.9	6.7 ± 3.3

Примечания. 1. – М – контроль без инокуляции, + М – инокуляция смесью симбиотических микроорганизмов. 2. Указаны ошибки средних.

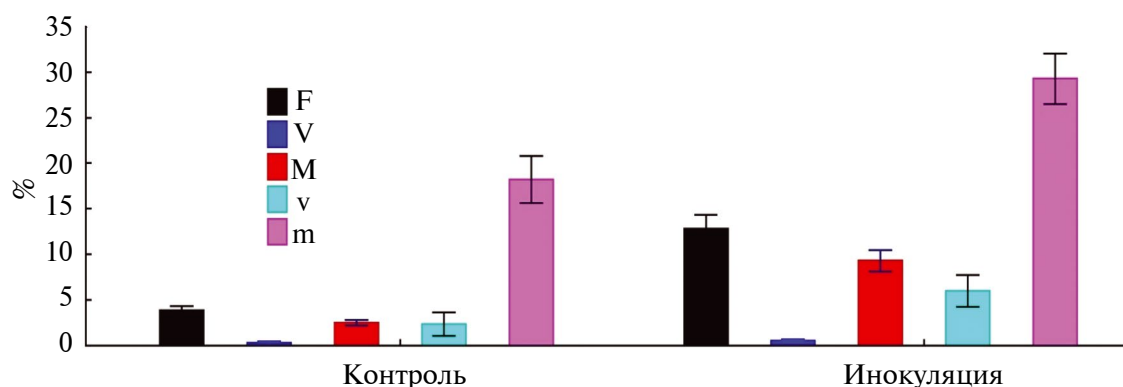


Рис. 1. Средние для всех выращенных на загрязненной ТМ дерново-подзолистой почве генотипов гороха величины параметров развития микоризных структур. Параметры микоризации корней: встречаемость микоризной инфекции (F), обилие арбускул в образце (M), обилие арбускул в микоризированных фрагментах (m), обилие везикул в образце (V) и обилие везикул в микоризированных фрагментах (v). Вертикальные отрезки обозначают ошибки средних.

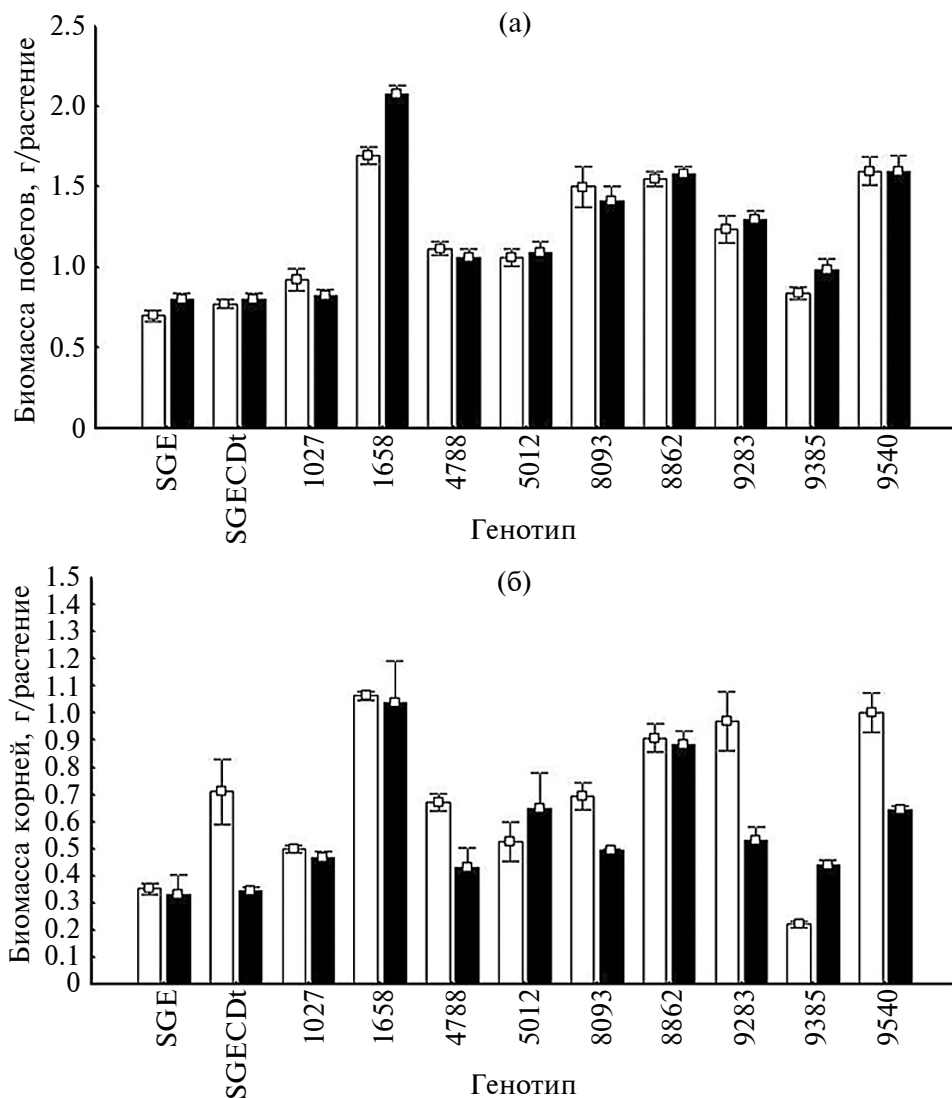


Рис. 2. Влияние инокуляции на накопление биомассы побегов (а), биомассы корней (б). — неинокулированные растения, ■ — инокулированные растения. Вертикальные отрезки обозначают ошибки средних. Генотипы расположены слева направо по увеличению их коллекционного номера.

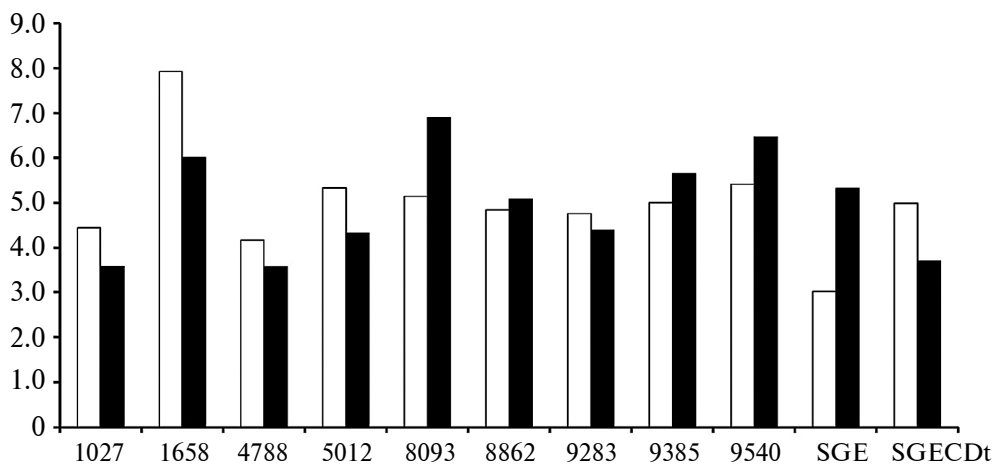


Рис. 3. Показатели CSI-индекса в вариантах опыта, □ — неинокулированные растения, ■ — инокулированные растения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, все изученные генотипы гороха продемонстрировали способность образовывать везикулярно-арбускулярную микоризу, однако в большинстве случаев инокуляция не повышала устойчивость растений к токсическому действию тяжелых металлов (ТМ), что выражалось в отсутствии достоверных прибавок биомассы корней и побегов. С одной стороны, это можно объяснить низкой способностью выбранного штамма арбускулярного гриба в составе микробного комплекса выступать в качестве унифицированного агента, способного к сорбции ТМ. С другой стороны, визуальные параметры морфометрии не являлись достоверным критерием оценки степени микоризации макросимбионта. Расчет показателей индексов CSI дал предпосылку создания программы нейросетевого моделирования экохимических процессов, лежащих в основе интегрального взаимодействия симбиотических партнеров в условиях множественного симбиоза и стрессового влияния факторов внешней среды.

Авторы признательны доктору биологических наук А.А. Белимову за предоставление семенного материала для проведения эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века: учеб. пособ. М.: Изд-во РУДН, 2002. 140 с.
2. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс, 2017. 178 с.
3. Елькина Г.Я. Реакция растений на полиэлементное загрязнение подзолистых почв тяжелыми металлами // Агрохимия. 2017. № 7. С. 78–85.
4. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
5. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами: учеб. пособ. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2012. 304 с.
6. Борисов А.Ю., Штарк О.Ю., Жуков В.А., Неманкин Т.А., Наумкина Т.С., Пинаев А.Г., Ахтемова Г.А., Ворошилова В.А., Овчинникова Е.С., Рычагова Т.С., Цыганов В.Е., Жернаков А.И., Кузнецова Е.В., Гришина О.А., Сулима А.С., Федорина Я.В., Чеботарь В.К., Бисселлинг Т., Лемансо Ф., Джаниназзи–Пирсон В., Ратэ П., Санхуан Х., Стоугард Й., Берг Г., Макфи К., Эддис Н., Тихонович И.А. Взаимодействие бобовых с полезными почвенными микроорганизмами: от генов растений к сортам // Сел.-хоз. биол. 2011. № 3. С. 41–47.
7. Штарк О.Ю., Борисов А.Ю., Жуков В.А., Неманкин Т.А., Тихонович И.А. Многокомпонентный симбиоз бобовых с полезными почвенными микроорганизмами: генетическое и эволюционное обоснование использования в адаптивном растениеводстве // Экол. генетика. 2011. № 9. С. 80–94.
8. Dilworth M.J. Dinitrogen fixation // Ann. Rev. Plant Physiol. 1974. V. 25. № 1. P. 81–114.
9. Леппянен И.В., Штарк О.Ю., Павлова О.А., Бовин А.Д., Иванова К.А., Серова Т.А., Долгих Е.А. Анализ эффектов совместной инокуляции грибами арбускулярной микоризы и ризобиями на рост и развитие растений гороха *Pisum sativum* L. // Сел.-хоз. биол. 2021. Т. 56. № 3. С. 475–486.
10. Шапошников А.И., Пухальский Я.В., Кравченко Л.В., Белимов А.А. Роль корневой экссудации в трофических взаимодействиях растений с ризосферными микроорганизмами. СПб.: Информ-Навигатор, 2016. 104 с.
11. Смут С.Э., Рид Д. Дж. Микоризный симбиоз. М.: Товарищество научн. изд. КМК, 2012. 776 с.
12. Белимов А.А., Кунакова А.М., Сафронова В.И., Степанок В.В., Юдкин Л.Ю., Алексеев Ю.В., Кожемяков А.П. Использование ассоциативных бактерий для инокуляции ячменя в условиях загрязнения почвы свинцом и кадмием // Микробиология. 2004. Т. 73. С. 118–125.
13. Hu N., Zhao B. Key genes involved in heavy-metal resistance in *Pseudomonas putida* CD2 // FEMS Microbiol. Lett. 2007. V. 267. P. 17–22.
14. Tsyfanov V.E., Belimov A.A., Borisov A.Y., Safranov V.I., Georgi M., Dietz K.–J., Tikhonovich I.A. A chemically induced new pea (*Pisum sativum* L.) mutant SGECdt with increased tolerance to and accumulation of cadmium // Annal. Botany. 2007. № 99. P. 227–237.
15. Phillips J.M., Hayman D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection // Transact. British Mycor. Soc. 1970. V. 55. P. 158–161.
16. Trouvelot A., Kough J.L., Gianinazzi-Pearson V. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un systeme racinaire // Physiol. Genet. Aspect. Mycorrhizae. Paris: INRA-Press, 1986. P. 217–221.
17. Воробьев Н.И., Юрков А.П., Проворов Н.А. Свид-во № 2016612112 от 12.02.2016 о регистрации программы ЭВМ "Программа вычисления индексов микоризации корней растений". М.: Федерал. служба по интеллек. собственности. 2016.
18. Sutrop U. List task and a cognitive salience index // Field methods. 2001. V. 13(3). P. 263–276.
19. Воробьев Н.И., Пухальский Я.В., Пищик В.Н. Программа нейросетевого анализа корреляционных связей в биосистемах. Свид-во гос. регистр. программы для ЭВМ № 2023611435 от 19.01.2023.

Effect of Heavy Metals on Mycorrhization Roots of Legume-Rhizobia Symbiosystems of *Pisum sativum* L.

N. I. Vorobyov^a, J. V. Puhalsky^{a,b,#}, T. S. Azarova^a, S. I. Loskutov^{b,c},
Yu. V. Laktionov^a, Yu. V. Kosulnikov^a, A. I. Kovalchuk^a, A. P. Kozhemyakov^a

^aAll-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology,
Podbelskogo sh. 3, Saint-Petersburg–Pushkin 196608, Russia

^bPushkin Leningrad State University,
Petersburgskoye sh. 10, St. Petersburg–Pushkin 196605, Russia

^cAll-Russian Scientific Research Institute of Food Additives –
a branch of V.M. Gorbатов Research Center for Food Systems,
Liteiny prosp. 55, St. Petersburg 191014, Russia

[#]E-mail: puhalskyan@gmail.com

The influence of a microbial consortium consisting of the nodule bacterium *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* strain CIAM1079, the associative rhizobacterium *Variovorax paradoxus* strain 5C-2 and the arbuscular fungus *Glomus* sp. 1Fo was studied. on the biomass of roots and the formation of mycorrhizal infection in various genotypes of peas grown on fallow sod-podzolic soil contaminated with heavy metals. It was shown that artificial inoculation of plants on average contributed to an increase in mycorrhization parameters by about 4 times. At the same time, in most cases, this practically did not affect the intensity of growth of the root system of plants against the background of soil contamination with toxicants. The use of the neural network data analysis method showed that morphometric indicators were not a reliable criterion for assessing the degree of mycorrhization of a macrosymbiont. The calculation of cognitive significance indices provided a prerequisite for the creation of a program for assessing the ecochemical processes underlying the integral interaction of symbiotic partners in conditions of multiple symbiosis and the stressful influence of environmental factors.

Keywords: seed peas (*Pisum sativum* L.), heavy metals, symbiosis, vesicular-arbuscular mycorrhiza.

УДК 631.452:632.12:631.445.25(470.315)

ПЛОДОРОДИЕ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СВЕТЛО-СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2024 г. А. А. Уткин^{1,*}, И. Б. Нода²¹Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К.А. Тимирязева

127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

²Станция агрохимической службы “Ивановская”

153506 Ивановская область, с. Богородское, ул. Центральная, 8, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Представлены результаты многолетнего мониторинга светло-серой лесной почвы сельскохозяйственного назначения Ивановской обл., который проводили для установления уровня плодородия по основным агрохимическим показателям, содержанию подвижных форм микроэлементов и серы, экотоксикологического состояния по содержанию валовых и подвижных форм тяжелых металлов, мышьяка, цезия-137 и стронция-90. Установлены средние величины показателей, уровни их изменения и тренды изменения обменной и гидrolитической кислотности почвы, обеспеченности органическим веществом, подвижными формами азота, фосфора, калия, обменными кальцием, магнием и другими основаниями, подвижными формами бора, меди, цинка, молибдена, кобальта, марганца и серы. По содержанию микроэлементов в почве определены потребности применения микроудобрений. Определены изменения, концентрации и тренды изменения подвижных форм кадмия, свинца, меди, цинка, никеля, хрома, ртути и мышьяка в почве. Исследованием установлены фоновые величины, изменения и тенденции изменения удельных активностей цезия-137 и стронция-90, плотности загрязнения ими почвы участка и мощность экспозиционной дозы гамма-излучения. По коэффициентам корреляции Пирсона–Спирмена установлены особенности влияния содержания органического вещества, уровня кислотности и емкости катионного обмена на содержание подвижных форм микроэлементов, серы, валовых и подвижных форм металлов и радионуклидов.

Ключевые слова: плодородие, светло-серая лесная почва, микроэлементы, тяжелые металлы, искусственные радионуклиды, реперные участки, Ивановская обл.

DOI: 10.31857/S0002188124050096, **EDN:** CUNYZK

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях ведения земледелия в России нерациональное использование удобрений и средств химизации, снижение объемов их использования, несоблюдение системы обработки почв и агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур приводит к снижению плодородия почв, увеличению содержания в них токсикантов и, как следствие этого, снижению урожаев сельскохозяйственных культур и их качества [1–4].

Обследование почв снабжает землепользователя необходимой информацией об уровне ее плодородия и экотоксикологическом состоянии по содержанию основных элементов питания, органического вещества, реакции почвенной среды, обеспеченности микроэлементами (МЭ), присутствию в почве различных поллютантов [5].

В связи с увеличением антропогенной нагрузки на биосферу и, в частности, на почву, остро стоит проблема изучения экологического состояния почв по содержанию в них тяжелых металлов (ТМ), мышьяка (As) и искусственных радионуклидов (ИРН). Усиление загрязнения почв этими токсикантами вызывает снижение их способности к самоочищению [6].

В последние десятилетия в Нечерноземной зоне отмечена значительная потеря даже относительно плодородными почвами своего плодородия и постепенный переход их в разряд низко плодородных и загрязненных земель, что создает угрозу их исключения из сельскохозяйственного оборота [7–9].

Высокоэффективное ведение сельского хозяйства возможно только при соблюдении правильного подхода к проблемам, связанным с использованием, восстановлением и сохранением почвенного плодородия.

Оценка показателей плодородия светло-серых лесных почв Ивановской обл. и их экотоксикологического состояния в научной литературе освещены слабо и требуют дополнительного изучения.

Цель работы – оценка уровня плодородия светло-серых лесных почв Ивановской обл. по основным агрохимическим показателям, содержанию МЭ и их экотоксикологического состояния по содержанию цезия-137 (^{137}Cs) и стронция-90 (^{90}Sr), подвижных и валовых форм соединений свинца (**Pb**), кадмия (**Cd**), меди (**Cu**), никеля (**Ni**), цинка (**Zn**), хрома (**Cr**), ртути (**Hg**) и мышьяка (**As**).

Необходимость изучения исследованных ТМ и ИРН объясняется тем, что они являются приоритетными поллютантами природной среды, и их соединения обладают высокой токсичностью для живых организмов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были светло-серые лесные почвы, доля которых в пахотном фонде почв Ивановской обл. составляет 7.6% или 24 тыс. га [10]. Данные по агрохимическому и экотоксикологическому обследованию светло-серой лесной почвы проанализированы за период 2009–2022 гг. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на реперном участке, расположенном в Гаврилово-Посадском р-не, путем отбора проб почвы из пахотного слоя 0–20 см. Почва реперного участка находилась в обработке, и ее использовали для выращивания сельскохозяйственных культур. Площадь участка 25 га.

С реперного участка ежегодно с 2009 по 2022 г. с помощью тростевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец, массой ≈ 0.5 кг составляли из 25–30 точечных проб и в среднем отбирали с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Агрохимические анализы почвы были выполнены согласно принятым методикам: обменная кислотность (pH_{KCl}) – ГОСТ Р 58594-2019, гидролитическая кислотность (H_r) – ГОСТ 26212-91, подвижные фосфор (P_2O_5) и калий (K_2O) – ГОСТ Р 54650-2011 (по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО), обменные основания кальция и магния (**Ca** и **Mg**) – ГОСТ 26487-85, органическое вещество (по методу Тюрина в модификации ЦИНАО) – ГОСТ 26213-91, сумма поглощенных оснований (*S*) (по методу Каппена) – ГОСТ 27821-88, нитратный азот (N-NO_3) – ГОСТ 26951-86, обменный аммоний (N-NH_4) – ГОСТ 26489-85, подвижный бор (**B**) (по методу Бергера–Труога в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50688-94, подвижный молибден (**Mo**) (по методу Григга в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50689-94, подвижная медь (**Cu**) (по методу Пейве–Ринькиса в модификации

ЦИНАО) – ГОСТ Р 50684-94, подвижный цинк (**Zn**) (по методу Пейве–Ринькиса) – в вытяжке 1.0 н. КС1, подвижный кобальт (**Co**) (по методу Пейве–Ринькиса в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50687-94, подвижный марганец (**Mn**) (по методу Пейве–Ринькиса в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50682-94, подвижная сера (**S**) (по методу ЦИНАО) – ГОСТ 26490-85. Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почвы основаниями (*V*) определяли расчетным способом.

Определение в почве подвижных форм ТМ проводили в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера pH 4.8 (ААБ), валовых форм Hg – в вытяжке 1.0 н. HNO_3 методом атомно-абсорбционной спектроскопии [11–13], валовые формы As – фотометрическим методом в вытяжке HNO_3 и H_2SO_4 (1 : 1) [14].

Определение ^{137}Cs и ^{90}Sr проводили на приборе УСК “Гамма Плюс” (Россия) в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-, бета-спектрометре с использованием программного обеспечения “Прогресс” (ВНИИФТРИ, 2003).

^{137}Cs и ^{90}Sr в почве определяли согласно методическим рекомендациям [15]. Гамма-спектрометрию проб почвы проводили в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л.

Измерение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭДГ) проводили согласно методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения [16].

МЭДГ измеряли на высоте 1 м над поверхностью почвы сцинтилляционным геологоразведочным радиометром СРП-68-01. На реперном участке проводили 8 замеров с последующим подсчетом средних показателей.

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обменная кислотность светло-серой лесной почвы за период 2009–2022 гг. изменялась в широких пределах – от слабо кислой до нейтральной при среднем уровне кислотности, соответствующим нейтральной среде (табл. 1).

Гидролитическая кислотность, в отличие от обменной кислотности, была подвержена более сильному изменению, о чем свидетельствовал высокий коэффициент вариации. В основном гидролитическая

Таблица 1. Агрохимическая характеристика светло-серой лесной почвы

Показатель	$C_{\text{орг}}$, %	$N-NH_4$, мг/кг почвы	$N-NO_3$, мг/кг почвы	P_2O_5 , мг/кг почвы	K_2O , мг/кг почвы	pH _{KCl}	H_r , смоль(экв)/ 100 г почвы	Ca , смоль(экв)/ 100 г почвы	Mg , смоль(экв)/ 100 г почвы	S , смоль(экв)/ 100 г почвы	EKO , смоль(экв)/ 100 г почвы	V , %
<i>M</i>	2.3	1.7	3.1	202	139	5.7	1.27	8.1	2.4	17.5	18.8	92.7
<i>m</i>	0.1	0.3	0.4	12	14	0.1	0.14	0.5	0.2	1.0	0.92	1.1
<i>Me</i>	2.3	1.3	2.4	210	120	5.6	1.12	7.7	2.3	16.5	18.2	93.5
<i>V</i>	10.5	69.9	51.3	21	37	5.3	42.6	21.4	29.9	21.9	18.4	4.3
Lim	1.8–2.6	0.4–4.0	1.3–6.2	130–254	58–228	5.2–6.3	0.51–2.21	5.1–12.7	1.5–4.3	10.3–25.9	12.4–26.7	83.3–97.8

Примечание. *M* – среднее арифметическое, *m* – ошибка среднего арифметического, *Me* – медиана, *V* – коэффициент вариации, Lim – интервал изменения показателя. То же в табл. 2–4.

кислотность соответствовала очень низкой степени кислотности почвы.

Между проявлением обменной и гидролитической кислотности имелась тесная связь. Подтверждение этому было отмечено в нашем исследовании, где выявлена высокая достоверная корреляция: $r_{(H_r/pH_{KCl})} = -0.71, P = 0.95$.

В целом за период мониторинга отмечены тенденции к слабому снижению обменной и гидролитической кислотности, связанные с проведением в 2017 г. известкования почвы участка доломитовой мукой в дозе 3.1 т/га.

Средняя обеспеченность исследованной почвы органическим веществом соответствовала низкой степени. Отметим, что в динамике содержание органического вещества слабо повышалось за счет применения низких доз органических удобрений и возделывания на участке многолетних трав.

Подвижные соединения $N-NH_4$, $N-NO_3$, P_2O_5 и K_2O являются одними из основных элементов питания растений, и этим определяется важность изучения форм их соединений в почвах.

Согласно группировке обеспеченности почв аммонийной и нитратной формами азота [17], светло-серая лесная почва имела очень низкую обеспеченность доступным азотом на протяжении всего периода мониторинга. Содержание форм азота было подвержено сильному варьированию.

Обеспеченность светло-серой лесной почвы подвижным P_2O_5 изменялась от повышенной до очень высокой степени, при среднем содержании P_2O_5 , соответствующим высокой обеспеченности.

Присутствие подвижных форм K_2O в изученной почве менялось от низкого до высокого содержания,

при среднем содержании K_2O , соответствующим повышенной обеспеченности.

В целом за 14-летний период наблюдений установлены тренды увеличения содержания подвижных форм $N-NH_4$, $N-NO_3$, P_2O_5 и снижения содержания K_2O .

Обеспеченность обменным Ca проявлялась от средней до повышенной, обменным Mg – от средней до очень высокой. Среднее содержание Ca и Mg соответствовало средней и повышенной степеням обеспеченности почвы соответственно. Динамика содержания обменных Ca и Mg характеризовалась возрастающими трендами.

Средняя доля присутствия обменных Ca и Mg в общем составе поглощенных катионов изученной почвы составляла 61.3% (lim = 46.4–86.4%), что свидетельствовало о важности участия этих элементов в процессах химизма серых лесных почв.

Обеспеченность почвы поглощенными основаниями (показатель S) изменялась от средней до высокой, а степень насыщенности почвы основаниями (V) – от повышенной до высокой. Средняя обеспеченность почвы поглощенными основаниями соответствовала повышенной, а степени насыщенности ими – высокой. Емкостно-сорбционные показатели светло-серой лесной почвы с 2009 по 2022 г. имели четкую тенденцию к увеличению.

Варьирование всех изученных агрохимических показателей светло-серой лесной почвы участка подчинялось закону нормального распределения, за исключением содержания $N-NO_3$.

Одним из факторов, тесно связанным с плодородием почвы, является обеспеченность почв доступными для растений формами МЭ [18]. Данные

Таблица 2. Концентрации подвижных форм микроэлементов и серы в светло-серой лесной почве, мг/кг

Показатель	V	Mo	Cu	Zn	Co	Mn	S
<i>M</i>	0.65	0.15	3.70	1.69	1.19	54.45	2.6
<i>m</i>	0.05	0.01	0.32	0.07	0.17	2.13	0.4
<i>Me</i>	0.62	0.16	3.41	1.67	0.95	55.50	3.3
<i>V</i>	26.62	12.14	31.93	14.76	52.89	14.61	64.2
Lim	0.46–0.95	0.12–0.18	2.80–7.60	1.27–2.11	0.56–3.10	31.90–65.00	0.3–4.8
$r_{(C_{орг}/MЭ)}$	0.02	0.30	–0.14*	0.10	0.37*	0.22*	0.38*
$r_{(pH_{KCl}/MЭ)}$	0.23	–0.02	0.49*	0.08	0.59**	0.01*	0.20*
$r_{(ЕКО/MЭ)}$	0.07	0.34	0.50*	0.31	0.76**	–0.01*	0.37*

Примечание. Без звездочки – коэффициенты линейной корреляции Пирсона, * – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, ** – значимые коэффициенты корреляции при $P = 0.95$. То же в табл. 3–4.

содержания в почве подвижных форм МЭ представлены в табл. 2.

Бор. Среднее содержание и пределы изменений водорастворимых форм В в светло-серой лесной почве согласовались с данными, приведенными в работах Пейве и Каталымова для этой почвы [19, 20]. Согласно градации обеспеченности почв подвижными формами В, и исходя из среднего содержания элемента в почве участка, светло-серые лесные почвы имели среднюю обеспеченность В с изменениями содержания от средней до богатой обеспеченности [21].

Молибден. Содержание подвижных форм Мо в исследованной почве участка согласовалась с пределами его содержания в светло-серой лесной (0.05–0.41 мг/кг) почве, отмеченными в работе [22]. По градации обеспеченности почв Мо его среднее содержание в светло-серой лесной почве указывало на среднюю обеспеченность с незначительным варьированием содержания [21].

Медь. Пределы содержания подвижных форм Си в светло-серой лесной почве укладывались в интервалы содержания, указанные в работе Панасина для почвы этого типа [23]. Исходя из средней обеспеченности Си изученной почвы, и согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны, почва участка имела среднюю обеспеченность подвижной Си [21], при этом изменение содержания Си варьировали от среднего до очень богатого.

Цинк. Пределы изменений содержания подвижного Zn в почве участка в основном совпадали с пределами содержания его усвояемых форм в данной почве [24]. Усредненное содержание подвижных форм Zn в почве указывало на среднюю обеспеченность почвы МЭ, однако в отдельные годы содержание Zn повышалось до богатой обеспеченности.

Кобальт. Содержание подвижного Со и пределы его изменения в почве соответствовали типичным показателям для этой почвы [24]. Варьирование содержания

подвижного Со отмечено от бедной обеспеченности до богатой. Среднее содержание Со в почве указывало на среднюю степень обеспеченности.

Марганец. Для серых лесных почв России характерно наличие больших количеств подвижных форм Mn (lim = 115–1360 мг/кг почвы) [24]. Среднее содержание подвижного Mn в почве участка в 2009–2022 гг., согласно градации обеспеченности почв России подвижными формами МЭ, соответствовало средней степени обеспеченности [21].

Сера. Исходя из среднего содержания и пределов варьирования содержания подвижной S, исследованная почва имела низкий уровень обеспеченности элементом [25].

За время проведения мониторинга динамики содержания подвижных форм МЭ установлены тренды их изменения. Содержание Мо, Си, Zn, Со и S имело тренд к увеличению, Mn – к снижению, В – без заметного изменения. Исходя из фактического уровня обеспеченности светло-серой лесной почвы каждым МЭ, она имела среднюю потребность в их применении в качестве микроудобрения. Вероятно, что на повышение обеспеченности почвы подвижными формами Мо, Си, Zn, Со и S сказалось их поступлением в почву с макроудобрениями и от внешних источников загрязнения. Варьирование содержания Си, Со, Mn и S не подчинялось закону нормального распределения, Zn, В и Мо – имело нормальное распределение.

В своем исследовании выявили взаимосвязи между концентрациями доступных форм МЭ и отдельными свойствами почвы, которые оценивали по величинам коэффициентов линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена (табл. 2).

Установлено, что концентрация подвижного Со в почвах зависела от величины ЕКО и уровня pH_{KCl} [23]. Полученные в нашем исследовании высокие значимые коэффициенты корреляции между содержанием подвижного Со и указанными

Таблица 3. Концентрации форм ТМ и As в светло-серой лесной почве, мг/кг

Показатель	Подвижные формы						Валовые формы	
	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Hg	As
<i>M</i>	0.14	1.46	0.06	0.62	0.47	0.31	0,021	2.25
<i>m</i>	0.01	0.10	0.01	0.06	0.05	0.03	0,003	0.16
<i>Me</i>	0.12	1.44	0.06	0.57	0.40	0.32	0,016	2.33
<i>V</i>	29.29	26.36	30.76	38.16	38.69	20.20	52,67	26.99
Lim	0.09–0.20	0.93–2.11	0.03–0.10	0.30–1.14	0.24–0.86	0.20–0.35	0.010–0.051	1.00–3.53
ПДК	3	23	Нет данных	6	4	6	2.1	2
$r_{(C_{орг}/TM)}$	–0.04*	0.34	0.05	–0.11	0.11	0.54*	0.39*	–0.12
$r_{(pH_{KCl}/TM)}$	–0.58**	0.06	–0.07	–0.29	–0.53	0.68*	0.15*	0.32
$r_{(EKO/TM)}$	–0.52*	0.43	–0.28	0.02	–0.14	0.74*	0.63**	0.38

свойствами почвы подтверждали эту зависимость. В остальных случаях между содержанием подвижных форм МЭ и свойствами светло-серой лесной почвы отмечены недостоверные корреляции слабой и реже – средней силы.

Данные содержания подвижных форм ТМ и валового содержания Hg и As в светло-серой лесной почве приведены в табл. 3.

Медь. Среднее содержание и изменение количества подвижных форм Cu, переходящих в вытяжку ААБ рН 4.8, соответствовали усредненным показателям, характерным для почв Европейской части России [26].

Цинк. Содержание подвижного Zn в исследованной почве характеризовалось типичными показателями, характерными для данной почвы.

Кадмий. Отмеченные пределы изменений содержания подвижных форм Cd и средние содержания подвижных форм ТМ соотносились с показателями, указанными в других работах [18, 26].

Свинец. Отмеченные пределы изменения и среднее содержание подвижного Pb в почве участка были в 10 раз меньше показателей, характерных для серой лесной почвы (0.3–11.8 мг/кг почвы) [27].

Никель. Среднее содержание подвижных форм Ni в светло-серой лесной почве в основном соотносилось с данными, приведенными в работе [26].

Хром. Концентрации подвижных форм Cr в светло-серой почве были значительно меньше по сравнению со показателями (2.62–2.66 мг/кг), отмеченными для Центрально-Европейской части России [26, 27].

Ртуть. Фоновые валовые концентрации Hg в незагрязненных почвах оценивают \approx до 0.9 мг/кг почвы [26]. Фоновые валовые концентрации Hg в незагрязненных серых лесных почвах России оценивают

от 0.04 до 0.75 мг Hg/кг почвы [28]. Содержание валовой Hg в светло-серой лесной почве Ивановской обл. было в 4–15 раз меньше содержания Hg в серых лесных почвах страны.

Мышьяк. Средняя валовая концентрация As в почве участка составляла 2.25 мг/кг. Установлено, что валовое содержание As в верхнем слое незагрязненной почвы меняется от 0.2 до 16 мг/кг [29], что отвечает оценке Ковды [30], считавшим накопление As в почвах в интервале 2–20 мг/кг относительно безопасным.

Динамика изменения содержания Ni, Cd, Cr и Cu в исследованной почве за период наблюдения описывалась возрастающими трендами, Zn, Pb, Hg и As – понижающими. Во всех случаях концентрации подвижных форм ТМ и валовых форм Hg в светло-серой лесной почве были значительно меньше величин ПДК, т.е., почва относится к слабозагрязненной и не является опасной для культурных растений и здоровья человека. Присутствие валовых форм As в почве превышало величину валовой ПДК в 1.77 раза, что создало опасность перехода металлоида из почвы в растения и далее по трофической цепи в организм человека. В то же время, принимая во внимание такие показатели как рН_{KCl} > 5.5) и гранулометрический состав почвы участка (суглинистый), установлено, что содержание валового As не превышало величины валовой ОДК_{As} (10 мг As/кг почвы). Изменение содержания Zn, Cd, Pb, Ni и As подчинялось закону нормального распределения, Cu, Cr и Hg – ненормальному распределению.

В своих работах Добровольский [31], Чернова и Бекская [32] отмечали, что важными факторами, влияющими на поведение ТМ в почвах, являются количество органического вещества, реакция среды и ЕКО. В нашем исследовании выявили взаимосвязи концентраций валовых и подвижных форм изученных поллютантов с данными агрохимическими свойствами

Таблица 4. МЭДГ, удельная активность и плотность загрязнения светло-серой лесной почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr

Показатель	^{137}Cs		^{90}Sr		МЭДГ мкР/ч
	Бк/кг	Ки/км ²	Бк/кг	Ки/км ²	
<i>M</i>	6.9	0.048	3.8	0.027	12.5
<i>m</i>	0.3	0.002	0.4	0.003	0.4
<i>Me</i>	7.0	0.049	3.5	0.025	12.9
<i>V</i>	13.7	14.3	42.2	42.1	12.5
<i>Lim</i>	5.2–8.4	0.036–0.059	2.3–7.8	0.016–0.055	8.0–14.5
$r_{(\text{C}_{\text{орг}}/\text{ИРН})}$	0.27		0.18*		
$r_{(\text{pH}_{\text{KCl}}/\text{ИРН})}$	0.25		–0.26*		
$r_{(\text{ЕКО}/\text{ИРН})}$	–0.10		–0.37*		

почвы, которые оценивали по величинам коэффициентов корреляции (табл. 3).

В большинстве случаев между формами содержания ТМ и свойствами светло-серой лесной почвы отмечены взаимосвязи слабой и средней силы и реже – высокой. Судя по рассчитанным коэффициентам корреляции, более сильное влияние на концентрацию форм ТМ оказывало изменение уровня кислотности и величины ЕКО, наименее воздействие оказывало содержание $\text{C}_{\text{орг}}$. Отметим, что снижение кислотности почвы достоверно влияло на уменьшение содержания подвижных форм Си, а увеличение ЕКО существенно влияло на поглощение Нг на поверхности почвенных коллоидов.

Определение удельной активности ИРН позволило охарактеризовать радиационную обстановку на исследованной территории путем сравнения их удельных активностей со среднестатистическим их содержанием в почвах, обусловленным их глобальными выпадениями. Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в светло-серой лесной почве участка отражены в табл. 4.

Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве участка не превышали величины фона глобальных выпадений – 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [33]. Плотность загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr пахотного слоя почвы в среднем составляла 0.048 Ки/км² ($\text{lim} = 0.036\text{--}0.059$) и 0.027 Ки/км² ($\text{lim} = 0.016\text{--}0.055$) соответственно, что было значительно меньше допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки – 1.0 и 0.1 Ки/км² соответственно. Это позволило отнести почву участка к незагрязненной территории, пригодной без ограничений для сельскохозяйственного использования [5]. Варьирование величин МЭДГ, удельной активности и плотности загрязнения почвы ^{90}Sr не подчинялись закону нормального распределения.

За время проведения мониторинга средняя величина МЭДГ почвы реперного участка не превышала средний показатель МЭДГ почв Ивановской обл. (15.4 мкР/ч) [34]. Пределы изменений МЭДГ почвы участка соответствовали типичным показателям серых

лесных почв России (8.0–13.6 мкР/ч) [35]. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$, уровень pH_{KCl} и величина ЕКО не оказывали заметного влияния на аккумуляцию ^{137}Cs и ^{90}Sr серой лесной почвой.

ВЫВОДЫ

1. За период мониторинга величина pH_{KCl} светло-серой лесной почвы в основном соответствовала уровню, близкому к нейтральному. Средние ежегодные величины гидролитической кислотности (H_T) преимущественно соответствовали очень низкой степени кислотности почвы. Отмечены тренды слабого снижения показателей pH_{KCl} и H_T .
2. Средняя обеспеченность почвы $\text{C}_{\text{орг}}$ соответствовала низкой степени. В динамике с 2009 по 2022 г. содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ слабо увеличилось.
3. Исследованная серая лесная почва имела очень низкую среднюю обеспеченность минеральным азотом в течение мониторинга. Средняя обеспеченность подвижными соединениями P_2O_5 и K_2O соответствовала высокой и повышенной степени соответственно. Установлены тренды увеличения содержания подвижных форм N-NH_4 , N-NO_3 , P_2O_5 и снижения содержания K_2O .
4. Среднее содержание обменных Са и Mg соответствовало средней и повышенной степеням обеспеченности почвы соответственно. Динамика содержания Са и Mg характеризовалась возрастающими трендами.
5. Средняя обеспеченность почвы основаниями соответствовала повышенной степени, степени насыщенности ими – высокой. Емкостно-сорбционные показатели почвы имели тенденцию к увеличению.
6. Концентрации подвижных форм В, Мо, Си, Zn, Со и Mn в почве участка соответствовали типичным показателям, свойственным для светло-серых лесных почв России. Почва имела среднюю степень обеспеченности изученными МЭ и низкую степень обеспеченности S. Концентрации Мо, Си, Zn, Со и S в почве

имели тренды к увеличению, Mn – к снижению, В – без изменения.

7. Содержания подвижных Pb, Cr и Hg в почве участка отличались значительно меньшими величинами в отличие от типичных показателей, характерных для данной почвы. Динамика изменения содержания Ni, Cd, Cr и Cu в почве описывалась возрастающими трендами, Zn, Pb, Hg и As – понижающими.

8. Концентрации подвижных форм ТМ и валовых форм Hg в светло-серой лесной почве были значительно меньше величин ПДК. По содержанию изученных ТМ почвы относятся к слабозагрязненным и не являются опасными для культурных растений и здоровья человека.

9. Снижение кислотности почвы достоверно влияло на снижение содержания подвижных форм Cu, а увеличение ЕКО существенно влияло на поглощение Hg почвенными коллоидами.

10. Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве участка не превышали показателей фона глобальных выпадений. Плотность загрязнения пахотного слоя ^{137}Cs и ^{90}Sr была значительно меньше допустимых уровней, что позволило отнести почву участка к незагрязненной территории, пригодной без ограничений для сельскохозяйственного использования. Средняя величина МЭДГ почвы реперного участка не превышала средний показатель МЭДГ почв Ивановской обл.

Авторы выражают благодарность сотрудникам САС “Ивановская” и лично Е.А. Востряковой за помощь в проведении почвенных анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шафран С.А. Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
2. Кирюшин В.И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // *Почвоведение*. 2019. № 9. С. 1130–1139.
3. Уткин А.А., Аканова Н.И., Нода И.Б. Динамика содержания и распределения микроэлементов в дерново-подзолистых почвах и растениях агроценозов // *Агрохимия*. 2023. № 8. С. 3–15. <https://doi.org/10.31857/S0002188123080100>
4. Уткин А.А., Мазиров М.А. Эффективное применение органических удобрений в сельскохозяйственном производстве: уч. пособ. Иваново: ИГСХА, 2022. 80 с.
5. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Метод. рук-во / Под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова. М.: Росинформагротех, 2005. 784 с.
6. Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С. Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агрохим. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
7. Уткин А.А., Лукьянов С.Н. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 12–21. <https://doi.org/10.31857/S0002188122030139>
8. Уткин А.А. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188122060126>
9. Уткин А.А. Мониторинг плодородия и экотоксикологического состояния реперных участков дерново-подзолистых почв Ивановской области // *Агрохимия*. 2023. № 4. С. 19–31. <https://doi.org/10.31857/S0002188123040130>
10. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Тов-во научн. изд-й КМК, 2006. 509 с.
11. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
12. Руководящий документ. Массовая доля кислоторастворимых форм металлов в пробах почв, грунтов и донных отложений. Методика измерений методом атомно-абсорбционной спектрометрии. РД 52.18.191–2018. Обнинск: Росгидромет, 2019. 36 с.
13. Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 52.18.289–90. М.: Гос. комитет СССР по гидрометеорологии, 1990. 36 с.
14. Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом. М.: ЦИНАО, 1993. 13 с.
15. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия / Под ред. Н.Г. Рыбальского. М.: Минприроды России, 1992.
16. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.
17. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: РАСХН, СО, 2013. 790 с.
18. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
19. Пейве Я.В. Агрохимия и биохимия микроэлементов. Избр. тр. М.: 1980. 430 с.

20. *Катальмов М.В.* Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 330 с.
21. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
22. *Бакирова В.Г., Минибаев В.Г., Тюменева Р.Б.* Содержание различных форм марганца, кобальта и молибдена в дерново-подзолистых и серых лесных оподзоленных почвах Марийской и Чувашской АССР // Научные основы повышения плодородия почв. Саранск, 1983. С. 114–118.
23. *Панасин В.И.* Микроэлементы и урожай. Калининград: Калининград. кн. изд-во, 2000. 276 с.
24. *Битюцкий Н.П.* Микроэлементы и растение. Уч. пособ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 232 с.
25. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 5. С. 39–47.
26. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / Под ред. М.М. Овчаренко. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.
27. *Шихова Л.Н., Егошина Т.Л.* Тяжелые металлы в почвах и растениях таежной зоны Северо-Востока европейской России. Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2004. 264 с.
28. *Зырин Н.Г., Садовникова Л.К.* Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1985. 209 с.
29. *Кабата Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
30. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
31. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
32. *Чернова О.В., Бекецкая О.В.* Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1102–1113.
33. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. К.П. Махонько. Обнинск: НПО “Тайфун”, 1991.
34. *Уткин А.А., Аканова Н.И., Нода И.Б.* Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в дерново-подзолистых почвах и растениях реперных участков Ивановской области // Агрохимия. 2023. № 7. С. 75–85.
<https://doi.org/10.31857/S0002188123070116>
35. *Орлов П.М., Аканова Н.И.* Радиоактивность почв сельскохозяйственных угодий Сибири в условиях различной интенсивности химизации сельскохозяйственного производства // Агрохимия. 2019. № 9. С. 91–96.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119090102>

Fertility and Ecotoxicological Condition of Light Gray Forest Soils of the Ivanovo Region

A. A. Utkin^{a,*}, I. B. Noda^b

^a*Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy,
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127434, Russia*

^b*Agrochemical Service Station “Ivanovskaya”,
ul. Centralnaya 8, d. Bogorodskoye 153506, Russia*

^{*}*E-mail: aleut@inbox.ru*

The results of long-term monitoring of light gray forest soil for agricultural purposes in the Ivanovo region are presented, which was carried out to establish the level of fertility according to the main agrochemical indicators, the content of mobile forms of trace elements and sulfur, the ecotoxicological state according to the content of gross and mobile forms of heavy metals, arsenic, caesium-137 and strontium-90. The average values of the indicators, their levels of change and trends in changes in the metabolic and hydrolytic acidity of the soil, availability of organic matter, mobile forms of nitrogen, phosphorus, potassium, exchangeable calcium, magnesium and other bases, mobile forms of boron, copper, zinc, molybdenum, cobalt, manganese and sulfur have been established. According to the content of trace elements in the soil, the needs for the use of micronutrients are determined. Changes, concentrations and trends in the mobile forms of cadmium, lead, copper, zinc, nickel, chromium, mercury and arsenic in the soil have been determined. The study established background values, changes and trends in the specific activities of caesium-137 and strontium-90, the density of their contamination of the soil of the site and the power of the exposure dose of gamma radiation. According to the Pearson–Spearman correlation coefficients, the peculiarities of the influence of the content of organic matter, the level of acidity and the capacity of cation exchange on the content of mobile forms of trace elements, sulfur, gross and mobile forms of metals and radionuclides were established.

Keywords: fertility, light gray forest soil, trace elements, heavy metals, artificial radionuclides, reference sites, Ivanovo region.

УДК 543.42.062:546.72:631.445

МЕТОДИКА ЭКСПРЕССНОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В ДИТИОНИТНЫХ ВЫТЯЖКАХ ИЗ ПОЧВ

© 2024 г. Н. Н. Данченко^{1,*}, Е. В. Цомаева¹, Д. А. Жулидова²,
Ш. А. Хаматнуров¹, З. С. Артемьева¹

¹Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

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

*E-mail: nataly_danch@mail.ru

Разработана и оптимизирована методика определения дитионитного железа для навесок почв и фракций порядка 20–25 мг со спектрофотометрическим окончанием. В отличие от ранее описанных методик в качестве хромогена использован фенантролин, что позволило упростить анализ, исключив стадию сжигания. Оптимизирована процедура обработки образцов цитрат-бикарбонат-дитионитным экстрагентом. Исследована повторяемость и внутрилабораторная воспроизводимость методики. Верификация предложенной методики путем сравнения со стандартной показала хорошую сходимость результатов.

Ключевые слова: дитионитное Fe, методика определения, спектрофотометрическая детекция, фенантролин.

DOI: 10.31857/S0002188124050104, EDN: CYKTLK

ВВЕДЕНИЕ

Железо является четвертым по распространенности (после O, Si и Al) элементом в литосфере и многих почвах и играет важную роль в процессах почвообразования [1, 2, 3]. Оно способствует стабилизации органического вещества (ОВ) в почве через различные механизмы: 1 – сорбцию ОВ активной поверхностью аморфных и слабо окристаллизованных оксигидроксидов, 2 – образование устойчивых комплексов ионов Fe с гуминовыми веществами почв, 3 – катализ окисления органических остатков ионами Fe (реакция Фентона) и др. [4, 5]. Железо также вносит существенный вклад в микроагрегацию почв, т.к. его оксигидроксиды являются одним из важных строительных блоков при формировании агрегатов, а ионные формы – цементирующим агентом [6]. В то же время его присутствие в кристаллической структуре способствует выветриванию первичных минералов [3]. В связи с этим при решении многих исследовательских задач возникает необходимость определения содержания разных форм Fe в почве. Основное значение для всех перечисленных процессов имеют несиликатные формы железа, содержание которых в почве и грунтах обычно оценивают по цитрат-бикарбонат-дитионитной (ЦБД) вытяжке по Мера–Джексоу [7]. И хотя разделение

между плохо окристаллизованными и кристаллическими фракциями оксидов Fe зависит от многих факторов и не является абсолютным при использовании любых реактивов [8, 9], данный метод наиболее широко принят в мировой практике почвенного анализа [8, 10–12].

Метод основан на растворении оксигидроксидов железа путем восстановления Fe (III) до Fe (II), соединения которого гораздо более растворимы, и создании условий для удержания ионов железа в растворе за счет образования цитратных комплексов. Обычной аналитической практикой в настоящий момент является определение концентрации Fe в полученных вытяжках методом атомно-абсорбционной спектроскопии [12], однако довольно часто возникает необходимость использования более дешевого и портативного метода, такого как спектрофотометрия (СФ).

Ранее в работе [13] была разработана методика для анализа навесок порядка 10–20 мг, где концентрация Fe определяется СФ-методом с роданидом калия. Роданид-ионы образуют прочные окрашенные комплексы с Fe(III), поэтому перед анализом необходимо удалять дитионит и окислять восстановленное Fe(II) обратно до трехвалентного состояния. Это достигается обработкой вытяжек пероксидом водорода при нагревании, либо сжиганием

в тиглях при добавлении концентрированных серной и азотной кислот, что значительно удлиняет время анализа. Та же проблема возникает при использовании в качестве реагента сульфосалициловой кислоты [12, 14, 15]. Однако существует и широко используется для СФ-определения железа в водных растворах реагент, который образует устойчивые комплексы именно с Fe(II) – 1,10-фенантролин (далее – фенантролин). Он количественно реагирует с двухвалентным железом в широком интервале pH от 2.0 до 9.0, образуя оранжево-красный комплекс $(C_{12}H_8N_2)_3Fe^{2+}$ – ферроин [15]. Благодаря высокому коэффициенту экстинкции комплекса метод является высокочувствительным. Реагент нечувствителен к присутствию дитионита, фосфатов, хлоридов, сульфатов. Ацетаты, цитраты и тартраты также не влияют на определение, т.к. устойчивость фенантролиновых комплексов Fe на несколько порядков больше, чем с этими органическими ионами [15]. Fe(III) также взаимодействует с фенантролином, образуя окрашенные комплексы, но чувствительность этого варианта гораздо меньше, и он используется для определения только сравнительно высоких концентраций железа [15]. В почвенной практике данный реагент рекомендован для определения закисного Fe и его подвижных форм в кислотных вытяжках [10, 16].

Цель работы – разработка и оптимизация методики СФ-определения железа в ЦБД-вытяжке с использованием комплексобразования с *o*-фенантролином для анализа микронавесок почвы массой порядка 20–25 мг. Исследование применимости и ограничений ЦБД-вытяжки, как метода оценки содержания несиликатного или свободного Fe, не входило в задачи настоящей работы, т.к. этот аспект неоднократно освещался в литературе [9, 17].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы почв. Для отработки методики использовали образец дерново-подзолистой почвы, отобранный на делянке Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ им. М.В. Ломоносова “Чашниково”. Для этого образца было предварительно определено содержание дитионитного Fe по стандартной методике [12] с атомно-абсорбционным окончанием. Оно составило $1.21 \pm 0.05\%$. Для верификации методики использовали стандартные образцы курского чернозема, московской дерново-подзолистой и прикаспийской светло-каштановой почв (СП1, СП2 и СП3, №№ 901-76, 902-76, 903-76 соответственно по Госреестру мер и измерительных приборов), отличавшихся высокой степенью гомогенности и стандартизированные по содержанию органического углерода [18].

Реактивы. Цитрат, гидрокарбонат и дитионит Na, а также фенантролин квалификации не ниже ч.д.а. использовали без дополнительной очистки. Дитионит натрия для предотвращения его окисления на свету хранили в склянке темного стекла и заменяли не реже 1-го раза в полгода. Для приготовления калибровочных растворов использовали ГСО ионов железа (III) 1 г/л, фон – 1М азотная кислота (ГСО 7835–2000).

Для приготовления рабочих водных растворов: 0.3 М цитрата Na, 1М бикарбоната Na и 0.1%-ного фенантролина брали навески сухих реактивов на аналитических весах и растворяли в дистиллированной воде. Рабочий раствор 0.1%-ного фенантролина хранили в темноте. Рабочий стандартный раствор ионов Fe 0.01 г/л готовили, разбавляя 1 мл аликвоту ГСО 1 г/л дистиллированной водой в 100 мл мерной колбе, и подкисляли 1 каплей 1 М HCl.

Оборудование. Исследование проведено с привлечением оборудования Центра коллективного пользования Почвенного института им. В.В. Докучаева. Атомно-абсорбционное определение Fe проводили на спектрофотометре Agilent AA-240 (США). Для измерения оптической плотности растворов фенантролиновых комплексов Fe использовали микропроцессорный фотоколориметр “ЭКОТЕСТ 2020-РС”, ЭКОНИКС, Россия, который можно использовать как стационарно, так и в полевых условиях. Измерения проводили при 502 нм.

Приготовление ЦБД-вытяжек по Мера–Джексону. В пластиковые центрифужные пробирки емкостью 10–15 мл (с крышкой) помещали навески образцов 20–25 мг, добавляли 4 мл 0.3 М цитрата Na и 0.5 мл 1 М бикарбоната Na, перемешивали, помещали пробирки на водяную баню с температурой 80°C, оборудованную держателем для пробирок, и нагревали 4–5 мин, чтобы содержимое нагрелось до 80°C. В нагретые пробирки добавляли маркированной ложкой 80–100 мг порошка дитионита натрия, взбалтывали и оставляли нагреваться с открытой крышкой в течение 15 мин. После этого вынимали пробирки из бани, закрывали пробками и тщательно встряхивали, затем помещали на ротатор, перемешивали 10 мин и оставляли до утра. Утром пробирки еще раз встряхивали на ротаторе 10 мин. Затем переносили пробирки в штатив на стол, добавляли 0.5 мл насыщенного раствора NaCl и центрифугировали 5 мин при 3000 об./мин. Затем сливали супернатант в мерные колбы или пробирки на 50 мл. К осадку в пробирках добавляли новую порцию экстрагента и повторяли весь процесс еще 2 раза, уже не оставляя на ночь. Супернатант сливали в те же мерные колбы (или пробирки) и доводили растворы до метки дистиллированной водой.

СФ-определение Fe с фенантролином. Для построения градуировочной кривой готовили калибровочные растворы, содержащие реактивы, используемые для

вытяжек по Мера–Джексону, в тех же количествах, что и анализируемые пробы. В мерные колбы на 50 мл вносили небольшое количество дистиллированной воды и рабочий стандартный раствор ионов Fe в соответствии с табл. 1:

№ раствора	1	2	3	4	5	6
Объем рабочего стандартного раствора ионов Fe (0.01 г/л), мл	0	1	2.5	3.5	5	7
Концентрация ионов Fe в калибровочном растворе, мг/л	0	0.2	0.5	0.7	1	1.5

Добавляли в колбы 2.4 мл раствора цитрата натрия, 0.3 мл раствора NaHCO_3 , приблизительно 50 мг дитионита Na, тщательно перемешивали, вращая колбу. Затем добавляли 1 мл раствора фенантролина, доводили до метки, давали постоять не менее 1.5 ч и фотометрировали при $\lambda = 502$ нм.

Для подготовки к фотометрическому анализу полученных экстрактов необходимо было отобрать аликвоту 10 мл и перенести в чистые мерные пробирки на 50 мл. Затем добавить в каждую пробирку по 1 мл раствора фенантролина, довести до метки и дать постоять 15 мин перед фотометрированием.

Обработка данных. Для обработки результатов измерений использовали статистический пакет Microsoft Excel 2010, выбранный уровень значимости $p = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация условий проведения ЦБД-вытяжки для анализа микропроб почв и почвенных фракций. На первом этапе до подбора условий СФ-определения Fe провели оптимизацию условий проведения ЦБД-вытяжки для микронавесок, взяв за основу методику [13].

Подготовка образцов почвы перед экстракцией. В исходной методике для более полного взаимодействия экстрагента с поверхностью частиц предусмотрено ультразвуковое диспергирование. Авторы отмечали увеличение растворимости соединений Al, Fe и Si при озвучивании. Однако не совсем корректно сравнивать результаты, полученные таким способом, с полученными традиционным вариантом для 1–5 г проб почв, где пробы измельчают и пропускают через сито 0.25 мм. Кроме того, следует отметить, что сами реактивы дитионитного метода, являясь солями натрия, обладают выраженной диспергирующей способностью [19]. В связи с этим для упрощения процедуры и стандартизации условий стадия ультразвукового диспергирования образца была заменена гомогенизацией путем растирания и пропускания через сито 0.05 мм.

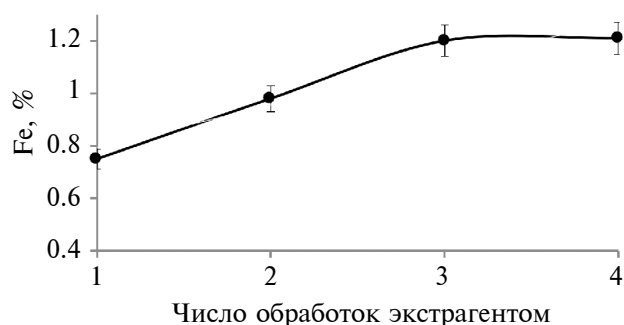


Рис. 1. Зависимость результата определения Fe в ЦБД-вытяжке от количества обработок образца почвы.

Время и кратность обработки пробы ЦБД-смесью. С использованием в качестве аналитического окончания ААС-метода было исследовано влияние на экстракцию Fe и воспроизводимость результатов времени и кратности обработки пробы почвы ЦБД-смесью, а также объема и кратности добавления раствора NaCl (как коагулянта коллоидов, мешающих СФ-определению). В первоначальном варианте методики [7] предлагали проводить однократную обработку всех образцов, за исключением тех, содержание экстрагируемого Fe_2O_3 в которых превышало 5%. Для последних рекомендовали 2–3-кратную обработку. Аналогичная рекомендация дана и в методике [13]. Исследование зависимости определяемой концентрации железа от кратности обработки ДЦБэкстрагентом показало, что 3-кратной обработки достаточно для достижения стабильного результата. Дальнейшее увеличение числа обработок не вело к заметному росту результата. При такой кратности наблюдали наилучшую повторяемость и воспроизводимость данных при анализе по предлагаемому нами варианту методики для малых навесок (рис. 1).

Объем и кратность добавления раствора NaCl. В исходной методике [7] объем добавляемого NaCl составляет $\frac{1}{4}$ от объема цитрата, в методике [13] — $\frac{1}{2}$. Чтобы подобрать оптимальную добавку раствора NaCl мы исследовали зависимость количества экстрагируемого Fe от добавленного объема NaCl при 3-кратной экстракции (табл. 1).

Показано, что увеличение объема добавки NaCl с 0.5 до 2.0 мл не ло на результат определения Fe. Поэтому в дальнейшем мы использовали минимальный объем добавки 0.5 мл.

В методике [7] рекомендуется добавлять раствор NaCl к каждой порции перед отделением экстракта от осадка, а в [13] — промывать порцией раствора NaCl осадок после 2-го центрифугирования. В использованных для предварительной отработки методики образцах почвы наблюдали пептизацию

Таблица 1. Влияние объема добавки насыщенного раствора NaCl на результаты определения железа

Объем добавки NaCl, мл	0.5	1.0	2.0
Содержание Fe, % (стандартное отклонение)	1.22 (0.05)	1.19 (0.06)	1.21 (0.05)

коллоидов при отделении раствора от осадка после центрифугирования уже первой порции экстракта. В связи с этим мы рекомендуем добавлять раствор NaCl к каждой порции экстракта перед центрифугированием. Количество извлекаемого в таком варианте Fe по сравнению с однократной добавкой NaCl для использованной дерново-подзолистой почвы увеличилось с 0.98 ± 0.03 до $1.22 \pm 0.06\%$.

Подбор условий СФ-определения Fe. Проверка на отсутствие мешающего влияния почвенного ОВ.

Мы предположили, что присутствие почвенного органического вещества (ОВ) не должно мешать определению Fe с фенантролином, т.к. максимум поглощения ферроина лежит в длинноволновой области >500 нм, где природное ОВ поглощает очень слабо. Чтобы подтвердить данное предположение, провели параллельное определение Fe в том же образце почвы, предварительно обработанном пероксидом водорода при нагревании. Результат определения значимо не отличался от полученного без обработки H_2O_2 : $1.18 \pm 0.05\%$. Следовательно, присутствие почвенного ОВ не мешает определению Fe предлагаемым методом.

Исследование влияния времени экспозиции с реактивами на оптическую плотность калибровочных растворов. В ГОСТ 27395–87 рекомендуется фотометрировать растворы уже через 10 мин после добавления раствора фенантролина и восстановителя, однако авторами работы [20] было показано, что окраска ферроина развивается не мгновенно после добавления реактивов к раствору, содержащему Fe(III), а требует порядка 2 ч, особенно для концентраций >1.0 мг/л. Соблюдение закона

Бугера–Ламберта–Бера (линейность зависимости оптической плотности от концентрации раствора) наблюдается только после этого времени. В связи с этим мы исследовали скорость развития окраски ферроина в калибровочных растворах, содержащих реактивы дитионитной вытяжки (рис. 2).

Показано, в изученной системе устойчивая окраска развивалась в течение 1.5 ч. Дальнейшее увеличение времени экспозиции не приводило к росту оптической плотности растворов в исследованном диапазоне концентраций Fe.

В экспериментальных ЦБД-вытяжках окраска развивалась почти моментально после добавления фенантролина, это было связано с тем, что железо в этих образцах уже переведено в двухвалентную форму и не требуется времени на реакции восстановления.

Исследование диапазона линейности градуировочной кривой. Показано (рис. 3), что зависимость оптической плотности от концентрации носила линейный характер в достаточно узком диапазоне: от 0 до 1.5 мг/л. Для повышения надежности получаемых результатов в дальнейшем для калибровки и измерений использовали только этот диапазон.

В качестве достоинства данной методики следует отметить высокую временную стабильность калибровочных растворов: при хранении между измерениями в холодильнике ($4^\circ C$) их оптическая плотность оставалась постоянной в течение 2 мес.

Оценка воспроизводимости результатов определения Fe по предложенной методике. Для оценки прецизионности методики проводили определение Fe

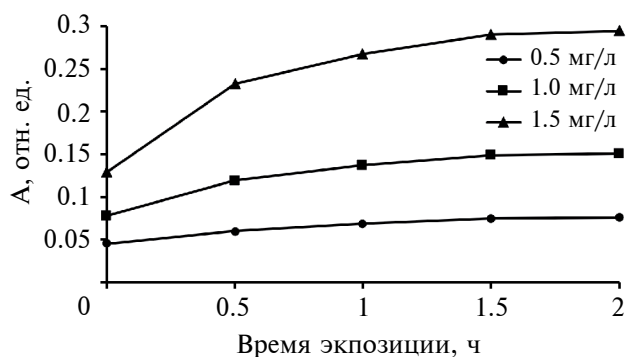


Рис. 2. Зависимость оптической плотности A от времени экспозиции с фенантролином для калибровочных растворов с разной концентрацией Fe.

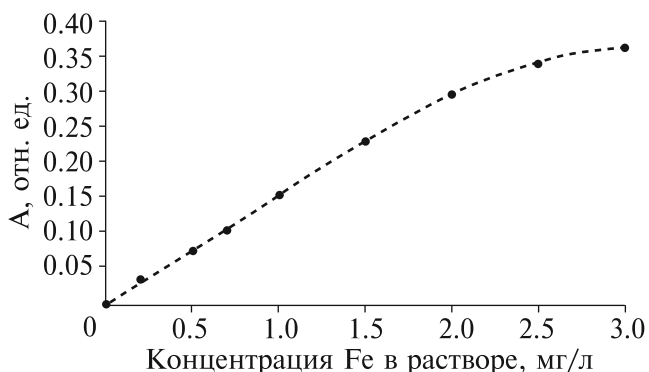


Рис. 3. Градуировочная зависимость оптической плотности (A) раствора фенантролината железа от концентрации Fe(II) в стандартном растворе в присутствии реактивов ЦБД-вытяжки.

Таблица 2. Оценка повторяемости и воспроизводимости результатов определения дитионитного Fe в стандартных образцах почвы по предложенной методике

Образец	День анализа	Результаты единичных определений содержания Fe в образце, %			Среднее	СКО*	
		I	II	III		s_r^{**}	s_R^{***}
СП1	1	1.025	1.033	1.016	1.025	0.008	0.05
	2	0.923	0.965	0.98	0.956	0.030	
	3	1.022	0.947	0.963	0.977	0.039	
СП2	1	0.853	0.784	0.88	0.839	0.05	0.05
	2	0.867	0.824	0.846	0.846	0.02	
	3	0.822	0.853	0.815	0.83	0.02	

* Среднеквадратичное отклонение.

** В условиях повторяемости.

*** В условиях воспроизводимости.

Таблица 3. Сравнение результатов определения дитионитного Fe в стандартных образцах почвы по предложенной и стандартной методикам [12]

Образец	Средняя величина содержания Fe, % \pm СКО*	
	предложенная методика	стандартная методика
СП1	1.02 \pm 0.02	1.02 \pm 0.01
СП2	0.82 \pm 0.03	0.85 \pm 0.03
СП3	0.81 \pm 0.04	0.80 \pm 0.04

* Для 3-х аналитических повторностей.

в 2-х стандартных образцах почвы СП1 и СП2 в 3 разных дня в течение 1-го мес. двумя операторами, каждый раз в 3-х аналитических повторностях, что обеспечило условия повторяемости и воспроизводимости в соответствии с МИ 2336–2002 [21]. Результаты этой оценки отражены в табл. 2.

Показано, что среднеквадратичное отклонение как в условиях повторяемости (параллельные измерения), так и в условиях воспроизводимости, не превысило 4% от измеряемой величины.

Верификация методики сравнением со стандартной методикой. Для верификации методики провели определение дитионитного Fe в стандартных образцах почв СП1, СП2 и СП3 по предложенной методике и по стандартной методике с атомно-абсорбционным окончанием [12] с навесками порядка 1.0 г (табл. 3).

Сравнение показало хорошую сходимость результатов, полученных согласно предложенной методике со спектрофотометрическим окончанием и полученных по стандартной методике с атомно-абсорбционным окончанием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная методика может быть использована для определения дитионитного

железа при недоступности атомно-абсорбционного метода, для удешевления массовых анализов и для малых навесок почв и почвенных фракций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зонн С.В. Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 208 с.
2. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1992. 400 с.
3. Sposito G. The Chemistry of soils. 3rd Ed. Oxford University Press, 2016. 272 p.
4. von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review // Eur. J. Soil Sci. 2006. V. 57. P. 426–445.
5. Santos A., Firaka D.S., Melo V.F., Ribeiro R.R., Peralta-Zamora P. Understanding the nature of Fenton processes in soil matrices: The role of iron forms and organic matter // Sci. Total Environ. 2021. V. 796. 148804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148804>
6. Totsche K., Amelung W., Gerzabek M., Guggenberger G., Klump E., Knief C. Microaggregates in soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2018. V. 181. P. 104–136.
7. Mehra O.P., Jackson M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered

- with sodium bicarbonate // *Clays and Clay Miner.* 1960. V. 7. P. 317–327.
8. *Shang Ch., Zelazny L.W.* Selective dissolution techniques for mineral analysis of soils and sediments // *Methods of Soil Analyses* / Eds. A.L. Ulery, L.R. Drees. P. 5 – Mineralogical method. Ch. 3. Soil Science Society of America, 2008.
 9. *Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А.* Дискуссионные вопросы интерпретации результатов химической экстракции соединений железа из почв // *Почвоведение.* 2014. № 6. С. 697–704.
 10. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
 11. *Courchesne F., Turmel M.-C.* Extractable Al, Fe, Mn, and Si // *Soil Sampling and Methods of Analysis* / Eds. M.R. Carter, E.G. Gregorich. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science, CRC Press and Taylor & Francis Group. Oxford, UK, 2008.
 12. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
 13. *Шаймухаметов М.Ш., Травникова Л.С., Березина Н.В.* Методы определения Al, Fe и Si в вытяжках из малых навесок почв // *Почвоведение.* 1981. № 11. С. 143–150.
 14. *Лурье Ю.Ю.* Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971. 456 с.
 15. *Пешкова В.М., Громова М.И.* Методы абсорбционной спектроскопии в аналитической химии. М.: Высш. шк., 1976. С. 155–156.
 16. ГОСТ 27395-87. ПОЧВЫ. Метод определения подвижных соединений двух- и трехвалентного железа по Веригиной–Аринушкиной. Введен 01.07.1988.
 17. *Бабанин В.Ф., Бойченко В.О., Минеева Н.С., Филатов А.В.* Изучение различных форм соединений железа и их роль в процессе почвообразования // *Изв. вуз. Хим. и хим. технол.* 2017. Т. 60. Вып. 7. С. 91–96.
 18. *Козут Б.М., Фрид А.С.* Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // *Почвоведение.* 1993. № 9. С. 118–122.
 19. *Wintermyer A.M., Kinter E.B.* Dispersing agents for particle-size analysis of soils // *Highw. Res. Board Bull.* 1955. V. 95. P. 1–14.
 20. *Третьякова С.Г., Розенкевич М.Б., Растунова И.Л.* Совершенствование спектрофотометрической методики определения железа в растворе при его комплексообразовании с *o*-фенантролином // *Усп. в хим. и хим. технол.* 2007. Т. XXI. № 8(76). С. 18–22.
 21. МИ 2336–2002 ГСИ. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки.

Method of Rapid Spectrophotometric Determination of Iron in Dithionite Extracts of Soils

N. N. Danchenko^{a, #}, E. V. Tsomaeva^a, D. A. Zhulidova^b, S. A. Khamaturov^a, Z. S. Artemyeva^a

^a*Federal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
Pyzhyovskiy per. 7, bld. 2., Moscow 119017, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty,
Leninskie gory 1, bld. 12, Moscow 119991, Russia*

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

A method for the determination of dithionite iron for soil samples and fractions of the order of 20–25 mg with a spectrophotometric termination has been developed and optimized. Unlike the previously described methods, phenanthroline was used as a chromogen, which made it possible to simplify the analysis by eliminating the combustion stage. The procedure for processing samples with citrate-bicarbonate-dithionite extractant has been optimized. The repeatability and intra-laboratory reproducibility of the technique are investigated. Verification of the proposed methodology by comparison with the standard one showed good convergence of the results.

Keywords: dithionite Fe, determination technique, spectrophotometric detection, phenanthroline.

УДК 631.46

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ БАКТЕРИЙ, СТИМУЛИРУЮЩИХ РОСТ РАСТЕНИЙ: ФИКСАЦИЯ АЗОТА, СОЛЮБИЛИЗАЦИЯ ФОСФАТА, СИНТЕЗ СИДЕРОФОРОВ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МИКРОБНЫХ КОНСОРЦИУМОВ[§]

© 2024 г. А. М. Тимофеева^{1,2}, М. Р. Галямова², С. Е. Седых^{1,2,*}¹Институт химической биологии и фундаментальной медицины Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 8, Россия²Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

*E-mail: sedyh@niboch.nsc.ru

В обзоре приведены литературные данные о почвенных бактериях, фиксирующих атмосферный азот, солюбилизирующих фосфаты и синтезирующих сидерофоры, тем самым стимулирующих рост растений. Рассмотрены перспективы создания бактериальных консорциумов для внесения в почву с целью повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и снижения доз вносимых удобрений. Использование ризосферных бактерий, способных фиксировать атмосферный азот, минерализовать неорганические и органические фосфаты, повышать биодоступность нерастворимого железа, а также их консорциумов, соответствует задачам устойчивого сельского хозяйства, повышает плодородие почвы и увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур. Совместное использование бактерий, стимулирующих рост растений, с минеральными удобрениями позволяет снизить количество вносимых удобрений, что является несомненным трендом устойчивого земледелия. Исследования возможности использования различных препаратов почвенных бактерий, стимулирующих рост растений в последние годы широко проводят за рубежом, эти исследования актуальны для российского сельского хозяйства, имеют перспективы импортозамещения и необходимы для достижения технологического суверенитета в данной области.

Ключевые слова: бактерии, стимулирующие рост растений, почвенные бактерии, ризосферные бактерии, солюбилизация фосфатов, биоудобрения, фиксация азота, фосфорные удобрения, сидерофоры, устойчивое сельское хозяйство.

DOI: 10.31857/S0002188124050111, EDN: CYNMZK

ВВЕДЕНИЕ

Применение минеральных удобрений во второй половине двадцатого века было одним из основных факторов, способствовавших развитию растениеводства, однако несбалансированное внесение удобрений может оказывать негативное влияние на его устойчивость и экологическую безопасность [1]. Другим следствием является нарушение разнообразия почвенного микробиома, что также приводит к снижению плодородия. В настоящее время применение бактерий, благоприятно влияющих на рост растений, является перспективным направлением исследований по повышению плодородия почв и стимуляции урожайности [2]. Бактерии, стимулирующие рост

растений, естественным образом напрямую и косвенно усиливают рост растений в результате фиксации атмосферного азота [3], синтеза растительных гормонов, сидерофоров [4], стимулируя усвоение растениями питательных веществ [5] или угнетая вредителей [6]. Что еще более важно, такие бактерии могут взаимодействовать с корнями растений и повышать устойчивость к абиотическим стрессам [7].

В данном обзоре подробно рассмотрены различные аспекты использования почвенных бактерий, стимулирующих рост растений. Описаны азотфиксирующие, фосфатсолюбилизирующие и сидерофорпродуцирующие активности почвенных микроорганизмов, а также возможность создания микробных консорциумов для внесения в почву, в том числе в сочетании с удобрениями, для решения актуальных задач устойчивого сельского хозяйства.

[§]Исследование поддержано проектом Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2021-1085.

АЗОТФИКСИРУЮЩИЕ БАКТЕРИИ

Бактерии, фиксирующие атмосферный азот (N_2), обитают в тканях растений (например, в клубеньках, корнях) и на границе раздела почва–ризосфера и могут поставлять значительные количества минерального азота, необходимого для роста [8]. Процесс азотфиксации описан для симбиотических бактерий бобовых и несимбиотических почвенных гетеротрофных или автотрофных бактерий, обитающих в почве, воде, на камнях или опавших листьях. Считается, что симбиотические бактерии клубеньков бобовых являются наиболее важным компонентом биологической фиксации атмосферного азота. Литературных данных о несимбиотических азотфиксирующих почвенных бактериях значительно меньше, в основном публикации посвящены зерновым культурам, например, кукурузе, рису и пшенице. Среди несимбиотических азотфиксирующих бактерий, повышающих продуктивность зерновых культур, описаны бактерии родов: *Beijerinckia*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Herbaspirillum*, *Gluconacetobacter*, *Burkholderia*, *Clostridium*, *Methanosarcina* и *Paenibacillus* [9, 10].

НЕСИМБИОТИЧЕСКИЕ АЗОТФИКСИРУЮЩИЕ БАКТЕРИИ

Литературные данные свидетельствуют о том, что, когда минеральный азот доступен в почве, свободноживущие азотфиксаторы могут использовать его, а не фиксировать азот. Основным ферментом азотфиксации является нитрогеназа, активность которой характеризуется чувствительностью к кислороду, потребностью в металлах, входящих в состав субъединиц фермента – Fe, V, Mo, зависимостью от АТФ и восстановленных коферментов, а также низкой активностью в присутствии минерального азота. Свободноживущие азотфиксирующие бактерии могут быть облигатными анаэробами, факультативными анаэробами или облигатными аэробами и, таким образом, существуют в различных средах, при разном содержании молекулярного кислорода. Так как O_2 может ингибировать нитрогеназу и подавлять фиксацию N_2 , бактерии-азотфиксаторы избегают потенциально негативного воздействия O_2 по механизму изоляции азотфиксации в пространстве, например, с использованием структур, где концентрация кислорода поддерживается на низком уровне как в гетероцистах [11].

По некоторым данным, до 50% минерального азота в сельском хозяйстве поставляют азотфиксирующие почвенные бактерии [12]. Данный процесс является энергетически зависимым, для фиксации одной молекулы атмосферного азота требуется 16 молекул АТФ [3], но почвенные бактерии способны не только фиксировать атмосферный

азот, проявляя diazotrofnuyu активность, но и денитрифицировать минеральный азот до NO , N_2O и N_2 , что является нежелательным для агроэкосистем, а N_2O также является парниковым газом. Часто один штамм почвенных бактерий содержит одновременно разные гены метаболизма азота, экспрессия которых в значительной степени зависит от наличия минерального азота в окружающей среде. Предложены различные варианты консорциумов почвенных бактерий, способных к азотфиксации и способствующих к накоплению азота в почвах агроэкосистем.

Всем известным формам нитрогеназы требуются атомы Fe, большинство из них также содержит такие металлы, как Mo или V [13]. Для анализа способности бактерий к азотфиксации и представленности азотфиксаторов в сообществах широко используют ген *nifH*, кодирующий редуктазу нитрогеназы [14], а также ряд других генетических маркеров.

БАКТЕРИИ, СОЛЮБИЛИЗИРУЮЩИЕ ФОСФАТЫ

Фосфатсолюбилизирующие бактерии увеличивают биодоступность фосфора из почвы для растений: они растворяют неорганические фосфаты и минерализуют нерастворимые органические формы фосфора [15]. Кроме бактерий, способность к солюбилизации фосфатов описана и у грибов, образующих микоризу [16]. Данные о микроорганизмах, способных солюбилизировать фосфор, обобщены в табл. 1.

Считается, что среди всех микроорганизмов почвы фосфат-солюбилизирующие бактерии составляют до 50%, а фосфат солюбилизирующие грибы – до 0.5% соответствующей популяции. Большинство фосфатсолюбилизаторов выделено из ризосферы, где они проявляют метаболическую активность [37].

СОЛЮБИЛИЗАЦИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА

В почве соединения фосфора существуют в неорганической и в органической формах. Неорганические фосфаты могут быть представлены в виде первичных – апатитов, стренгитов и варисцитов и вторичных минералов – фосфатов железа, алюминия и кальция [38]. Фосфатсолюбилизирующие бактерии способны секретировать низкомолекулярные органические кислоты, этот механизм считается основным механизмом солюбилизации минеральных фосфатов [39]. Органические кислоты, продуцируемые почвенными бактериями, приводят к подкислению окружающей среды и, как следствие, к высвобождению фосфата в растворимой

Таблица 1. Почвенные микроорганизмы, проявляющие способность к солюбилизации соединений фосфора

Род бактерий	Источник
<i>Bacillus</i>	[17]
<i>Pseudomonas</i>	[18, 19]
<i>Azotobacter</i>	[20, 21]
<i>Agrobacterium</i>	[22]
<i>Micrococcus</i>	[23]
<i>Enterobacter</i>	[21]
<i>Serratia</i>	[24]
<i>Rhizobium</i>	[25, 26]
<i>Aeromonas</i>	[27]
<i>Burkholderia</i>	[27, 28]
<i>Erwinia</i>	[29]
<i>Kushneria</i>	[30]
<i>Paenibacillus</i>	[31]
<i>Rhodococcus</i> , <i>Serratia</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Sinomonas</i> и <i>Thiobacillus</i>	[32]
<i>Цианобактерии</i>	[15]
<i>Achrothcium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Arthrotrichum</i> , <i>Cephalosporium</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Curvularia</i> , <i>Cunninghamella</i> , <i>Chaetomium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Glomus</i> , <i>Helminthosporium</i> , <i>Micromonospora</i> , <i>Phenomicenpora</i> , <i>Phenomicenpora</i> , <i>Populospora</i> , <i>Pythium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Saccharomyces</i> , <i>Schizosaccharomyces</i> , <i>Schwanniomyces</i> , <i>Yarrowia</i>	[15, 33]
<i>Aspergillus</i> , <i>Torula</i> , <i>Trichoderma</i>	[34]
<i>Phenomyces</i>	[35]
<i>Sclerotium</i>	[36]

форме за счет замещения или хелатирования карбоксильными группами кислот ионов металлов, например, Ca^{2+} , Fe^{3+} и Al^{3+} из нерастворимых минеральных соединений [40].

Эффективность солюбилизации зависит от силы и природы кислот. Три- и дикарбоновые кислоты более эффективны по сравнению с одноосновными и ароматическими кислотами, также обнаружено, что алифатические кислоты более эффективны по сравнению с феноловыми кислотами. К органическим кислотам, которые солюбилизируют фосфаты, относят лимонную, молочную, глюконовую, 2-кетоглюконовую, шавелевую, уксусную, яблочную, фумаровую, янтарную, винную, малоновую, глутаровую, пропионовую, масляную, глиоксалиевую и адипиновую кислоты [37]. Для биохимического анализа органических кислот, принимающих участие в солюбилизации фосфатов, обычно используют методы ВЭЖХ, газовой хроматографии и масс-спектрометрии [5].

Органические кислоты образуются в результате метаболизма различных органических соединений, например, низкомолекулярные органические кислоты образуются в результате прямого окисления в периплазме и внутриклеточного фосфорилирования [41].

МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ

Содержание органического фосфора в почве может достигать 30–50% от общего количества фосфора, а почвенный органический фосфор в основном находится в форме инозитолфосфата, также называемого почвенным фитатом. Известны и другие органические соединения фосфора: фосфомоноэфиры, фосфодизэфиры, фосфолипиды, нуклеиновые кислоты и фосфотриэфиры [22], кроме того, органический фосфор также содержат фосфонаты ксенобиотиков (пестицидов, моющих добавок, антибиотиков и антипиренов). Для усвоения растениями эти соединения должны быть преобразованы в растворимые ионные формы: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$ или низкомолекулярные органические фосфаты [42].

В процессе бактериальной минерализации фосфора участвуют разные группы ферментов. Первая группа ферментов дефосфорилирует фосфорноэфирную или фосфоангидридную связь органических соединений, это неспецифические кислые фосфатазы (*NSAP*). Наиболее изученными среди них являются фосфомоноэстеразы, также называемые фосфатазами. По механизму эти ферменты классифицируют на кислотные и щелочные [43]. Фитаза – это еще один фермент, продуцируемый фосфатсолюбилизирующими бактериями в процессе минерализации органического фосфора. Фитаза отвечает за высвобождение фосфора из органических материалов в почве, которые хранятся в форме фитата. Разложение фитата фитазой высвобождает фосфор в форме, доступной для растений [44].

Солюбилизация кислой фосфатазой показана у *Pseudomonas* sp. [45], *Burkholderia cepacia* [46], *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter cloacae*, *Citrobacter freundii*, *Proteus mirabilis* и *Serratia marcescens* [47], *Klebsiella aerogenes* [48] и *P. fluorescens* [49]. Солюбилизация органического фосфата за счет активности фитазы показана для *Bacillus subtilis*, *P. putida*, и *P. mendocina* [50]. Многочисленные публикации указывают на то, что производство фосфатаз почвенным микробиомом строго контролируется наличием неорганического фосфора и азота.

БАКТЕРИИ, СЕКРЕТИРУЮЩИЕ СИДЕРОФОРЫ

Железо является исключительно важным микроэлементом для многих процессов растений, в том числе для фотосинтеза и азотфиксации. Свободное Fe(II) быстро окисляется до Fe(III), а Fe(III) не является биодоступным из-за низкой растворимости, поэтому несмотря на обилие Fe(III) в земной коре, количество доступного для усвоения железа очень мало [51]. Микроорганизмы могут получать ионы железа за счет секреции сидерофоров, которые являются низкомолекулярными соединениями (500–1500 Да) и обладают высоким сродством к Fe(III). Основная функция сидерофоров – перевод железа в доступную для микроорганизмов форму, сидерофоры, продуцируемые почвенными микроорганизмами, обеспечивают растения железом и стимулируют их рост [52].

Бактерии, продуцирующие сидерофоры, принадлежат к 20-ти родам: *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Dickeya*, *Klebsiella*, *Nocardia*, *Pantoea*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Serratia* и *Streptomyces* [53–55].

СИДЕРОФОРЫ, ПРОДУЦИРУЕМЫЕ ПОЧВЕННЫМИ БАКТЕРИЯМИ

В молекуле сидерофоров атом железа координирован атомами кислорода, наиболее распространенная геометрия – октаэдрическая, что позволяет располагать 6 лигандов вокруг атома Fe с минимальным отталкиванием лигандов. Октаэдрическое поле способствует образованию термодинамически стабильных высокоспиновых частиц Fe(III), в зависимости от типа сидерофора октаэдрическое поле может быть искажено, а иногда в качестве координирующих атомов в состав сидерофора могут входить азот или сера, такие варианты сидерофоров имеют более низкое сродство к Fe(III) [56]. В структуре сидерофора ион Fe(III) может быть координирован такими бидентатными функциональными группами как гидроксаматы, α -гидроксикарбоксилаты и катехолаты, а также комбинациями полидентатных фенолятов, азотных гетероциклов и карбоксилатов [57].

В зависимости от химической природы сидерофоры классифицируют на катехолаты и феноляты, гидроксаматы, карбоксилаты и сидерофоры смешанного типа [58]. Сидерофоры смешанного типа по своей структуре соответствуют одновременно 2-м или 3-м классам, в связи с чем их выделяют в отдельный класс.

Гидроксаматные сидерофоры содержат структуру C(=O)N(OH)R, где R – аминокислота, либо ее производное, содержащее 2 атома кислорода, образующих бидентатный лиганд с ионами Fe [58]. При

соединении гидроксамата с Fe(III) функциональная группа гидроксамата теряет протон из группы гидроксилamina (–NOH) с образованием бидентатного лиганда. Бактерия *Bacillus megaterium* продуцирует 2 гидроксаматных шизокиноеновых сидерофора [59]. Штамм *Rhizobium leguminosarum* также продуцирует шизокиноеновый сидерофор [60]. Штамм *Pantoea vagans* C9–1 продуцирует десфериоксаминоподобный сидерофор гидроксаматного типа [61]. Некоторые штаммы *Rhizobium radiobacter* способны продуцировать сидерофоры гидроксаматного типа: например, *Rhizobium meliloti* продуцирует сидерофор, называемый ризобактином [62]. Вицибактин представляет собой циклический тригидроксаматный сидерофор, обнаруженный у *R. leguminosarum*, *R. phaseoli* [63].

В сидерофорах катехолатного типа ион Fe(III) связан с гидроксильными или катехолатными группами, в результате хелатирования Fe(III) образуется гексадентатно-октаэдрический комплекс, в котором от каждой катехолатной группы участвуют 2 атома кислорода. Катехолатные сидерофоры являются производными салициловой или 2,3-дигидроксibenзойной кислоты (2,3-DHBA) [64]. Сидерофор катехолатного типа – спирилобактин продуцируется *Azospirillum brasilense* [65]. Штамм *Azospirillum lipoferum* продуцирует 2,3- и 3,5-дигидроксibenзойную кислоту (DHBA), конъюгированную с треонином и лизином [66]. *A. vinelandii* продуцирует 4 сидерофора катехолатного типа: аминокхелин, азотхелин, протохелин и 2,3-DHBA [67]. *Rhizobium leguminosarum* также продуцирует 2,3-DHBA, конъюгированную с треонином [60]. Для *Bacillus subtilis* характерно образование 2,3-дигидроксилбензоилглицина, также известного как итеевая кислота [68]. Производство бациллибактина описано для *B. thuringiensis* [69]. *R. radiobacter* продуцирует трикатехолатный сидерофор, называемый агробактин [70].

Сидерофоры карбоксилатного типа связываются с железом за счет карбоксильных и гидроксильных групп и в настоящее время в литературе не описаны для почвенных бактерий, однако данные сидерофоры встречаются среди сидерофоров смешанного типа. Помимо перечисленных выше типов, некоторые сидерофоры содержат несколько хелатирующих Fe групп и поэтому их относят к смешанному типу.

Сидерофоры, продуцируемые флуоресцентными штаммами *Pseudomonas*, представляют собой пиовердины. Все пиовердины содержат один хинолиновый хромофор, пептид и дикарбоновую кислоту (или соответствующий ей амид), присоединенную к хромофору. Например, из *Pseudomonas fluorescens* выделены пиовердин, пиовердин 0 и пиовердин А (или феррибактин). Для

Pseudomonas B10 описаны псевдобактин и псевдобактин. *Pseudomonas fluorescens* продуцируют несколько сидерофоров: энантио-пиохелин, хинолобактин, орникокорругатин и пре-псевдомонин. В щелочной среде *Pantoea eucalypti* M91 способен продуцировать пиовердин-подобные и пиохелин-подобные сидерофоры. У *A. vinelandii* первым выделенным сидерофором был азотобактин, который является сидерофором пиовердинового типа [71].

Сидерофоры проявляют противогрибковые свойства. Одним из наиболее изученных сидерофоров с прямыми противогрибковыми свойствами является пиовердин, продуцируемый *Pseudomonas* spp., который способствует подавлению развития патогенов за счет усиления конкуренции за ионы железа: сидерофоры грибов обычно имеют более низкое сродство к Fe(III), чем сидерофоры бактерий [72]. Предполагается, что пиовердины могут играть роль в биологическом контроле фитопатогенных микроорганизмов в ризосфере, т.к. пиовердины образуют стабильные комплексы с почвенным железом, что делает этот важный элемент недоступным для питания вредных микроорганизмов ризосферы.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ СИДЕРОФОРОВ

Сидерофоры образуются в цитозоле и иногда в пероксисомах, после биосинтеза апо-сидерофоры секретируются в среду, где связывают ионы железа. Комплексы железо–сидерофор связываются со специфическими рецепторами внешней мембраны, благодаря которым сидерофоры переносятся в периплазму против градиента концентрации, по энергозависимому механизму транспорта. Внутри клетки бактерий ионы железа высвобождаются из комплекса и становятся доступными для метаболических процессов. Описано 2 основных механизма высвобождения железа: первый из них включает восстановление связанного сидерофором Fe(III) до Fe(II) с последующим спонтанным высвобождением или конкурентным связыванием восстановленных ионов [56]. К настоящему времени идентифицировано 2 семейства белков, участвующих в этом процессе, названных сидерофор-взаимодействующим белком и Fe-сидерофорредуктазой. Для второго пути высвобождения железа используются специализированные ферменты, которые гидролизуют комплекс железо–сидерофор [51]. Поскольку гидролитическое высвобождение железа приводит к разрушению каркаса сидерофора, оно более затратно для клетки, чем восстановление комплекса железо–сидерофор, которой позволяет повторно использовать сидерофор.

Известно, что сидерофоры бактерий обеспечивают растения железом и стимулируют их рост,

когда биодоступность этого металла низкая. Точный механизм данного процесса не установлен, но предложено 2 возможных пути, с помощью которых растения могут получать железо из микробных сидерофоров. Согласно первому механизму, сидерофоры бактерий, имеющие высокий окислительно-восстановительный потенциал, могут восстанавливаться и отдавать Fe(II) в транспортную систему растения. Предполагается, что согласно этому механизму, комплексы железо–сидерофор бактерий сначала транспортируются в апопласт корня растения, где и происходит восстановление сидерофоров. Таким образом, Fe(II) захватывается апопластом, что может приводить к высокой локальной концентрации железа в корне. Согласно второму механизму, сидерофоры бактерий хелатируют ионы железа из почвы, а затем осуществляют лигандный обмен с фитосидерофорами [73]. Описанные механизмы являются теоретическими и до сих пор не подтверждены экспериментально.

КОНСОРЦИИ ПОЧВЕННЫХ БАКТЕРИЙ, СТИМУЛИРУЮЩИХ РОСТ РАСТЕНИЙ

Микробиом почвы представляет собой сложное сообщество, состоящее из тысяч видов, между которыми могут происходить миллионы взаимодействий. Поскольку ни один вид не существует изолированно, эти взаимодействия приводят к возникновению новых свойств, не характерных отдельным бактериям. В связи с этим многовидовые консорциумы считают перспективными для применения в сельском хозяйстве по сравнению с одновидовыми инокулянтами [74]. Например, консорциум нескольких видов, не проявляющих антагонизма друг к другу, может вместе занимать более широкий спектр экологических ниш, что позволяет лучше заселять ризосферу растений. Кроме того, более разнообразный микробный консорциум может обладать большим количеством полезных для растений функций [75]. Следовательно, применение микробных консорциумов может принести в почву несколько полезных для растений функций, которые могут одновременно проявляться различными членами консорциума благодаря взаимодополняемости.

Например, инокуляция смесью почвенных бактерий, солибилизирующих фосфаты, принадлежащих к *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Streptomyces*, показали лучшие результаты с точки зрения роста и укоренения растений, чем индивидуальная инокуляция. Совместная инокуляция пшеницы фосфат-солибилизирующими бактериями, продуцирующими ауксин, *Pseudomonas fluorescens* Ms-01 и *Azospirillum brasilense* DSM1690) увеличивала биомассу корней и побегов по сравнению

с однократной инокуляцией тестируемыми бактериями [76]. Аналогично, инокуляция растений амаранта консорциумом из 3-х бактерий *Bacillus firmus*, *Cellulosimicrobium cellulans* и *Pseudomonas aeruginosa* увеличивали общую длину корня и общий рост растений по сравнению с моно- и двойной инокуляцией данными штаммами [77].

СОВМЕСТНОЕ ВНЕСЕНИЕ БАКТЕРИЙ И ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

Совместное внесение фосфатсольюбилизирующих бактерий и некоторых фосфорных удобрений дает синергический эффект и повышает агрономическую эффективность, например, при использовании фосфоритов. Инокуляция фосфатсольюбилизирующими бактериями значительно улучшает рост кукурузы при внесении с различными неорганическими и органическими удобрениями: навозом, птичьим пометом, суперфосфатом и фосфоритами [78]. Хорошие результаты показали растения пшеницы, инокулированные *Pseudomonas* sp. или *Enterobacter* sp. совместно с внесением диаммонийфосфата [79]. *Enterobacter* sp. увеличивают сольюбилизацию фосфоритов от 17.5 до 27% по сравнению с высвобождением только из фосфоритов (4%). Однократная инокуляция растений пшеницы 5-ю различными штаммами *Pseudomonas* (*P. plecoglossicida*, *P. reinekei*, *P. koreensis*, *P. japonica* и *P. frederiksbergensis*) в сочетании с внесением фосфоритов увеличивала доступность фосфатов, питательных веществ, повышала содержание хлорофилла, благоприятно влияла на морфологические характеристики, связанные с более высоким усвоением фосфора. Положительное влияние на рост растений оказывал консорциум из 3-х штаммов: *P. corrugata* SP77, *P. koreensis* LT62 и *P. frederiksbergensis* G62 в усилении роста люцерны (*M. truncatula*) при совместном внесении с фосфоритами [80].

Помимо способности почвенных фосфатсольюбилизирующих бактерий повышать эффективность использования минеральных фосфатных удобрений, известно и о благоприятном эффекте от внесения этих бактерий с органическими удобрениями. Например, совместное применение смеси компоста, остатков от производства биогаза и ископаемых фосфатов с фосфатсольюбилизирующими бактериями *Bacillus* sp. увеличило доступность свободного фосфата в почве, повысило содержание органических веществ в почве и увеличило популяцию фосфатсольюбилизирующих бактерий [81].

Таким образом, инокуляция сельскохозяйственных культур фосфат-сольюбилизирующими бактериями в сочетании с минеральными или

органическими удобрениями может быть использована в качестве перспективной комплексной стратегии увеличения доступности растворимых фосфатов и повышения агрономической эффективности использования фосфатных удобрений, повышения плодородия почвы и достижения целей устойчивого сельского хозяйства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования последних лет показали, что почвенные бактерии, стимулирующие рост растений, в качестве биоудобрений могут сыграть важную роль в устойчивом управлении почвенными ресурсами. Потребители сельскохозяйственной продукции обращают внимание на качество и пищевую ценность, важно чтобы исследователи продолжали изучение бактерий, благоприятно влияющих на рост растений и оперативно доводили результаты исследований до фермеров. Фиксация атмосферного азота, сольюбилизация фосфатов и повышение биодоступности железа в почве для использования растениями за счет почвенных бактерий способствует устойчивому развитию сельского хозяйства: повышает плодородие почвы и увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур. Использование таких бактерий и их консорциумов для инокуляции с семенами растений, а также при совместном внесении с минеральными удобрениями может в перспективе способствовать созданию технологий земледелия нового поколения, с более низким уровнем затрат и сниженным негативным эффектом для окружающей среды.

Анализ молекулярных механизмов азотфиксации, сольюбилизации фосфата, синтеза сидерофоров, анализ штаммов бактерий, проявляющих одновременно несколько активностей, положительно влияющих на рост и развитие растений, необходимы для разработки критериев создания коммерческих препаратов бактерий, для стимулирования необходимых признаков сельскохозяйственных культур. Тема, которая требует отдельного внимания — это экспериментальная проверка отдельных штаммов и их консорциумов в разных климатических зонах, на разных типах почвы и для разных сельскохозяйственных культур. Такие исследования исключительно актуальны в России, т.к. использование зарубежных препаратов по разным причинам во многих случаях может быть малоэффективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eliazer Nelson A.R.L., Ravichandran K., Antony U.* The impact of the Green Revolution on indigenous crops of India // *J. Ethnic Foods*. 2019. V. 6(1). <https://doi.org/10.1186/s42779-019-0011-9>

2. Gupta G., Dhar S., Dass A., Sharma V.K., Shukla L., Singh R., Kumar A., Kumar A., Jinger D., Kumar D., Sannagoudar M., Kumar Kamboj N., Verma G. Assessment of bio-inoculants-mediated nutrient management in terms of productivity, profitability and nutrient harvest index of pigeon pea–wheat cropping system in India // *J. Plant Nutrit.* 2020. V. 43(19). P. 2911–2928.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1806302>
3. Mahmud K., Makaju S., Ibrahim R., Missaoui, A. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research // *Plants.* 2020. V. 9(1). 97.
<https://doi.org/10.3390/plants9010097>
4. Timofeeva A.M., Galyamova M.R., Sedykh, S.E. Bacterial siderophores: Classification, Biosynthesis, perspectives of use in agriculture // *Plants.* 2022. V. 11(22). 3065.
<https://doi.org/10.3390/plants11223065>
5. Timofeeva A., Galyamova M., Sedykh S. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture // *Plants.* 2022. V. 11(16). 2119.
<https://doi.org/10.3390/plants11162119>
6. Castaldi S., Petrillo C., Donadio G., Piazz F.D., Cimmino A., Masi M., Evidente A., Istitico R. Plant growth promotion function of *Bacillus* sp. Strains isolated from salt-pan rhizosphere and their biocontrol potential against *Macrophomina phaseolina* // *Inter. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22(7). 3324.
<https://doi.org/10.3390/ijms22073324>
7. Kour D., Rana K.L., Yadav A.N., Sheikh I., Kumar V., Dhaliwal H.S., Saxena A.K. Amelioration of drought stress in Foxtail millet (*Setaria italica* L.) by P-solubilizing drought-tolerant microbes with multifarious plant growth promoting attributes // *Environ. Sustainab.* 2020. V. 3(1). P. 23–34.
<https://doi.org/10.1007/s42398-020-00094-1>
8. Timmusk S., Behers L., Muthoni J., Muraya A., Aronsson A.-C. Perspectives and challenges of microbial application for crop improvement // *Front. Plant Sci.* 2017. V. 8.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00049>
9. Malik A.I., Colmer T.D., Lambers, H., Setter, T.L., Schortemeyer M. Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat // *New Phytologist.* 2002. V. 153(2). P. 225–236.
<https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00318.x>
10. Ritika B., Utpa D. Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review // *Afric. J. Microbiol. Res.* 2014. V. 8(24). P. 2332–2343.
<https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6374>
11. Robson R.L., Postgate J.R. Oxygen and hydrogen in biological nitrogen fixation // *Ann. Rev. Microbiol.* 1980. V. 34(1). P. 183–207.
<https://doi.org/10.1146/annurev.mi.34.100180.001151>
12. Ramírez-Puebla S.T., Ormeño-Orrillo E., Rogel M.A., López-Guerrero M.G., López-López A., Martínez-Romero J., Negrete-Yankelevich S., Martínez-Romero E. La diversidad de rizobios nativos de México a la luz de la genómica // *Revista Mexicana de Biodiversidad.* 2019. V. 90.
<https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2681>
13. Eady R.R. Structure–Function relationships of alternative nitrogenases // *Chem. Rev.* 1996. P. 96(7). P. 3013–3030.
<https://doi.org/10.1021/cr950057h>
14. Raymond J., Siefert J.L., Staples C.R., Blankenship R.E. The Natural history of nitrogen fixation // *Mol. Biol. Evolu.* 2004. V. 21(3). P. 541–554.
<https://doi.org/10.1093/molbev/msh047>
15. Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils // *SpringerPlus.* 2013. V. 2(1). 587.
<https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
16. Delavaux C.S., Smith-Ramesh L.M., Kuebbing S.E. Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils // *Ecology.* 2017. V. 98(8). P. 2111–2119.
<https://doi.org/10.1002/ecy.1892>
17. Jahan M., Nassiri Mahallati M., Amiri M.B., Ehyayi H.R. Radiation absorption and use efficiency of sesame as affected by biofertilizers inoculation in a low input cropping system // *Industr. Crop. Product.* 2013. V. 43. P. 606–611.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.012>
18. Oteino N., Lally R.D., Kiwanuka S., Lloyd A., Ryan D., Germaine K.J., Dowling D.N. Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates // *Front. Microbiol.* 2015. V. 6.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00745>
19. Paul D., Sinha S.N. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacterium *Pseudomonas aeruginosa* KUPSB12 with antibacterial potential from river Ganga, India // *Ann. Agrar. Sci.* 2017. V. 15(1). P. 130–136.
<https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.10.001>
20. Kumar S., Baudh K., Barman S.C., Singh R.P. Amendments of microbial biofertilizers and organic substances reduces requirement of urea and DAP with enhanced nutrient availability and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Ecol. Engin.* 2014. V. 71. P. 432–437.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.007>
21. Jiang Z., Zhang X., Wang Z., Cao B., Deng S., Bi M., Zhang Y. Enhanced biodegradation of atrazine by *Arthrobacter* sp. DNS10 during co-culture with a phosphorus solubilizing bacteria: *Enterobacter* sp. P1 // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019. V. 172. P. 159–166.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.070>

22. *Rodríguez H., Fraga R.* Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion // *Biotechnol. Adv.* 1999. V. 17(4–5). P. 319–339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
23. *Dastager S.G., Deepa C.K., Pandey A.* Isolation and characterization of novel plant growth promoting *Micrococcus* sp NII-0909 and its interaction with cowpea // *Plant Physiol. Biochem.* 2010. V. 48(12). P. 987–992. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.09.006>
24. *Behera B.C., Yadav H., Singh S.K., Mishra R.R., Seth, B.K., Dutta S.K., Thatoi H.N.* Phosphate solubilization and acid phosphatase activity of *Serratia* sp. isolated from mangrove soil of Mahanadi river delta, Odisha, India // *J. Genet. Engin. Biotechnol.* 2017. V. 15(1). P. 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.01.003>
25. *Tajini F., Trabelsi M., Drevon J.-J.* Combined inoculation with *Glomus intraradices* and *Rhizobium tropici* CIAT899 increases phosphorus use efficiency for symbiotic nitrogen fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) // *Saudi J. Biol. Sci.* 2012. V. 19(2). P. 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2011.11.003>
26. *Korir H., Mungai N.W., Thuita M., Hamba Y., Masso C.* Co-inoculation effect of rhizobia and plant growth promoting rhizobacteria on common bean growth in a low phosphorus soil // *Front. Plant Sci.* 2017. V. 08. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00141>
27. *Jha A., Sharma D., Saxena J.* Effect of single and dual phosphate-solubilizing bacterial strain inoculations on overall growth of mung bean plants // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2012. V. 58(9). P. 967–981. <https://doi.org/10.1080/03650340.2011.561835>
28. *Mamta Rahi P., Pathania V., Gulati A., Singh B., Bhanwra R.K., Tewari R.* Stimulatory effect of phosphate-solubilizing bacteria on plant growth, stevioside and rebaudioside-A contents of *Stevia rebaudiana* Bertoni // *Appl. Soil Ecol.* 2010. V. 46(2). P. 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.008>
29. *Chakraborty U., Chakraborty B.N., Basnet M., Chakraborty A.P.* Evaluation of *Ochrobactrum anthropi* TRS-2 and its talc based formulation for enhancement of growth of tea plants and management of brown root rot disease // *J. Appl. Microbiol.* 2009. V. 107(2). P. 625–634. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04242.x>
30. *Zhu F., Qu L., Hong X., Sun X.* Isolation and characterization of a phosphate-solubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao Saltern on the coast of Yellow Sea of China // *Evid.-Bas. Complement. Alternat. Med.* 2011. V. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2011/615032>
31. *Bidondo L.F., Silvani V., Colombo R., Pérgola M., Bompadre J., Godeas A.* Pre-symbiotic and symbiotic interactions between *Glomus intraradices* and two *Pae-nibacillus* species isolated from AM propagules. *In vitro* and *in vivo* assays with soybean (AG043RG) as plant host // *Soil Biol. Biochem.* 2011. V. 43(9). P. 1866–1872. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.05.004>
32. *Postma J., Nijhuis E.H., Someus E.* Selection of phosphorus solubilizing bacteria with biocontrol potential for growth in phosphorus rich animal bone charcoal // *Appl. Soil Ecol.* 2010. V. 46(3). P. 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.016>
33. *Srinivasan R., Yandigeri M.S., Kashyap S., Alagawadi A.R.* Effect of salt on survival and P-solubilization potential of phosphate solubilizing microorganisms from salt affected soils // *Saudi J. Biol. Sci.* 2012. V. 19(4). P. 427–434. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.05.004>
34. *Zhao L., Zhang Y.* Effects of phosphate solubilization and phytohormone production of *Trichoderma asperellum* Q1 on promoting cucumber growth under salt stress // *J. Integrat. Agricult.* 2015. V. 14(8). P. 1588–1597. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60966-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60966-7)
35. *Li Z., Bai T., Dai L., Wang F., Tao J., Meng S., Hu Y., Wang S., Hu S.* A study of organic acid production in contrasts between two phosphate solubilizing fungi: *Penicillium oxalicum* and *Aspergillus niger* // *Sci. Rep.* 2016. V. 6(1). 25313. <https://doi.org/10.1038/srep25313>
36. *Thampi A., Bhai R.S.* Rhizosphere actinobacteria for combating *Phytophthora capsici* and *Sclerotium rolfsii*, the major soil borne pathogens of black pepper (*Piper nigrum* L.) // *Biol. Control.* 2017. V. 109. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2017.03.006>
37. *Kalayu G.* Phosphate solubilizing microorganisms: Promising approach as biofertilizers // *Inter. J. Agron.* 2019, P. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
38. *Arai Y., Sparks D.L.* Phosphate Reaction Dynamics in Soils and Soil Components: A Multiscale Approach 2007. P. 135–179. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94003-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94003-6)
39. *Patel D.K., Archana G., Kumar G.N.* Variation in the nature of organic acid secretion and mineral phosphate solubilization by *Citrobacter* sp. DHRSS in the presence of different sugars // *Curr. Microbiol.* 2008. V. 56(2). P. 168–174. <https://doi.org/10.1007/s00284-007-9053-0>
40. *Zeng Q., Wu X., Wang J., Ding X.* Phosphate Solubilization and gene expression of phosphate-solubilizing *Bacterium burkholderia* multivorans WS-FJ9 under different levels of soluble phosphate // *J. Microbiol. Biotechnol.* 2017. V. 27(4). P. 844–855. <https://doi.org/10.4014/jmb.1611.11057>
41. *Lessie T.G., Phibbs P.V.* Alternative pathways of carbohydrate utilization in *Pseudomonads* // *Ann. Rev. Microbiol.* 1984. V. 38(1). P. 359–388. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.38.100184.002043>

42. Peix A., Mateos P.F., Rodriguez-Barrueco C., Martinez-Molina E., Velazquez E. Growth promotion of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by a strain of *Burkholderia cepacia* under growth chamber conditions // *Soil Biol. Biochem.* 2001. V. 33(14). P. 1927–1935.
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00119-5)
43. Jorquera M.A., Crowley D.E., Marschner P., Greiner R., Fernández M.T., Romero D., Menezes-Blackburn D., De La Luz Mora M. Identification of β -propeller phytase-encoding genes in culturable *Paenibacillus* and *Bacillus* spp. from the rhizosphere of pasture plants on volcanic soils // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2011. V. 75(1). P. 163–172.
<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00995.x>
44. Richardson A.E., Simpson R.J. Soil Microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus // *Plant Physiol.* 2011. V. 156(3). P. 989–996.
<https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
45. Jorquera M.A., Hernández M.T., Rengel Z., Marschner P., de la Luz Mora M. Isolation of culturable phosphobacteria with both phytate-mineralization and phosphate-solubilization activity from the rhizosphere of plants grown in a volcanic soil // *Biol. Fertil. Soil.* 2008. V. 44(8). P. 1025–1034.
<https://doi.org/10.1007/s00374-008-0288-0>
46. Rodríguez H., Rossolini G.M., Gonzalez T., Li J., Glick B.R. Isolation of a gene from *Burkholderia cepacia* IS-16 encoding a protein that facilitates phosphatase activity // *Curr. Microbiol.* 2000. V. 40(6),. P. 362–366.
<https://doi.org/10.1007/s002840010071>
47. Thaller M.C., Berlutti F., Schippa S., Iori P., Passariello C., Rossolini G.M. Heterogeneous patterns of acid phosphatases containing low-molecular-mass polypeptides in members of the family Enterobacteriaceae // *Inter. J. System. Bacteriol.* 1995. V. 45(2). P. 255–261.
<https://doi.org/10.1099/00207713-45-2-255>
48. Ohtake H., Wu H., Imazu K., Anbe Y., Kato J., Kuroda A. Bacterial phosphonate degradation, phosphite oxidation and polyphosphate accumulation // *Resour. Conserv. Recycl.* 1996. V. 18(1–4). P. 125–134.
[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(96\)01173-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(96)01173-1)
49. Lidbury I.D.E.A., Murphy A.R.J., Scanlan D.J., Bendling G.D., Jones A.M.E., Moore J.D., Goodal, A., Hammond J.P., Wellington E.M.H. Comparative genomic, proteomic and exoproteomic analyses of three *Pseudomonas* strains reveals novel insights into the phosphorus scavenging capabilities of soil bacteria // *Environ. Microbiol.* 2016. V. 18(10). P. 3535–3549.
<https://doi.org/10.1111/1462-2920.13390>
50. Richardson A.E., Hadobas P.A. Soil isolates of *Pseudomonas* spp. that utilize inositol phosphates // *Canad. J. Microbiol.* 1997. V. 43(6). P. 509–516.
<https://doi.org/10.1139/m97-073>
51. Miethke M., Marahiel M.A. Siderophore-Based iron acquisition and pathogen control // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2007. V. 71(3). P. 413–451.
<https://doi.org/10.1128/MMBR.00012-07>
52. Scavino A.F., Pedraza R.O. The Role of siderophores in plant growth-promoting bacteria // *Bacteria in Agrobiol. Crop Productivity.* Berlin, Heidelberg: Springer, P. 265–285.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-37241-4_11
53. Baars O., Zhang X., Morel F.M.M., Seyedsayamdost M.R. The Siderophore metabolome of *Azotobacter vinelandii* // *App. Environ. Microbiol.* 2016. V. 82(1). P. 27–39.
<https://doi.org/10.1128/AEM.03160-15>
54. Baune M., Qi Y., Scholz K., Volmer D.A., Hayen H. Structural characterization of pyoverdines produced by *Pseudomonas putida* KT2440 and *Pseudomonas taiwanensis* VLB120 // *BioMetals.* V. 30(4). P. 589–597.
<https://doi.org/10.1007/s10534-017-0029-7>
55. Liu D., Yang Q., Ge K., Hu X., Qi G., Du B., Liu K., & Ding Y. Promotion of iron nutrition and growth on peanut by *Paenibacillus illinoisensis* and *Bacillus* sp. strains in calcareous soil // *Brazil. J. Microbiol.* 2017. V. 48(4). P. 656–670.
<https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.02.006>
56. Hider R.C., Kong X. Chemistry and biology of siderophores // *Natur. Product Rep.* 2010. V. 27(5). 637.
<https://doi.org/10.1039/b906679a>
57. Barry S.M., Challis G.L. Recent advances in siderophore biosynthesis // *Curr. Opin. Chem. Biol.* 2009. V. 13(2). P. 205–215.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.03.008>
58. Ustiatik R., Nuraini Y., Suharjono S., Handayanto E. Siderophore production of the hg-resistant endophytic bacteria isolated from local grass in the Hg-contaminated soil // *J. Eco. Engin.* 2021. V. 22(5). P. 129–138.
<https://doi.org/10.12911/22998993/135861>
59. Byers B.R., Powell M.V., Lankford C.E. Iron-chelating hydroxamic acid (schizokinen) active in initiation of cell division in *Bacillus megaterium* // *J. Bacteriol.* 1967. V. 93(1). P. 286–294.
<https://doi.org/10.1128/jb.93.1.286-294.1967>
60. Storey E.P., Boghazian R., Little J.L., Lowman D.W., Chakraborty R. Characterization of ‘Schizokinen’; a dihydroxamate-type siderophore produced by *Rhizobium leguminosarum* IARI 917 // *BioMetals.* 2006. V. 19(6). P. 637–649.
<https://doi.org/10.1007/s10534-006-9001-7>
61. Kamber T., Lansdell T.A., Stockwell V.O., Ishimaru C.A., Smits T.H.M., Duffy B. Characterization of the biosynthetic operon for the antibacterial peptide herbicolin in *Pantoea vagans* biocontrol strain C9–1 and incidence in *Pantoea* species // *Appl. Environ. Microbiol.* 2012. V. 78(12). P. 4412–4419.
<https://doi.org/10.1128/AEM.07351-11>

62. *Smith M.J., Shoolery J.N., Schwyn B., Holden I., Neilands J.B.* Rhizobactin, a structurally novel siderophore from *Rhizobium meliloti* // J. Amer. Chem. Soc. 1985. V. 107(6). P. 1739–1743. <https://doi.org/10.1021/ja00292a047>
63. *Wright W., Little J., Liu F., Chakraborty R.* Isolation and structural identification of the trihydroxamate siderophore vicibactin and its degradative products from *Rhizobium leguminosarum* ATCC14479 bv. *trifolii* // BioMetals. 2013. V. 26(2). P. 271–283. <https://doi.org/10.1007/s10534-013-9609-3>
64. *Mishra A., Baek K.-H.* Salicylic acid biosynthesis and metabolism: A Divergent Pathway for plants and bacteria // Biomolecules. 2021. V. 11(5). 705. <https://doi.org/10.3390/biom11050705>
65. *Bachhawat A.K., Ghosh S.* Iron transport in *Azospirillum brasilense*: Role of the siderophore spirilobactin // Microbiology. 1987. V. 133(7). P. 1759–1765. <https://doi.org/10.1099/00221287-133-7-1759>
66. *Shah S., Karkhanis V., Desai A.* Isolation and characterization of siderophore, with antimicrobial activity, from *Azospirillum lipoferum* M // Curr. Microbiol. V. 25(6). P. 347–351. <https://doi.org/10.1007/BF01577233>
67. *Tindale A.E., Mehrotra M., Ottem D., Page W.J.* Dual regulation of catecholate siderophore biosynthesis in *Azotobacter vinelandii* by iron and oxidative stress. The GenBank accession number for the sequence reported in this paper is AF238500 // Microbiology. 2000. V. 146(7). P. 1617–1626. <https://doi.org/10.1099/00221287-146-7-1617>
68. *Ito T.* Enzymatic determination of itoic acid, a *Bacillus subtilis* siderophore, and 2,3-dihydroxybenzoic acid // Appl. Environ. Microbiol. 1993. V. 59(7). P. 2343–2345. <https://doi.org/10.1128/aem.59.7.2343-2345.1993>
69. *Wilson M.K., Abergel R.J., Raymond K.N., Arce-neaux J.E.L., Byers B.R.* Siderophores of *Bacillus anthracis*, *Bacillus cereus*, and *Bacillus thuringiensis* // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2006. V. 348(1). P. 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2006.07.055>
70. *Eng-Wilmot D.L., Van der Helm D.* Molecular and crystal structure of the linear triccatechol siderophore, agrobactin // J. Amer. Chem. Soc. 1980. V. 102(26). P. 7719–7725. <https://doi.org/10.1021/ja00546a014>
71. *Bulen W.A., LeComte J.R.* Isolation and properties of a yellow-green fluorescent peptide from *Azotobacter medium* // Biochem. Biophys. Res. Commun. 1962. V. 9(6). P. 523–528. [https://doi.org/10.1016/0006-291X\(62\)90119-5](https://doi.org/10.1016/0006-291X(62)90119-5)
72. *Sharma A., Johri B.N.* Growth promoting influence of siderophore-producing *Pseudomonas* strains GRP3A and PRS9 in maize (*Zea mays* L.) under iron limiting conditions // Microbiol. Res. 2003. V. 158(3). P. 243–248. <https://doi.org/10.1078/0944-5013-00197>
73. *Ahmed E., Holmström S.J.M.* Siderophores in environmental research: roles and applications // Microbial Biotechnol. 2014. V. 7(3). P. 196–208. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117>
74. *Hu J., Wei Z., Weidner S., Friman V.-P., Xu Y.-C., Shen Q.-R., Jousset A.* Probiotic *Pseudomonas* communities enhance plant growth and nutrient assimilation via diversity-mediated ecosystem functioning // Soil Biol. Biochem. 2017. V. 113. P. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.05.029>
75. *Hu J., Wei Z., Friman V.-P., Gu S., Wang X., Eisenhaue N., Yang T., Ma J., Shen Q., Xu Y., Jousset A.* Probiotic diversity enhances rhizosphere microbiome function and plant disease suppression // MBio. 2016. V. 7(6). <https://doi.org/10.1128/mBio.01790-16>
76. *Kadmiri I.M., Chaouqui L., Azaroual S.E., Sijilmassi B., Yaakoubi K., Wahby I.* Phosphate-Solubilizing and auxin-producing Rhizobacteria promote plant growth under saline conditions // Arab. J. Sci. Engin. 2018. V. 43(7.), P. 3403–3415. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-3042-9>
77. *Chatterjee S., Sau G.B., Sinha S., Mukherjee S.K.* Effect of co-inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on the growth of amaranth plants // Arch. Agron. Soil Sci. 2012. V. 58(12). P. 1387–1397. <https://doi.org/10.1080/03650340.2011.595002>
78. *Adnan M., Fahad S., Zamin M., Shah S., Mian I.A., Danish S., Zafar-ul-Hye M., Battaglia M.L., Naz R.M.M., Saeed B., Saud S., Ahmad I., Yue Z., Brtnicky M., Holatko J., Datta R.* Coupling Phosphate-solubilizing bacteria with phosphorus supplements improve maize phosphorus acquisition and growth under lime induced salinity stress // Plants. 2020. V. 9(7). 900. <https://doi.org/10.3390/plants9070900>
79. *Suleman M., Yasmin S., Rasul M., Yahya M., Atta B.M., Mirza M.S.* Phosphate solubilizing bacteria with glucose dehydrogenase gene for phosphorus uptake and beneficial effects on wheat // PLoS One. 2018. V. 13(9). e0204408. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204408>
80. *Ben Zineb A., Trabelsi D., Ayachi I., Barhoumi F., Aroca R., Mhamdi R.* Inoculation with elite strains of phosphate-solubilizing *Bacteria* enhances the effectiveness of fertilization with rock phosphates // Geomicrobiol. J. 2020. V. 37(1). P. 22–30. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1658826>
81. *Tahi M., Khalid U., Ijaz M., Shah G.M., Naeem M.A., Shahid M., Mahmood K., Ahmad N., Kareem F.* Combined application of bio-organic phosphate and phosphorus solubilizing bacteria (*Bacillus* strain MWT 14) improve the performance of bread wheat with low fertilizer input under an arid climate // Brazil. J. Microbiol. 2018. V. 49. P. 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.11.005>

Biological Activity of Soil Bacteria that Stimulate Plant Growth: Nnitrogen Fixation, Phosphate Solubilization, Synthesis of Siderophores. Prospects for the Development of Microbial Consortia

A. M. Timofeeva^{a,b}, M. R. Galyamov^b, S. E. Sedykh^{a,b,#}

*^aInstitute of Chemical Biology and Fundamental Medicine
of the Siberian Branch of the RAS,
prosp. Akademika Lavrentieva 8, Novosibirsk 630090, Russia*

*^bNovosibirsk State University,
ul. Pirogova 1, Novosibirsk 630090, Russia*

[#]E-mail: sedyh@niboch.nsc.ru

The review provides literature data on soil bacteria that fix atmospheric nitrogen, solubilize phosphates and synthesize siderophores, thereby stimulating plant growth. The prospects of creating bacterial consortia for application to the soil in order to increase crop productivity and reduce the doses of fertilizers are considered. The use of rhizospheric bacteria capable of fixing atmospheric nitrogen, mineralizing inorganic and organic phosphates, increasing the bioavailability of insoluble iron, as well as their consortia, meets the objectives of sustainable agriculture, increases soil fertility and increases crop yields. The combined use of bacteria that stimulate plant growth with mineral fertilizers makes it possible to reduce the amount of fertilizers applied, which is an undoubted trend in sustainable agriculture. Research on the possibility of using various preparations of soil bacteria that stimulate plant growth has been widely carried out abroad in recent years, these studies are relevant for Russian agriculture, have prospects for import substitution and are necessary to achieve technological sovereignty in this area.

Keywords: bacteria that stimulate plant growth, soil bacteria, rhizospheric bacteria, phosphate solubilization, biofertilizers, nitrogen fixation, phosphorus fertilizers, siderophores, sustainable agriculture.

1. В журнале “Агрохимия” публикуются оригинальные теоретические, проблемные, экспериментальные и методические статьи, соответствующие профилю журнала, а также аналитические обзоры, рецензии и хроники. Работы, ранее опубликованные, редакция не принимает.
2. Объем экспериментальных статей не должен превышать 25 машинописных страниц (включая таблицы и список литературы), обзоров – 35 страниц. **Повторение одних и тех же данных в таблицах и рисунках не допускается.**
3. Статьи должны сопровождаться направлением на опубликование от того учреждения, в котором выполняли работу, и экспертным заключением, в котором говорится об отсутствии сведений, запрещающих к опубликованию. К статье необходимо приложить договор о передаче авторского права РАН (текст договора на имя главного редактора журнала размещен на сайте РАН www.gas.ru), а также справку, подтверждающую оригинальность представленных материалов (не менее 80% от объема статьи). Справку можно получить в Интернете, в бесплатной программе “Антиплагиат”. **Статьи и сопроводительные документы должны быть представлены только в электронном виде и присланы в редакцию по электронной почте. Адрес электронной почты редакции: j.agrochem@mail.ru.** Текст, таблицы и рисунки следует размещать в одном файле.
4. Присылаемую в редакцию статью подписывают все авторы. При этом обязательно указывают фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, контактный телефон, адрес электронной почты одного из авторов, с которым следует вести переписку.
5. Текст и таблицы должны быть напечатаны в формате Word, Times New Roman, 14 пунктов через 2 интервала. Таблицы размещаются в тексте после первого напоминания о них. Подписанные подписи и рисунки печатаются на отдельных листах в конце рукописи. Все страницы должны быть пронумерованы.
6. Начало статьи оформляется по образцу: название, инициалы и фамилии авторов, полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнена работа, почтовый адрес каждого учреждения с индексом, страна, адрес электронной почты. Далее приводится расширенная аннотация (до 1 страницы), а также ключевые слова. Аннотация должна включать цель работы, методику кратко и основные результаты. Кроме того, все эти данные необходимо представить на английском языке в конце рукописи на отдельной странице.
7. Рисунки желательно выполнять в формате PDF, обеспечивающем четкость всех деталей и возможности редактирования. Рисунки, кроме фото, должны быть черно-белые.
8. Материал статьи излагается в последовательности: введение, методика исследования, результаты и их обсуждение, выводы (заключение), список литературы. Эти подзаголовки должны быть указаны в тексте статьи.

Заглавие статьи должно быть информативным, включать ключевые слова.

Аннотация должна содержать главную информацию о статье: суть экспериментов, результаты и их интерпретацию.

Во введении нужно логически обосновать проведение данного исследования, показать актуальность и новизну, ответить на вопросы: что известно в данной области, что остается неизвестным, какова цель настоящей публикации.

Методика исследования должна содержать сведения: где, когда, на какой почве (субстрате) проводили опыты; агрохимическую характеристику и другие характеристики почвы с указанием методов определения; об условиях выращивания растений; об аналитических методах и использованных приборах и реактивах (с указанием фирмы на языке оригинала и производящей страны). Для малоизвестных или новых методов необходимо подробное их изложение с указанием всех примененных реактивов, при этом нужно приводить ошибку определения и чувствительность метода. Обязательно давать ссылку на классификацию, по которой дано название почвы.

При описании полевых опытов дозы удобрений, выраженные в кг/га N, P₂O₅ и K₂O, пишутся на строке (N90P60K60); для вегетационных опытов дозы питательных веществ (N, P, K), выраженные в мг/кг, пишутся в нижнем индексе (N₁₀₀P₇₅K₁₀₀).

При описании опытов с культурами растений должны быть указаны их сорта. При упоминании видов растений необходимо приводить их латинское название и авторов классификации; названия микроорганизмов и грибов следует писать только на латыни. Родовые и видовые латинские названия растений, грибов и микроорганизмов надо печатать курсивом. Например, *Triticum aestivum* L., *Sinorhizobium meliloti*.

В конце методического раздела следует указать повторность в опыте, методы статистической обработки. Необходима статистическая обработка всех количественных данных. При ее использовании в методике нужно указать, что означает плюс-минус в таблицах и отклонение от среднего на графиках: стандартную ошибку среднего или стандартное отклонение. Если для данной задачи предложено несколько различающихся методов статистической обработки, то необходимо дать ссылку на конкретный использованный метод.

Результаты и их обсуждение. Изложение результатов должно заключаться в выявлении следующих из таблиц и рисунков закономерностей, а не пересказе их содержания.

Количественные данные, представленные без ошибок, округляются до 3-х значащих цифр. Например, величина 1044 округляется до 1040, 1045 – до 1050, величина 1.253 округляется до 1.25, 1.257 – до 1.26 и т.п.

Все виды ошибок (метрологические и статистические) приводить не более, чем с двумя значащими цифрами (начиная с первой ненулевой цифры слева); в соответствии с этим сами величины (в том числе средние) округляются до того же числа десятичных знаков, которые содержатся в их ошибке.

При обсуждении результатов следует сравнить полученную информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна.

Выводы (или заключение) должны быть конкретными и вытекать из непосредственно полученного материала.

При описании методики, обсуждении результатов и в выводах следует употреблять глаголы в прошедшем времени.

9. В статье необходимо использовать физические единицы и обозначения, принятые в Международной системе единиц СИ (ГОСТ 8.417-2002 и РД 50-160-79), агрохимические термины - в соответствии с ОСТАми 10294-2002-10297-2002. При названии различных химических соединений желателно использовать терминологию ИЮПАК. В таблицах употребляются символы химических элементов.
10. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.
11. При обозначении удобрений (азотных, фосфорных, калийных, комплексных, сложных, смешанных) целесообразно пользоваться сокращениями:

N_{aa} – аммоний азотнокислый (селитра аммиачная);

N_a – аммоний серноокислый;

N_m – мочевины (карбамид);

N_c – селитра натриевая;

N_{ck} – селитра калийная;

N_{ckl} – селитра кальциевая;

$N_{ц}$ – цианамид кальция;

$N_{ва}$ – водный аммиак;

$N_{ба}$ – безводный аммиак;

P_c – суперфосфат простой;

$P_{сг}$ – суперфосфат простой гранулированный;

$P_{сд}$ – суперфосфат двойной;

$P_{п}$ – преципитат;

$P_{оф}$ – обесфторенный фосфат;

P_f – фосфоритная мука;

$P_{фш}$ – фосфатшлак;

K_x – калий хлористый;

K_c – калий серноокислый;

$K_{мг}$ – калимагнезия;

АФ – аммофос;

ДАФ – диаммофос;

ДАФК – диаммофоска;

АЗФК – азофоска;

КАФ – карбоаммофос;

КАФК – карбоаммофоска;

МФК – метафосфат калия;

НАФ – нитроаммофос;

НФ – нитрофос;

НФК – нитрофоска;

НАФК – нитроаммофоска;

ПФА – полифосфат аммония;

ФМ – фосфат мочевины;

ЖКУ – жидкое комплексное удобрение;

ОМУ – органо-минеральное удобрение, (с расшифровкой состава двух последних видов удобрений в разделе “Методика исследований”).

Другие сокращения необходимо расшифровать.

12. Формулы, на которые есть ссылки в тексте, должны быть пронумерованы. Пронумерованные формулы пишутся с красной строки, номер формулы ставится у правого края страницы в круглых скобках. Все ссылки в тексте на литературные источники даются на языке оригинала и нумеруются. Фамилии и названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский алфавит, пишутся в русской транскрипции. Номера ссылок в тексте должны идти строго по порядку упоминания и быть заключены в квадратные скобки.
13. Список литературы составляется по порядку упоминания работ в тексте статьи. Для всех библиографических источников приводятся фамилии и инициалы **всех** авторов и полное название цитируемой работы.

Примеры оформления библиографического описания

Для монографий:

Кореньков Д. А. Методы применения изотопа ^{15}N в агрохимии. М.: Колос, 1977. 158 с.

Hewitt E. L. Plant mineral nutrition. London: The English University Press, 1974. 219 p.

Для сборников:

Clarkson D. T. Regulation of the absorption and release of nitrate by plant cell: a review of current ideas and methodology // Fundamental, ecological and agricultural aspect of nitrogen metabolism in higher plants. Dordrecht; Boston; Lancaster: Martinus Nijhoff Publishers, 1986. P 3–27.

Ловцова Н. М. Влияние регуляторов роста на интенсивность дыхания укореняющихся зеленых черенков облепихи // Ростовые процессы и их регуляция / Под. ред. Якушкиной Н. И. М.: МОПИ, 1992. С. 98–101.

Ладонин В. Ф., Посмитная Л. В., Петросян А. Г. К вопросу оценки загрязнения зерна озимой пшеницы в условиях комплексного применения средств химизации // Тез. докл. Всесоюз. конф. “Почвенно-агрохимические и экологические проблемы формирования высокопродуктивных агроценозов”. Пушкино, 1988. С. 177.

Для трудов:

Варзунова Т. А. Влияние минеральных удобрений на урожай зерна горохоовсяной смеси // Тр. Сев.-Зап. ВНИИ молоч. и лугопастб. хоз.-ва. 1971. Вып. 6. С. 17–20.

Булгакова Н. Н. Влияние дозы азота на включение в метаболизм нитрата запасного фонда при разных условиях выращивания // Бюл. ВИУА. 1999. № 112. С. 10–11.

Для журналов:

Монастырский О. А. Факторы эволюции высокотоксичных штаммов рода *Fusarium* в агроценозе // Сел.-хоз. биология. 1998. № 1. С. 28–34.

Baer R. G., Collet F. G. In vivo determination of parametres of nitrate utilization in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings grown with low concentration of nitrate in the nutrient solution // *Plant Physiol.* 1981. V. 68. № 6. P. 1237–1243.

Для авторефератов и диссертаций:

Глянько А. К. Реакция растительного организма на азотное питание и температуру среды (физиолого-экологические механизмы): Дис. ... д-ра биол. наук в форме научн. докл. Иркутск, 2000. 56 с.

Котлярова Т. И. Особенности усвоения азота корнями и листьями разных растений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИФР АН СССР, 1987. 22 с.

Для патентных документов:

Шаповалов А. А., Тацы В. П., Пуцын Ю. Г. Соли 1-фенил-3-(1,2,4-триазол-4-ил) мочевины, обладающие свойством регуляторов роста растений: А. с. 1732651 (РФ) // Б.И. 1992. № 14. С. 25.

Шаповалов А. А., Пуцыкин Ю. Г., Егоров Б. Ф. Способ борьбы с сорными растениями, гербицидная композиция и синер-

гист, повышающий активность гербицидов: Пат. 2130260, РФ // Б.И. 1998. № 5. С. 30.

14. Рукопись статьи направляется на рецензирование члену редколлегии журнала или ведущему специалисту в данной области исследований. Срок рецензирования статьи – 1 месяц. Положительная рецензия достаточна для приема к публикации. Если в рецензии имеются замечания, рукопись отправляется автору на переработку. Сроки переработки статьи – 4 месяца. Переработанную автором статью редакция направляется рецензенту на повторное рецензирование.
15. Статьи, оформленные без соблюдения изложенных правил, редакцией к рассмотрению не принимаются и возвращаются автору.
16. Рассылка отписок опубликованных статей осуществляется в электронном виде на адрес электронной почты, указанный авторами для переписки.
17. Плата за публикацию рукописей не взимается.