

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2020

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Содержание, запасы и формы калия в каштановых почвах Забайкалья в зависимости от орошения и возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) под картофель

М. Г. Меркушева, Л. Л. Убугунов, Л. Н. Болонева, И. Н. Лаврентьева 3

Влияние промежуточных посевов кормовых культур на гранулометрический и микроагрегатный состав генетически различных почв сухой субтропической зоны Азербайджана

М. П. Бабаев, Ф. М. Рамазанова, Э. А. Гурбанов 11

Динамика содержания органического вещества черноземов в условиях минимизации обработки в Красноярской лесостепи

А. А. Белоусов, Е. Н. Белоусова 24

Удобрения

Выращивание салата листового (*Lactuca sativa* L.) сорта Афицион на безнитратном цеолитном субстрате

В. С. Солдатов, С. Ю. Косандрович, О. В. Ионова, А. П. Езубец, Н. В. Вонсович 31

Регуляторы роста растений

Физиологические реакции растений томата на предпосевную обработку семян экстрактом *Ficus vesiculosus*

Е. Н. Икконен, Т. Г. Шибеева, М. Г. Юркевич 37

Пестициды

Использование пестицидов в аграрном секторе России в контексте развития глобальных рынков средств защиты растений

В. А. Захаренко 43

Агроэкология

Агроэкологические и экономические показатели возделывания яровой пшеницы с применением средств химизации в Зауралье

С. Д. Гилев, И. Н. Цымбаленко, А. Н. Копылов, Ю. В. Суркова, В. П. Ефремов 49

Содержание микроэлементов в пырее в Западном Забайкалье

В. К. Кашин 55

Влияние бактерий *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* и *Pseudomonas syringae* bv. *pisi* на содержание негативных аллелопатических соединений в корневых экссудатах проростков гороха (*Pisum sativum* L.)

Л. Е. Макарова, И. Г. Петрова, Н. А. Соколова, А. С. Мориц 62

Контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв на Тазовском полуострове

В. Н. Башкин, Р. В. Галиулин 70

Экотоксикология

Качество воды придонного слоя и донных отложений залива Нячанга (Вьетнам)

Нгуен Тхи Лан, Фан Чонг Хуан 76

ОБЗОРЫ

Почвенные ферменты и загрязнение почв: биodeградация, биоремедиация, биоиндикация

Ю. М. Поляк, В. И. Сухаревич 83

ИСТОРИЯ НАУКИ

К 175-летию со дня рождения П.А. Костычева (1845–1895)

М. А. Помелова 94

Contents

No. 3, 2020

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Contents, Resources and Forms of Potassium in Chestnouse Soils Depending on Irrigation and Growing Doses of Potassium Fertilizers (at the Background Application of NPS) under Potato
M. G. Merkusheva, L. L. Ubugunov, L. N. Boloneva, I. N. Lavrentieva 3
- Influence of the Intermediate Sowings of Fodder Crops on Granulometric and Microaggregate Composition Genetically Different Soils in the Arid Subtropical Zone of Azerbaijan
M. P. Babaev, F. M. Ramazanova, E. A. Gurbanov 11
- Dynamics of the Content of Organic Matter of Chernozems in Conditions of Minimization of Processing in Krasnoyarsk Forest-Steppe
A. A. Belousov, E. N. Belousova 24

Fertilizers

- Growing of the Leaf Salad (*Lactuca sativa* L.) Cultivator Affection on the Zeolit Nitrate Free Substrate
V. S. Soldatov, S. Y. Kosandrovich, O. V. Ionova, I. P. Yezubets, N. V. Vonsovich 31

Plant Growth Regulators

- Physiological Reactions of Tomato Plants to Pre-Sowing Treatment of Seeds with Extract of *Fucus vesiculosus* L.
E. N. Ikkonen, T. G. Shibaeva, M. G. Yurkevich 37

Pesticides

- Use of Pesticides in the Agricultural Sector of Russia in the Context of the Development of Global Markets of Plant Protection Products
V. A. Zakharenko 43

Agroecology

- Agroecological and Economic Indicators of Spring Wheat Cultivation with the Use of Chemicals in the Trans-Urals
S. D. Gilev, I. N. Tsymbalenko, A. N. Kopylov, Yu. V. Surkova, V. P. Efremov 49
- Microelements Content of *Elytrigia repens* (L.) in the Western Transbaikalia
V. K. Kashin 55
- Influence of Bacteria *Rhizobium leguminosarum* bv. *viceae* and *Pseudomonas syringae* pv. *psidi* on Contents of Negative Allelopathic Compounds in Root Exudates of Pea Seedlings (*Pisum sativum* L.)
L. E. Makarova, I. G. Petrova, N. A. Sokolova, A. S. Moritz 62
- Control of Efficiency of Disturbed Tundra Soil Recultivation in Taz Peninsula
V. N. Bashkin, R. V. Galiulin 70

Ecotoxicology

- Quality of Bottom Water and Sediment of Nha Trang Bay (Vietnam)
Nguyen Thi Lan, Phan Trong Huan 76

REVIEWS

- Soil Enzymes and Soil Pollution: Biodegradation, Bioremediation, Bioindication
Yu. M. Polyak, V. I. Sukharevich 83

HISTORY OF SCIENCE

- To the 175th Anniversary of the Birth of P. A. Kostychev (1845–1895)
M. A. Pomelova 94
-

СОДЕРЖАНИЕ, ЗАПАСЫ И ФОРМЫ КАЛИЯ В КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ ЗАБАЙКАЛЬЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОРОШЕНИЯ И ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ (на фоне NPS) ПОД КАРТОФЕЛЬ¹

© 2020 г. М. Г. Меркушева^{1,*}, Л. Л. Убугунов¹, Л. Н. Болонева¹, И. Н. Лаврентьева¹

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

*E-mail: merkusheva48@mail.ru

Поступила в редакцию 15.08.2019 г.

После доработки 23.09.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Длительное орошение каштановых супесчаных почв привело к уменьшению содержания и запасов калия за счет сокращения его структурной формы. Такое же действие отмечено при использовании фоновых удобрений (NPS) и высоких доз K180–360 в орошаемой почве под картофелем. Однако количество водорастворимого и обменного калия увеличивалось при орошении и удобрении. Баланс калия при применении возрастающих доз удобрений был отрицательным, кроме дозы K360. Установлено, что за период внесения удобрений содержание обменного калия по сравнению с исходным его количеством снизилось.

Ключевые слова: каштановые почвы, орошение, картофель, калийное состояние почвы, удобрение, баланс калия.

DOI: 10.31857/S0002188120030102

ВВЕДЕНИЕ

Калий играет огромную роль в регулировании процессов перераспределения ассимилятов между вегетативными и запасающими органами картофеля. При его недостатке у картофеля замедляется рост и цветение, меняется форма куста, уменьшается размер клубней, их форма становится удлинённой, снижается содержание крахмала. Поскольку калий влияет на отток углеводов и усложнение их структуры, то дефицит калийного питания нарушает в первую очередь углеводный метаболизм и ухудшает качество клубней картофеля [1], приводит к ослаблению устойчивости культур к возбудителям заболеваний как в период роста, так и при хранении. Особенно большое значение имеет обеспеченность калием растений картофеля в условиях орошения, когда интенсивность его выноса существенно возрастает, и запасы этого элемента в почве со временем снижаются. Для поддержания плодородия почв, их калийного фонда и увеличения урожая картофеля, его качества и сохранности клубней при лежке необходимо применение калийных удобрений. Картофель требует высоких доз внесения калия, которые сопоставимы или даже больше, чем азота [2–5].

В отечественной и зарубежной литературе приведены результаты эффективности калийных удобрений на урожай и качество клубней картофеля [6–8]. Установлено, что рост, урожай и экономическая эффективность выращивания картофеля существенно зависят от размера дозы калийных удобрений [9, 10]. Дана оценка применения возрастающих доз калийных удобрений под картофель [11–13].

Доступность калия растениям зависит от превращений его подвижных и неподвижных форм в почвах, т.е. процессов мобилизации и иммобилизации питательного элемента. Выраженность этих процессов определяется рядом факторов: типом почвы, степенью насыщенности ее калием, минералогическим составом, содержанием илстой фракции и энергией связи калия с гранулометрическими фракциями, внесением удобрений, фиксирующей способностью, а также их водным режимом [14, 15]. В почвах фиксация калия осуществляется в основном минералами с лабильной кристаллической структурой [16, 17].

Современные исследования [18] показали, что значительные запасы калия в почвах и динамическое равновесие между различными его формами затрудняют выбор показателей, характеризующих способность почвы обеспечить калийное питание растений. В той или иной степени, прямо или косвенно в процесс обеспечения растений

¹ Работа выполнена в рамках темы Госзадания № госрегистрации AAAA-A17-117011810038-7.

Таблица 1. Характеристика некоторых свойств неорошаемых и орошаемых каштановых супесчаных почв

Горизонт	Глубина, см	Фракции (мм), %		рН _{Н₂О}	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г			Плотность твердой фазы (<i>d</i>), г/см ³	CaCO ₃	Гумус	N _{общ}
		<0.001	<0.01		Ca ²⁺	Mg ²⁺	сумма		%		
Целина											
Ad	0–5	10.5	16.2	7.7	8.66	3.64	12.30	1.43	—	1.37	0.09
A1	10–20	9.6	17.7	7.7	11.07	3.59	14.66	1.55	—	1.31	0.08
AB	30–40	10.5	16.4	8.0	10.19	2.41	12.60	1.54	1.46	0.40	0.04
BCa	70–80	8.7	14.2	8.4	Не определяли			1.57	4.55	0.15	0.02
C	80–100	8.6	14.1	8.3				1.50	4.14	0.13	0.02
Пашня орошаемая											
Апах	0–30	11.6	19.9	7.4	11.38	4.04	12.42	1.30	—	1.58	0.11
AB	40–50	8.3	17.2	7.8	10.0	3.00	13.0	1.45	2.07	1.23	0.05
BCa	70–80	8.4	13.3	8.2	Не определяли			1.46	6.60	0.30	0.03
C	90–100	6.8	12.9	8.3				1.45	6.19	0.28	0.03

Примечание. Прочерк – отсутствует.

калийем вовлекаются все формы калия. Поэтому невосполнение его запасов за счет калийных удобрений приводит к ухудшению плодородия почв в отношении этого элемента. В литературе имеются лишь единичные данные [19], посвященные динамике калийного состояния почв во время фаз развития растений картофеля в зависимости от внесения минеральных удобрений в богарных условиях.

Каштановые почвы Забайкалья, несмотря на высокое валовое содержание калия, характеризуются в основном низким и очень низким количеством его обменной формы и слабо выраженной динамикой ее содержания как в течение вегетационного периода, так и по годам [20]. Основной причиной недостаточного образования подвижно-обменных форм калия в каштановых почвах является их неблагоприятный водный режим. Поэтому для картофеля, как культуры высокого выноса, особенно при орошении, необходимо внесение калийных удобрений. Однако исследования по воздействию длительного орошения и возрастающих доз калийных удобрений на калийное состояние почв отсутствуют.

Цель работы – изучение многолетнего орошения на калийное состояние каштановых почв Западного Забайкалья, миграционную способность калийных удобрений, а также влияние их возрастающих доз на содержание и состав форм калия в почвах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Многолетнее исследование влияния орошения на калийное состояние каштановых орошаемых супесчаных почв проводили в 1986–2006 гг., воздействие возрастающих доз калийных удобрений

под картофель сорта Волжанин на калийный фонд орошаемых почв было изучено в 2003–2006 гг. (Иволгинский р-н Республики Бурятия, N 51° 44.6158' 0", E 107° 16.813' 0", h – 544 м н. у.м.). Некоторые характеристики их свойств приведены в табл. 1. Установлено, что длительное орошение вызвало перераспределение гранулометрических фракций, снижение содержания обменных катионов и увеличение количества карбонатов, гумуса и азота по сравнению с целиной. Это сравнение обусловлено тем, что неорошаемые пахотные каштановые почвы расположены на склонах, что исключало их орошение.

Основные свойства каштановых почв определяли общепринятыми методами [21–23], содержание и формы калия – по Пчелкину [22]. Калийный фонд почвы по этому методу представлен 4-мя взаимосвязанными формами, учитывающими прочность связей тех или иных групп катионов калия с почвенной твердой фазой: калий водорастворимый – обменный – необменный – минерального скелета (структурный).

Для учета динамики содержания обменного калия в каштановых карбонатных почвах под картофелем и в зависимости от возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) использовали метод Мачигина (1% (NH₄)₂CO₃). Определение калия проводили методом пламенной фотометрии на приборе ПФА-378.

Система обработки почвы и технология возделывания культуры – общепринятые для региона. Схема опыта, варианты: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N120P60S30 (фон), 3 – фон + K60, 4 – фон + K120, 5 – фон + K180, 6 – фон + K360. Во всех вариантах, кроме контроля, вносили микроудобрения в дозах Zn5Cu5Co1. Площадь опытной деланки 12.5 м², повторность 4-четырёхкратная.

Таблица 2. Содержание форм калия (K_2O) в неорошаемых и орошаемых каштановых супесчаных почвах

Горизонт	Валовый, % (<i>n</i> = 5)	Запасы, т/га	<i>t</i> _{факт.}	Водораство- римый	Обменный	Необменный	Структурный	K _{необм} : K _{обм}	
		0—20 см		мг K ₂ O/100 г					
		0—50 см							
Целина									
Ad	2.95 ± 0.15	75.0 ± 2.9		3.5	8.6	78.9	2760	9.2	
Al	2.65 ± 0.14	192 ± 7		1.1	7.6	67.8	2570	8.9	
AB	2.57 ± 0.15			0.6	3.0	27.1	2540	9.0	
BCa	3.20 ± 0.17			0.6	6.4	41.9	3140	6.5	
C	2.95 ± 0.16			0.8	4.8	52.4	2900	10.9	
Пашня орошаемая									
Апах	2.36 ± 0.12	62.3 ± 3.2	2.9	0.8	10.7	116.3	2240	10.9	
AB	2.50 ± 0.13	169 ± 6	2.5	0.6	5.2	37.5	2460	7.2	
BCa	3.03 ± 0.17			0.4	6.8	56.0	2960	8.2	
C	3.01 ± 0.17			0.4	4.4	57.6	2950	13.1	

Макроудобрения вносили ежегодно: азотные — в виде N_{aa} , фосфорные — $P_{\text{сд}}$, калийные — K_x и серные — в виде сульфата аммония (с обязательным учетом содержащегося в нем азота) под глубокую предпосадочную культивацию. Фоновые микроудобрения в виде сульфатов цинка, меди и кобальта также применяли под культивацию один раз в расчете на 3 года.

Орошение проводили дождеванием с поливной нормой $300 \text{ м}^3/\text{га}$. Количество поливов корректировали в зависимости от погодных условий конкретного вегетационного сезона. Влажность почвы поддерживали на уровне 70% НВ, что достигалось 5–7-ю поливами. Однако следует отметить, что в засушливые вегетационные сезоны в мае–июне влажность почвы в слое 0–20 см в основном составляла 52–55% НВ из-за высоких фильтрационных свойств супесчаной почвы.

Баланс калия рассчитан разностным методом [24], который дает возможность комплексной оценки и прогноза изменения калийного состояния почв в различных агроценозах и степени изменения эффективного плодородия и истощения доступных форм калия.

Модельный опыт по оценке миграционной способности калия в зависимости от доз удобрений и норм полива проводили на площадках размером 1 м^2 . Испытывали 2 уровня калийных удобрений: средний — K_{120} и высокий — K_{240} при норме полива 350 и $700 \text{ м}^3/\text{га}$ на каштановой супесчаной почве с большим коэффициентом фильтрации (2.6 м/сут). Удобрения в виде K_x вносили в верхний слой 0–10 см почвы. Спустя 1 сут был проведен полив нормой 350 и $700 \text{ м}^3/\text{га}$, а через 24 ч были отобраны образцы на содержание обменного калия и хлора в почве.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли в среде электронной таблицы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние орошения на калийное состояние каштановых почв. Длительное орошение пахотной каштановой супесчаной почвы под агроценозами без внесения компенсационных доз калийных удобрений достоверно снизило запасы валового калия в корнеобитаемом слое по сравнению с целиной за счет уменьшения содержания его структурной формы (табл. 2). Известно, что при орошении происходит постепенное растворение минералов, гидролиз расположенных на их поверхности соединений, внедрение катионов раствора в меж-слоевое пространство набухающих минералов, особенно в верхнем слое почвы. Механизм разрушения минералов водой состоит в удалении катионов с поверхности в межслоевых промежутках набухающих минералов и в октаэдрах и тетраэдрах минералов, что приводит к уменьшению запасов зольных элементов [25].

Содержание калия в почвенном растворе является универсальным диагностическим показателем обеспеченности растений и составляет в пределах $2\text{--}3 \text{ мг}/100 \text{ г}$ независимо от типа почвы и ее гранулометрического состава. По нашим данным, количество водорастворимого калия в каштановых почвах было $<1 \text{ мг}/100 \text{ г}$ по всему профилю. Выращивание культур высокого выноса калия в условиях орошения привело, согласно грациям В.Н. Якименко [13], практически к истощенному калийному состоянию пахотного горизонта по соотношению $K_{\text{необм}}/K_{\text{обм}}$, что подтверждено также снижением содержания водо-

Таблица 3. Содержание валового калия в гранулометрических фракциях неорошаемых и орошаемых каштановых супесчаных почв (слой почвы 0–20 см)

Диаметр частиц, мм	Содержание фракций, %		K ₂ O, %	
	1	2	1	2
1–0.25	38.8	36.8	3.01	3.25
0.25–0.05	29.6	26.4	1.84	1.75
0.05–0.01	11.6	16.7	1.87	1.84
0.01–0.005	3.1	1.3	1.93	1.93
0.005–0.001	4.4	7.0	2.34	2.23
<0.001	9.8	11.6	2.66	2.45

Примечание. В графе 1 – целина, 2 – орошаемая пашня.

растворимого калия по всему профилю почвы и структурной формы – в корнеобитаемом слое. Это связано с длительным орошением (15 лет) супесчаных каштановых почв, приводящим к интенсификации внутрипочвенного выветривания.

Содержание гранулометрических фракций при орошении несколько изменилось за счет снижения доли песчаной и возрастания – пылевой и ила (табл. 3). Например, доля песчаной фракции уменьшилась с 68.4% в неорошаемой почве до 63.2% в орошаемой, пылевой фракции – возросла с 19.1 до 25.0 и ила с 9.8 до 11.6% соответственно. В первичных минералах крупных фракций орошаемых почв отмечено возрастание пелитизации полевых шпатов, уменьшение количеств слюд, амфиболов и др. Продукты разрушения этих минералов пополняли илистую фракцию, увеличивая ее количество в основном в верхних горизонтах [26, 27].

Вклад гранулометрических фракций в формирование калийного фонда существенно различался в зависимости от свойств почв и их минералогического состава [28]. Относительно высокое содержание калия в крупных песчаных фракциях каштановых супесчаных почв определялось их обогащенностью полевыми шпатами и слюдами [29]. Длительное орошение снизило концентрацию калия в мелкопылевой фракции и иле, что привело к уменьшению обогащенности почв обменным калием, что, по-видимому, характерно для почв сухостепной зоны [30].

Оценка потенциальной устойчивости вымывания калия из удобрений при орошении почв. Калийные соединения минеральных удобрений легко растворимы в воде, поэтому они быстро вступают во взаимодействие с почвой, и большая их часть адсорбируется коллоидами почвы [31]. Адсорбционно связанный на поверхности коллоидов калий легко переходит в раствор при обмене на другие катионы. При правильном орошении, обеспечивающем равномерное увлажнение почвы без

подсушивания и перегрева, повышается доступность и необменно поглощенного калия растениями. Часть калия удобрений поглощается микроорганизмами, входя в состав их клеток, что достигает до 40 кг K₂O/га.

Несоблюдение технологии орошения вызывает не только негативные изменения свойств почв, но и приводит к непродуктивному перерасходу воды и минеральных удобрений. Интенсивность вымывания питательных веществ из почвы располагается в следующем убывающем порядке: орошение и количество выпадающих осадков; гранулометрический состав почвы; дозы, формы и сроки внесения удобрений; характер использования угодья; особенности выращивания культуры – длительность периода вегетации, урожай и т.д.

Согласно полученным результатам (рис. 1а), при поливах оптимальной нормой (350 м³/га) внесение возрастающих доз калийных удобрений способствовало увеличению содержания обменного калия в пахотном горизонте каштановой почвы. Отмечено практически полное отсутствие миграции калия удобрений по профилю почв. Помимо адсорбции калия, было возможно влияние карбонатного горизонта (40–100 см), как барьера.

Воздействие большей поливной нормы воды (700 м³/га) на содержание и распределение обменного калия по профилю каштановой супесчаной почвы было значительным. Разница в содержании обменного калия в слое 0–20 см почвы между поливными вариантами была вызвана, на наш взгляд, усилением фиксации внесенного калия удобрений в условиях переувлажнения.

В почву вместе с калийными удобрениями вносят значительное количество подвижного хлора в форме хлор-иона. Принято считать, что хлорсодержащие калийные удобрения оказывают неоднозначное, скорее отрицательное воздействие на урожай и качество клубней, потому что картофель чувствителен к влиянию хлоридов. Однако известно, что хлор-ион не сорбируется почвой и мигрирует по профилю. Установлено, что картофель способен накапливать значительные количества хлоридов из почвы в начальный период роста клубней, а хлор-ион выносится картофелем лишь из поверхностного слоя [32]. При этом существенного влияния хлоридов на урожай и суммарную органолептическую оценку клубней не отмечено [33]. По данным [34], внесение возрастающих доз калийных удобрений не привело к накоплению хлора в корнеобитаемом слое почвы. Хлор-анион свободно мигрировал в почвенном профиле вследствие значительной растворимости большинства его солей во время снеготаяния, выпадения осадков и тем более при орошении, что подтверждено нашими данными (рис. 1б).

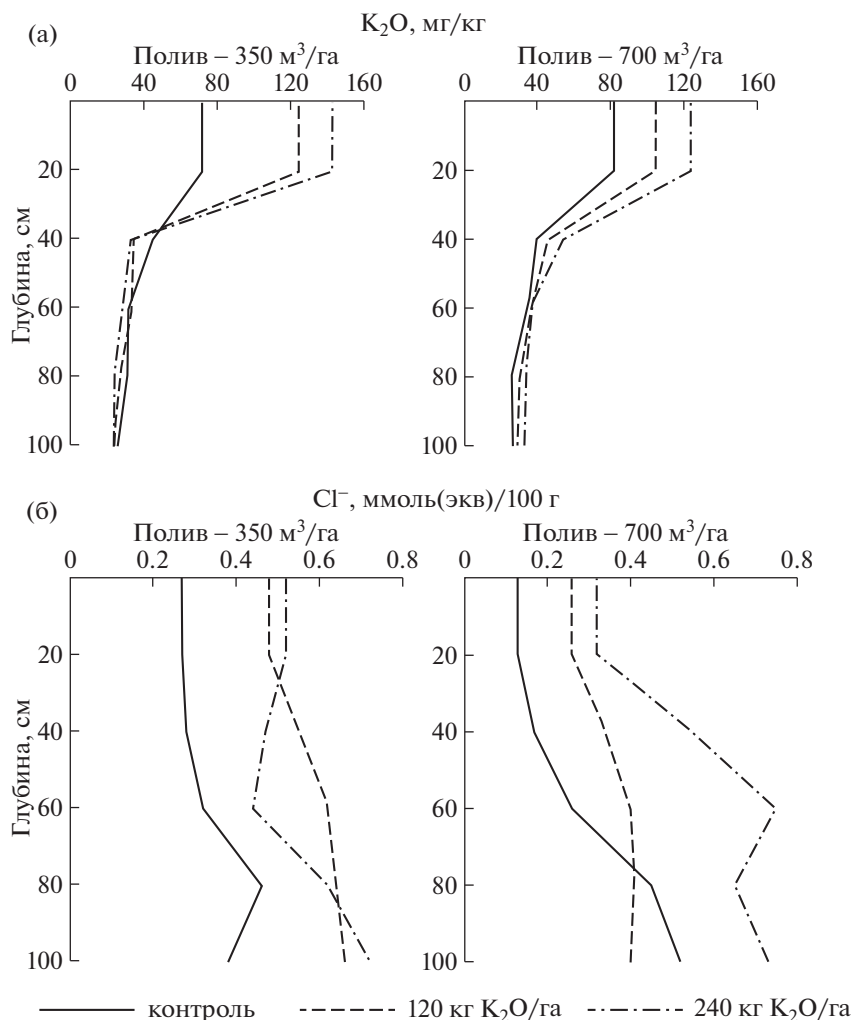


Рис. 1. Влияние норм полива и доз калийных удобрений на содержание и распределение обменного калия (а) и хлорид-иона (б) в каштановой почве.

Калийное состояние орошаемых каштановых почв при внесении возрастающих доз калийных удобрений под картофель. Следует отметить, что после окончания опытов срок орошения составил 20 лет, а содержание валового калия в контроле каштановой супесчаной почвы уменьшилось по сравнению с 15-летним орошением (табл. 4).

По нашим данным, невнесение калийных удобрений (фон) снизило количество обменного, необменного и структурного калия, в результате чего уменьшилось содержание и валового K_2O . Возрастание размеров доз калия после 3-х лет его внесения способствовало повышению количества водорастворимой и обменной форм калия, тогда как накопление необменной формы достоверно возрастало только при внесении K_{360} . Растения картофеля интенсивно поглощали водорастворимый калий, его концентрация не достигала 1 мг/100 г даже при высоких дозах внесения калийных удобрений.

Использование доз K_{180} и K_{360} снизило содержание структурного калия, как и невнесение калийных удобрений. Калийное состояние почв в контроле и особенно фоновом варианте отнесено к слабо обеспеченным, при внесении возрастающих доз калийных удобрений оно повышалось до оптимально обеспеченных градаций.

Применение возрастающих доз калийных удобрений способствовало накоплению водорастворимого и обменного калия, тогда как запасы необменного оставались практически неизменными по сравнению с контролем (табл. 5), что обусловлено низким содержанием ила и невысокой емкостью катионного обмена. Отмечено снижение запасов структурного калия, особенно в фоновом варианте и при внесении доз K_{180} и K_{360} , что было связано с длительным орошением.

Распределение обменного калия по почвенному профилю каштановой супесчаной почвы выявило, что калий удобрений преимущественно

Таблица 4. Содержание форм калия (K_2O) в каштановой почве (слой 0–20 см) после 3-х лет внесения калийных удобрений под орошаемый картофель, мг/100 г

Вариант	Валовый	Водорастворимый	Обменный	Необменный	Структурный	$K_{необм} : K_{обм}$
Контроль	2000	0.42	8.5	85.0	1910	10.0
N120P60S30 (фон)	1840	0.50	7.4	78.8	1750	10.6
Фон + K60	2000	0.56	9.8	80.0	1910	8.2
Фон + K120	2000	0.62	10.2	81.6	1910	8.0
Фон + K180	1930	0.75	11.5	83.1	1840	7.2
Фон + K360	1940	0.85	12.6	88.8	1840	7.0
HCP_{05} , мг/100 г	50	0.04	1.6	3.0	20	

Таблица 5. Запасы форм калия (K_2O) в каштановой почве (слой 0–20 см) после 3-х лет внесения калийных удобрений под орошаемый картофель

Вариант	Водорастворимый	Обменный	Необменный	Структурный	Валовый
	кг/га		т/га		
Контроль	11.0	221	2.2	49.6	52.0
N120P60S30 (фон)	13.0	192	2.0	45.6	47.8
Фон + K60	14.6	255	2.1	49.6	52.0
Фон + K120	16.1	265	2.1	49.6	52.0
Фон + K180	19.5	290	2.2	47.7	50.2
Фон + K360	22.1	328	2.3	47.8	50.4

закреплялся в пахотном горизонте (рис. 2), что неоднократно отмечали ранее [35]. В то же время известно, что в легких почвах миграция калия может наблюдаться до 100 см [36].

Баланс калия после 3-х лет внесения возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) при выращивании картофеля на орошаемой каш-

тановой супесчаной почве был отрицательным, кроме варианта K360 (табл. 6). Известно, что при положительном балансе калия происходит накопление в почве его обменной формы [37]. Однако при положительном балансе в варианте K360 накопления обменного калия не отмечено по сравнению с его исходным количеством. Установлено, что при возделывании картофеля на легких почвах обогащение их обменным калием за счет минеральных удобрений происходило очень медленно [38]. Известно также, что обменного калия накапливается больше в сухие периоды, чем в дождливые [39]. Поэтому можно предположить, что в сухие весенне-раннелетние вегетационные сезоны, типичные для зоны каштановых почв, количество обменного калия в пахотном горизонте будет возрастать за счет его миграции вверх из более глубоких слоев. Учитывая вынос калия урожаями картофеля совместно с ботвой, по величинам запасов доступного калия можно рекомендовать дозу K180 на фоне N120P60S30 для ежегодного внесения для формирования достаточной продуктивности клубней картофеля и поддержания калийного состояния каштановых почв.

ВЫВОДЫ

1. Длительное орошение каштановых супесчаных почв привело к снижению валового содержа-

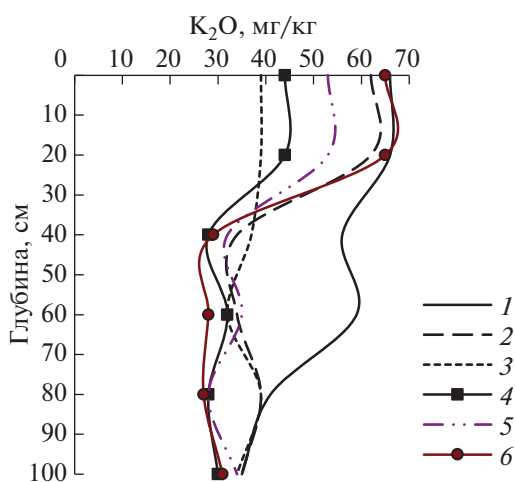


Рис. 2. Содержание и распределение обменного K_2O в орошаемых каштановых почвах при внесении возрастающих доз калийных удобрений, варианты: 1 — контроль, 2 — N120P60S30 — (фон), 3 — фон + K60, 4 — фон + K120, 5 — фон + K180, 6 — фон + K360.

Таблица 6. Баланс калия (K_2O) и изменение содержания его обменной формы в каштановой почве под орошаемым картофелем после 3-х лет внесения возрастающих доз калийных удобрений

Вариант	Внесено, K ₂ O	Вынос, K ₂ O	Баланс, +/-	Интенсивность баланса, %	Содержание K ₂ O (по Мачигину)		Прирост (+), убыль (-)
					исходное	конечное	
	кг/га				мг/кг		
Контроль	0	128	-128	0	100	66	-34
N120P60S30 (фон)	0	140	-140	0	100	62	-38
Фон + K60	60	171	-111	35.1	100	39	-61
Фон + K120	120	204	-84.1	58.8	100	44	-56
Фон + K180	180	234	-54.2	76.9	100	53	-47
Фон + K360	360	258	+102	139	100	65	-35

ния калия за счет уменьшения его структурной формы по сравнению с целиной. При этом отмечено увеличение количества обменной и необменной форм калия. Длительное орошение способствовало перераспределению гранулометрических фракций со снижением песчаных и возрастанием пылеватых фракций и ила. В последних выявлено снижение содержания валового калия.

2. Устойчивость обменного калия из удобрений (K_x) к миграции обеспечивалась при соблюдении технологии поливов, не превышающих норму $350 \text{ м}^3/\text{га}$ и не способствующих накоплению хлор-иона по всему профилю.

3. Внесение возрастающих доз калийных удобрений на фоне NPS достоверно повышало содержание водорастворимого и обменного калия, тогда как в фоновом варианте отмечено снижение содержания всех форм калия, приводившее к истощенному состоянию орошаемой почвы по этому элементу. Запасы усвояемых форм калия в каштановой почве после 3-х лет внесения удобрений позволили установить дозу калия 180 кг/га (на фоне NPS) для продуктивного обеспечения ими культур.

4. Баланс калия при применении возрастающих доз удобрений был отрицательным, кроме дозы K360. Установлено, что за период внесения удобрений содержание обменного калия в орошаемой почве по сравнению с исходным его количеством снизилось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршунов А.В. Управление урожаем и качеством картофеля. М.: ВНИИКС, 2001. 369 с.
2. Tindall T.A. Potassium in potatoes // Proc. Univ. Idaho Winter Commodity Schools. 1992. V. 24. P. 123–124.
3. Tindall T.A., Westermann D.T. Potassium fertility management of potatoes // Proc. Univ. Idaho Winter Commodity Schools. 1994. V. 26. P. 239–242.
4. Tindall T.A., Westermann D.T., Stark J.C. Potassium management in irrigated potato systems of Southern Idaho // Proc. Univ. Idaho Winter Commodity Schools. 1993. V. 25. P. 149–154.
5. Westermann D.T., Tindall T.A., James D.W., Hurst R.L. Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: yield and specific gravity // Amer. Potato J. 1994. V. 71. P. 417–431.
6. Westermann D.T., Tindall T.A., James D.W., Hurst R.L. Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: sugars and starch // Amer. Potato J. 1994. V. 71. P. 433–453.
7. Lang N.S., Stevens R.G., Thornton R.E., Pan W.L., Victory S. Potato nutrient management for central Washington // Bull. EB-1871. Washington State Univ. Coop. Extension, Pullman, WA, 1999. 17 p.
8. Westermann D.T., Tindall T.A. Managing potassium in potato production systems of Idaho // Proc. Idaho Potato School. 1995. P. 201–242.
9. Moinuddin S.K., Bansal S.K., Pasricha N.S. Influence of graded levels of potassium fertilizer on growth, yield, and economic parameters of potato // J. Plant Nutr. 2004. V. 27. Iss. 2. P. 239–259.
10. Kumar G., Verama M. M., Singh J. Effect of potassium and nitrogen on yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers // Indian J. Agr. Biochem. 2004. V. 17. Iss. 1. P. 45–46.
11. Panique E., Kelling K.A., Schulte E.E., Hero D.E., Stevenson W.R., James R.V. Potassium rate and source effects on potato yield, quality, and disease interaction // Amer. Potato J. 1997. V. 74. Iss. 6. P. 379–398.
12. Elkhatib H.A., Elkhatib E.A., Khalaf Allah A.M., El-Sharkawy A.M. Yield response of salt-stressed potato to potassium fertilization: A preliminary mathematical model // J. Plant Nutr. 2004. V. 27. № 1. P. 111–122.
13. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
14. Конончук В.В., Никитина Л.В. Влияние систематического применения удобрений на баланс калия и некоторые показатели калийного режима светлo-каштановой почвы при орошении // Агрохимия. 2002. № 6. С. 53–58.
15. Grimme H. Soil moisture and K mobility // Development of K-fertilizer recommendations: Proc. 22nd IPI

- Coll. Soligorsk, USSR. Worblaufen—Bern. Switzerland: IBI, 1990. P. 117–131.
16. Середина В.П. Калийное состояние почв и факторы его определяющие (на примере почв Западно-Сибирской равнины): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск: ТомсГУ, 2003. 42 с.
 17. Абидуева Т.В., Соколова Т.А. Глинистые минералы и калийное состояние степных почв Западного Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 100 с.
 18. Минеев В.Г. Агрохимия и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
 19. Нечаева Т.В., Назарюк В.М. Влияние минеральных удобрений на динамику запасов форм калия в эродированной черноземно-луговой почве агроценоза // Вестн. ТомскГУ. 2007. № 300—II. С. 195–199.
 20. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Будаев Б.Х. Влияние возрастающих доз калийных удобрений на урожайность, качество, сохранность картофеля и динамику обменного калия в орошаемых каштановых почвах Забайкалья // Агрохимия. 2005. № 3. С. 44–54.
 21. Агрофизические методы исследования почв. М.: Наука, 1966. 259 с.
 22. Агрохимические методы исследования. М.: Наука, 1975. 656 с.
 23. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
 24. Королева И.Е. Выбор методов оценки изменения фосфатного и калийного состояния почв при антропогенном воздействии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2010. № 65. С. 48–57.
 25. Лабенец Е.М., Горбунов Н.И., Шурина Г.Н. Прогноз изменений свойств почв и разрушения минералов под влиянием воды и растворов // Почвоведение. 1974. № 4. С. 130–146.
 26. Чижикова Н.П. Изменение минералогического состава черноземов типичных при орошении // Почвоведение. 1991. № 2. С. 65–82.
 27. Чижикова Н.П. Преобразование минералогического состава почв в процессе агрогенеза: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1991. 49 с.
 28. Zubillaga M., Conti M. Importance of the textural fractions and its mineralogic characteristics in the potassium contents of different argentine soils // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1994. V. 25. Iss. 5–6. P. 479–48.
 29. Загузина Н.А., Рузавин Ю.Н. Минералогический состав почв Бурятской АССР и содержание в них различных форм соединений калия // Почвенные ресурсы Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1989. С. 59–66.
 30. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н. Калийное состояние неорошаемых и орошаемых аллювиальных дерновых почв Забайкалья // Агрохим. вестн. 2008. № 4. С. 10–11.
 31. Лысогоров С.Д., Ушкаренко В.А. Орошаемое земледелие. 1986. 588 с.
 32. Бочкарев А.В., Трефилова А.Н., Варламов В.А., Трофимов С.Н. Изучение роли хлоридов в системе почва—растение на примере картофеля // Докл. ТСХА. 2004. № 276. С. 330–333.
 33. Докшин Я.В., Федотова Л.С. Сравнительное действие хлор- и магний-, серосодержащих удобрений на продуктивность картофеля // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 1(17). С. 91–96.
 34. Конарбаева Г.А., Якименко В.Н. Изменение содержания галогенов в системе почва—растение в условиях агроценозов // Вестн. ТомскГУ. Биология. 2014. № 3(27). С. 23–35.
 35. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М. Биопродуктивность почв сенокосов и пастбищ сухостепной зоны Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 515 с.
 36. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М.: Изд-во Ледум, 2000. 185 с.
 37. Якименко В.Н. Изменение содержания форм минерального азота и калия в профиле почвы агроценозов // Вестн. ТомскГУ. 2009. № 328. С. 202–207.
 38. Пухальская Н.В., Сычев В.Г., Собачкин А.А., Павлова Н.И. Особенности калийного питания сельскохозяйственных растений в оптимальных и неблагоприятных условиях. М.: ВНИИА, 2009. 192 с.
 39. Кук Дж.У. Регулирование плодородия почвы. М.: Колос, 1970. 520 с.

Contents, Resources and Forms of Potassium in Chestnut Soils Depending on Irrigation and Growing Doses of Potassium Fertilizers (at the Background Application of NPS) under Potato

M. G. Merkusheva^{a,*}, L. L. Ubugunov^a, L. N. Boloneva^a, and I. N. Lavrentieva^a

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

^{*}E-mail: merkusheva48@mail.ru

Long-term irrigation of chestnut sandy loamy soils led to a decrease in the content and reserves of potassium due to a reduction in its structural form. The same effect was noted when using background fertilizers (NPS) and high doses of K180–360 in irrigated soil under potatoes. However, the amount of water-soluble and metabolic potassium increased during irrigation and fertilizer. The potassium balance with the use of increasing doses of fertilizers was negative, except for the dose of K360. It was found that over the period of fertilizer application, the content of exchange potassium decreased compared to its initial amount.

Key words: chestnut soil, irrigation, potato, potash state, fertilizer, balance.

УДК 631.584:631.412:631.445.5(479.24)

ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПОСЕВОВ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ И МИКРОАГРЕГАТНЫЙ СОСТАВ ГЕНЕТИЧЕСКИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЧВ СУХОЙ СУБТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ АЗЕРБАЙДЖАНА

© 2020 г. М. П. Бабаев¹, Ф. М. Рамазанова^{1,*}, Э. А. Гурбанов²

¹ Институт почвоведения и агрохимии НАН Азербайджана
AZ-1073, Баку, ул. М. Рагима, 5, Республика Азербайджан

² Азербайджанский архитектурный и строительный университет
AZ-1073 Баку, ул. А. Султанова, 5, Республика Азербайджан

*E-mail: firoza.ramazanova@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.01.2018 г.

После доработки 05.12.2018 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Показано, что для целинных (в слое 0–25 см содержание фракции <0.01 мм составляет 57.3%) и орошаемых (<0.01 мм – 58.4–59.8%) серо-коричневых (каштановых) почв Гянджа-Казахского массива гранулометрический состав тяжелосуглинистый; для целинных лугово-сероземных почв Ширванской зоны – тяжелосуглинистый (<0.01 мм – 56.0%) и для орошаемых – на границе тяжелого суглинка (<0.01 мм – 58.1–59.6%) и легкой глины (<0.01 мм – 61.0%). Выявлено, что под влиянием орошения и промежуточных посевов культур после длительных опытов на обоих типах почв происходил вынос илистой фракции и ее накопление в слое 25–50 см. Более заметным это было в варианте озимая рожь + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (3-й урожай). Коэффициент дисперсности в слое 0–25 см почвы данного варианта был наименьшим: для орошаемых серо-коричневых (каштановых) почв – 16.9%, лугово-сероземных – 16.2%. Количество водопрочных агрегатов <0.25 мм в этом варианте было больше, чем под целинной растительностью на соответствующих целинных почвах.

Ключевые слова: лугово-сероземные и серо-коричневые (каштановые) почвы, промежуточные посевы, гранулометрический и микроагрегатный состав почв.

DOI: 10.31857/S0002188120030035

ВВЕДЕНИЕ

Гранулометрический и микроагрегатный состав, а также структурное состояние почв определяют потенциальное и актуальное плодородие [1–4], оказывают влияние на агрономические свойства почвы (водно-физические, физико-механические, воздушные и др.) [5] и поэтому важно знать, как гранулометрический состав и структура изменяется при сельскохозяйственном использовании почв [6].

В исследованиях, проведенных многими учеными на генетически разных типах почв, при изучении роли гранулометрического состава в почвообразовании и повышении плодородия традиционно используют показатель изменения содержания илистой фракции (<0.001 мм) по профилю [8].

Агрофизические свойства оказывают большое влияние на развитие почвообразовательного процесса и плодородие почвы [9–11], растительный фактор – на агрофизические свойства и направленность процесса почвообразования [9].

В зависимости от биологических особенностей возделываемой культуры, от количества и качества оставленных в почве растительных остатков существенно меняются гранулометрический и микроагрегатный состав, структура почвы и направленность почвообразовательного процесса и ее плодородие [12].

В естественном состоянии серо-коричневым и лугово-сероземным почвам присуще невысокое естественное плодородие и при бесхозяйственном использовании окультуренных земель само воспроизводство агрофизических свойств этих почв ограничено. Сухая субтропическая зона

Азербайджана — это хлопковая, зерновая, овощная и фруктовая база республики. Бесконтрольная технология возделывания хлопка, зерновых и пропашных культур, а также эрозионные процессы на данных орошаемых почвах ежегодно приводят к снижению содержания гумуса и ухудшению агрофизических свойств почв [13]. Выходом из этой ситуации является улучшение агрофизических свойств путем возделывания промежуточных посевов кормовых культур. Промежуточные посевы обеспечивают круглогодичный растительный покров и непрерывное поступление в почву свежего органического вещества виде стерне-корневых остатков, восполнение дефицита гумуса в почве, улучшение агрофизических свойств, регулирование направленности почвообразовательного процесса и укреплению кормовой базы в этой зоне. Поэтому качественная оценка изменений гранулометрического и микроагрегатного составов под промежуточными посевами кормовых культур в этой зоне на вышеуказанных типах почв актуальна и имеет практическое значение.

Цель работы — изучение и оценка в длительных опытах влияния целинной растительности и разнообразных схем промежуточных посевов кормовых культур на гранулометрический и микроагрегатный состав и содержание водопрочных агрегатов в целинных и орошаемых генетически различных (серо-коричневых (каштановых) — сухостепная зона и лугово-сероземных — полупустынная зона) почвах сухой субтропической зоны Кура-Араксинской низменности Азербайджана.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанная схема промежуточных посевов кормовых культур может быть использована для оптимизации гранулометрического и микроагрегатного составов и водопрочных агрегатов, воспроизводства и стабилизации плодородия орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почв и создания прочной кормовой базы в аридной зоне.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в 1999–2016 гг. на целинных и орошаемых почвах на территориях Ширванской степи (Уджар, лугово-сероземные — по WRB — Gleyic Calcisols и Irragri Gleyic Calcisols) и Гянджа-Казахского массива (Акстафа и Джейранчель, серо-коричневые (каштановые) — по WRB — Kastanozems и Irragri Kastanozems).

Климат — субтропический с сухим жарким летом, среднегодовая температура воздуха — 12–13°C, температура холодного месяца (января) — 3.9–5.2°C, почвы не промерзают. Сумма активных

температур — 4400–5200°C, приход ФАР — 120–135 ккал/см², испаряемость высокая (947–1210 мм), индекс сухости (ИС) (по Будыко) — 1.0–11.0, коэффициент увлажнения (КУ) (по Иванову) — 0.25–0.09, количество осадков — 110–330 мм в год. В этой зоне почвы без орошения использовать невозможно [14].

Целинные и орошаемые серо-коричневые (каштановые) почвы, тип горные серо-коричневые, подтип — серо-коричневые (каштановые) формируются на верхнечетвертичных глинистых и тяжело-глинистых аллювиальных и пролювиальных отложениях на высоте 70–300 м над у.м. Целинные почвы — карбонатные, с низким хлоридно-сульфатным засолением. Содержание гумуса в слое 0–25 см почвы составляет 2.47–2.64% [14, 15]. Орошаемые почвы по гранулометрическому составу тяжелосуглинистые и легкоглинистые. В слое 0–25 см почвы степень илистости составляет 47–52%, водопроницаемость — 1.1–1.2 мм/мин, содержание гумуса — 2.58–2.67%, валового азота — 0.16–0.17% и фосфора (0.16–0.18%) — низкое, калия (2.5–2.9%) — среднее, pH 8.0–8.5 [14, 15]. На целинных почвах степень проявления ветровой эрозии слабая.

Целинные и орошаемые лугово-сероземные почвы расположены на высоте 48.80 м над у.м., 40°29'37.689"N и 47°43'34.456"E, на делювиально-аллювиальных, лессовидных суглинках. Почвы часто карбонатные или с признаками типа слабого хлоридно-сульфатного засоления. Плотность меняется в слое 0–25 см от 1.02 до 1.22 г/см³, исходное содержание гумуса — 2.10–2.60%, валовое содержание азота — 0.16, фосфора — 0.19, калия — 1.72% [14, 15].

Схема опыта, варианты: 1 — целина (попынно-бородачевый и эфемеро-бородачевый, карганный, карганно-попынный и опынно-эфемеридный ценозы), 2 — ячмень (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай), 3 — озимая рожь (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай), 4 — люцерна (на з/м), 5 — эспарцет (на з/м), 6 — кукуруза (весенний посев), 7 — кукуруза + соя + сорго + амарант (весенний посев), 8 — ячмень + вика + рапс (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (на з/м, 3-й урожай), 9 — озимая рожь + вика + рапс (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (на з/м, 3-й урожай), 10 — люцерна (хозяйственный посев), 11 — ячмень (на зерно, хозяйственный посев).

Агротехника — зональная (периодическое внесение навоза 20 т/га и N90P120K60), с включением

изученных в опытах технологий: а) озимый посев (4–10 октября, 1-й урожай) – вспашка (25–27 см) + + навоз 20 т/га (в 2000, 2005, 2010 и 2015 гг.) + + Р120, посев с внесением 20% N и K из расчета N90K60, остальную дозу – весной дробно: 50% в фазе кущения и 30% в фазе выхода в трубку; б) поукосный посев (22–27 мая, 2-й урожай) – дискование двукратное на глубину 10–12 см. N60K60 вносили дробно: под вспашку – 30%, в фазе 3–5 листьев – 50%, в фазе 8–10 листьев – 20%, уборка – 8–10 августа; в) 2-й поукосный посев (10–13 августа, 3-й урожай) – плоскорезная обработка почвы на 15–17 см, N60 вносили в 3 приема: 30% – при обработке почвы, 50% – в фазе кущения и 20% – в трубкование, уборка – 2–8 октября;

г) весенний посев силосных культур – зональная агротехника.

Площадь делянок 72 м². Влажность почвы поддерживали орошением на уровне 75–80% НВ. Постановка опытов и полевые работы проведены по методике ВИК им. В.Р. Вильямса. Почвенные разрезы заложены перед первой и при возделывании заключительной культуры (при получении 2-го и 3-го урожаев), в посевах многолетних трав (люцерны и эспарцета) – перед посевом и в конце перепашки, в остальных вариантах – в начале и в конце опыта. Образцы почв отбирали по слоям 0–25, 25–50, 50–75, 75–100 см. Гранулометрический и микроагрегатный состав определяли по Качинскому [16], коэффициент структурности – по Вадюниной–Корчагиной расчетным путем [17], статистическую обработку данных провели по [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерной особенностью гранулометрического состава является неравномерное распределение механических элементов по профилю почв [3, 11, 19], и каждая почва характеризуется определенными морфологическими признаками, которые являются диагностическими. По этим признакам можно отличить одну почву от другой и получить некоторые сведения об их происхождении, составе, свойствах, уровне плодородия [20].

Изучение морфологических профилей целинных и орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почв под естественным травостоем и промежуточными посевами кормовых культур показало, что их строение было неодинаковым: они различались по признакам оглинения, скорости вскипания от 10% HCl, окраске, гранулометрическому составу, структуре, мощности гумусового горизонта. Состояние

их морфологического профиля согласуется с их химическими показателями.

В результате длительных опытов (18 лет) в слое 0–25 см орошаемых серо-коричневых (каштановых) почв содержание гумуса находилось в пределах 2.67–3.10%, в лугово-сероземных почвах – 2.40–2.80%. Мощность гумусового горизонта составляла соответственно 55–60 и 45–55 см, плотный остаток водной вытяжки не превышал 0.021 и 0.041%. Состав солей – хлоридно-сульфатного типа.

Основополагающим физическим свойством является гранулометрический состав [21], который оказывает большое влияние на почвообразование и плодородие почвы [22].

Анализ данных показал, что в слое 0–25 см целинных серо-коричневых (каштановой) почв (сухостепная зона) под полынно-бородачевыми и эфемерно-бородачевыми ценозами гранулометрический состав был тяжелосуглинистым (табл. 1). Содержание физической глины (<0.01 мм) в этом слое составляло 57.3%. Отмечено заметное оглинение в слое 25–50 см почвы профиля, где содержание частиц <0.01 мм (60.1%) и <0.001 мм (27.9%) было сравнительно высоким. Высокодисперсионная фракция составляла 46.5% от физической глины, что подтверждало оглиненность этой части профиля.

Гранулометрический состав целинной лугово-сероземной почвы (полупустынная зона) под карганной, карганно-полынной и полынно-эфемероидными ценозами в слое 0–25 см почвы был несколько легче (<0.01 мм – 56.0% и <0.001 мм – 20.0%) и оглинение профиля (25–50 см) было выражено слабее (<0.01 мм – 59.2% и <0.001 мм – 23.1%) (табл. 2), чем в целинной серо-коричневой (каштановой) почве. Высокодисперсионная фракция в этом слое составляла 38.9% от физической глины, что подтверждало относительно слабую оглиненность этой части профиля.

При орошении гранулометрический состав первичных зональных почв преимущественно утяжеляется [23, 24], а в Кура-Араксинской низменности изменение гранулометрического состава почв под влиянием было многофакторным и зависело от источника поливных вод, давности орошения, возделываемых культур и др. [15].

На свойства исследованных орошаемых почв существенное влияние оказало орошение (повысился промывной тип за его счет), возделываемые культуры и агротехника их возделывания (табл. 1, 2).

Гранулометрический состав серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почв, орошаемых мутными водами был более тяжелым, чем

Таблица 1. Гранулометрический и микроагрегатный состав целинных и орошаемых серо-коричневых (каштановых) почв

Вариант	Глубина, см	Фракции (мм) и их содержание (%)							Коэффициент дисперсности	Степень агрегирован- ности доминиру- ющих фракций
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01		
1	0–25	<u>1.4</u>	<u>11.2</u>	<u>30.1</u>	<u>9.6</u>	<u>22.3</u>	<u>25.5</u>	<u>57.3</u>	21.6	78.4
		–	34.6	38.4	6.9	14.6	5.5	27.0		
	25–50	<u>0.7</u>	<u>10.8</u>	<u>28.4</u>	<u>11.8</u>	<u>20.4</u>	<u>27.9</u>	<u>60.1</u>	21.5	78.5
		0.2	4.4	8.0	6.4	18.0	6.0	30.4		
	50–75	<u>1.2</u>	<u>3.8</u>	<u>41.1</u>	<u>11.1</u>	<u>17.7</u>	<u>25.1</u>	<u>53.9</u>	27.9	72.1
		–	40.4	39.2	3.4	10.1	7.0	20.4		
2	0–25	<u>1.0</u>	<u>18.0</u>	<u>21.3</u>	<u>11.4</u>	<u>22.3</u>	<u>26.0</u>	<u>59.7</u>	22.3	77.7
		4.0	5.0	29.4	8.7	17.2	5.8	31.7		
	25–50	<u>0.9</u>	<u>13.3</u>	<u>22.1</u>	<u>11.9</u>	<u>25.0</u>	<u>26.9</u>	<u>63.7</u>	22.0	78.1
		7.2	5.4	34.2	8.5	18.9	5.9	33.3		
	50–75	<u>0.3</u>	<u>13.0</u>	<u>29.6</u>	<u>10.4</u>	<u>20.8</u>	<u>26.0</u>	<u>57.2</u>	26.3	73.7
		5.4	32.1	34.8	6.1	14.9	6.8	27.7		
3	0–25	<u>1.0</u>	<u>18.0</u>	<u>21.3</u>	<u>11.8</u>	<u>21.5</u>	<u>26.4</u>	<u>59.7</u>	22.1	77.9
		4.8	42.5	22.8	9.1	15.0	5.8	29.9		
	25–50	<u>0.9</u>	<u>13.3</u>	<u>22.2</u>	<u>11.6</u>	<u>25.0</u>	<u>27.1</u>	<u>63.7</u>	21.8	78.2
		7.1	25.3	35.2	8.6	17.9	5.9	32.3		
	50–75	<u>0.2</u>	<u>13.0</u>	<u>29.5</u>	<u>10.1</u>	<u>20.7</u>	<u>26.5</u>	<u>57.3</u>	26.1	74.0
		5.4	31.0	36.1	5.1	15.4	6.9	27.4		
4	0–25	<u>0.7</u>	<u>15.8</u>	<u>24.9</u>	<u>9.1</u>	<u>22.7</u>	<u>26.8</u>	<u>58.5</u>	22.1	77.9
		0.8	38.0	36.0	4.7	14.7	5.9	25.3		
	25–50	<u>0.9</u>	<u>19.4</u>	<u>21.4</u>	<u>12.0</u>	<u>19.0</u>	<u>27.7</u>	<u>58.4</u>	21.7	78.3
		2.0	38.1	35.0	4.6	14.4	6.0	25.0		
	50–75	<u>1.0</u>	<u>6.5</u>	<u>29.5</u>	<u>9.4</u>	<u>27.0</u>	<u>26.7</u>	<u>63.1</u>	27.0	73.0
		0.7	37.9	34.9	6.8	12.6	7.2	26.6		
5	0–25	<u>0.9</u>	<u>11.9</u>	<u>28.1</u>	<u>9.0</u>	<u>23.2</u>	<u>26.9</u>	<u>59.2</u>	22.3	77.7
		1.0	37.7	35.0	5.5	14.8	6.0	26.3		
	25–50	<u>0.8</u>	<u>15.3</u>	<u>23.5</u>	<u>14.6</u>	<u>18.3</u>	<u>27.5</u>	<u>60.4</u>	21.6	78.4
		1.1	38.1	34.3	4.0	16.6	5.9	26.6		
	50–75	<u>1.1</u>	<u>6.1</u>	<u>30.3</u>	<u>8.8</u>	<u>27.6</u>	<u>26.2</u>	<u>62.6</u>	26.9	73.1
		1.8	34.0	37.0	6.9	13.2	7.1	27.2		
6	0–25	<u>1.5</u>	<u>13.8</u>	<u>24.9</u>	<u>11.9</u>	<u>21.8</u>	<u>26.1</u>	<u>59.8</u>	23.2	76.8
		2.8	30.0	36.8	6.8	15.7	8.0	30.4		
	25–50	<u>1.9</u>	<u>13.0</u>	<u>23.3</u>	<u>12.5</u>	<u>22.5</u>	<u>26.8</u>	<u>61.8</u>	23.0	77.0
		8.1	33.3	31.6	4.7	16.3	6.2	27.1		
	50–75	<u>1.7</u>	<u>14.1</u>	<u>26.0</u>	<u>15.6</u>	<u>19.4</u>	<u>23.3</u>	<u>58.2</u>	31.6	68.4
		6.1	39.0	34.0	4.7	9.0	7.4	21.0		
7	0–25	<u>1.0</u>	<u>13.2</u>	<u>27.4</u>	<u>11.4</u>	<u>20.6</u>	<u>26.5</u>	<u>58.4</u>	23.1	77.0
		7.0	38.9	30.1	4.2	13.8	5.8	24.1		

Таблица 1. Окончание

Вариант	Глубина, см	Фракции (мм) и их содержание (%)							Коэффициент дисперсности	Степень агрегированности доминирующих фракций
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01		
8	25–50	<u>0.1</u>	<u>10.1</u>	<u>29.8</u>	<u>15.0</u>	<u>18.0</u>	<u>27.0</u>	<u>60.1</u>	22.4	77.6
		5.6	38.9	30.8	3.8	14.9	7.6	24.7		
	50–75	<u>0.2</u>	<u>13.1</u>	<u>27.8</u>	<u>13.0</u>	<u>20.2</u>	<u>25.7</u>	<u>58.9</u>	30.4	69.6
		3.8	39.2	32.0	3.9	13.4	7.8	25.0		
	0–25	<u>0.3</u>	<u>12.62</u>	<u>28.9</u>	<u>8.5</u>	<u>23.1</u>	<u>26.6</u>	<u>58.2</u>	18.8	81.2
		1.5	39.59	35.9	4.4	13.6	5.0	23.0		
9	25–50	<u>0.3</u>	<u>12.78</u>	<u>26.0</u>	<u>11.0</u>	<u>22.8</u>	<u>27.1</u>	<u>60.9</u>	18.5	81.5
		0.1	34.77	38.6	3.5	13.0	5.0	26.5		
	50–75	<u>0.1</u>	<u>14.06</u>	<u>29.8</u>	<u>12.0</u>	<u>17.7</u>	<u>26.4</u>	<u>56.1</u>	26.7	73.3
		5.6	40.84	30.9	3.8	13.9	5.0	22.7		
	0–25	<u>0.2</u>	<u>11.6</u>	<u>28.8</u>	<u>8.1</u>	<u>24.6</u>	<u>26.7</u>	<u>59.4</u>	16.9	83.1
		1.1	39.3	36.0	4.4	14.7	4.5	23.6		
10	25–50	<u>0.3</u>	<u>10.0</u>	<u>29.5</u>	<u>10.1</u>	<u>22.8</u>	<u>27.4</u>	<u>60.2</u>	16.8	83.2
		0.4	37.0	37.5	4.3	16.3	4.6	25.2		
	50–75	<u>0.3</u>	<u>13.1</u>	<u>29.1</u>	<u>13.4</u>	<u>16.6</u>	<u>27.5</u>	<u>57.5</u>	21.1	78.9
		3.0	40.0	35.1	3.0	13.1	5.8	21.1		
	0–25	<u>0.9</u>	<u>13.2</u>	<u>27.3</u>	<u>9.8</u>	<u>22.7</u>	<u>26.1</u>	<u>58.6</u>	22.4	77.7
		6.8	38.5	32.8	6.0	10.1	5.8	22.9		
11	25–50	<u>0.3</u>	<u>10.7</u>	<u>28.4</u>	<u>12.6</u>	<u>21.2</u>	<u>26.9</u>	<u>60.7</u>	21.2	78.8
		5.8	30.9	32.0	4.8	20.7	5.7	31.3		
	50–75	<u>0.3</u>	<u>14.1</u>	<u>29.4</u>	<u>11.2</u>	<u>18.9</u>	<u>26.1</u>	<u>56.2</u>	28.0	72.1
		3.4	38.5	35.9	4.8	12.0	7.3	24.2		
	0–25	<u>0.8</u>	<u>12.1</u>	<u>27.9</u>	<u>14.9</u>	<u>20.0</u>	<u>24.3</u>	<u>59.2</u>	23.9	76.1
		8.1	34.2	30.8	8.0	13.2	5.8	26.9		
	25–50	<u>0.4</u>	<u>11.9</u>	<u>27.8</u>	<u>10.7</u>	<u>23.6</u>	<u>25.6</u>	<u>59.9</u>	22.3	77.7
		2.7	36.2	30.0	8.9	16.5	5.7	31.1		
	50–75	<u>1.5</u>	<u>13.1</u>	<u>28.0</u>	<u>11.6</u>	<u>20.4</u>	<u>25.5</u>	<u>57.4</u>	29.4	70.0
		4.6	37.0	29.0	10.8	11.2	7.5	29.5		

Примечания. 1. Варианты опыта: 1 – целина (попынно-бородачевые и эфемерно-бородачевые ценозы), 2 – ячмень (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай), 3 – озимая рожь (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай), 4 – люцерна (на з/м), 5 – эспарцет (на з/м), 6 – кукуруза (весенний посев), 7 – кукуруза + соя + сорго + амарант (весенний посев), 8 – ячмень + вика + рапс (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (на з/м, 3-й урожай), 9 – озимая рожь + вика + рапс (на з/м, 1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (на з/м, 3-й урожай), 10 – люцерна (хозяйственный посев), 11 – ячмень (на зерно, хозяйственный посев); з/м – зеленая масса. То же в табл. 2–4. 2. Над чертой – гранулометрический состав, под чертой – микроагрегатный состав. То же в табл. 2. 3. Нумерация вариантов та же в табл. 2–4.

их целинных аналогов и характеризовался большей однородностью по профилю. Под чистыми посевами злаковых (варианты 2, 3, 6, 11) почвенный профиль орошаемых серо-коричневых (каш-

тановых) и лугово-сероземных почв был относительно более уплотненным, и четко выделялся рыхлостью слой 0–25 см. Глубже сформировались горизонты почти одинаковой плотности.

Таблица 2. Гранулометрический и микроагрегатный состав целинных и орошаемых лугово-сероземных почв

Вариант	Глубина, см	Фракции (мм) и их содержание (%)							Коэффициент дисперсности	Степень агрегированности доминирующих фракций Степень агрегированности доминирующих фракций
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01		
1	0–25	0.8	18.8	24.5	9.9	26.1	20.0	56.0	23.2	76.9
		0.7	25.1	38.1	10.7	20.8	4.6	36.1		
	25–50	–	16.9	23.9	11.0	25.2	23.1	59.2	21.7	78.3
		1.0	31.6	34.0	9.4	19.1	5.0	33.5		
	50–75	–	14.9	27.0	9.0	27.2	21.9	58.1	24.9	75.1
		0.8	29.1	32.0	12.3	18.7	5.4	38.1		
2	0–25	0.4	19.9	20.1	11.4	25.2	23.0	59.6	23.0	77.2
		1.0	23.4	39.8	10.1	19.2	6.6	35.9		
	25–50	–	17.8	19.9	14.0	22.0	28.3	62.3	24.7	75.3
			34.0	24.8	10.6	23.6	7.0	41.2		
	50–75	0.2	15.9	24.8	15.9	17.3	25.9	59.2	30.6	69.4
		0.4	33.3	26.8	8.6	23.0	7.9	39.5		
3	0–25	0.3	17.6	20.2	11.3	23.2	26.4	61.9	22.7	77.4
		1.1	24.1	38.6	8.9	21.3	6.0	36.2		
	25–50	–	11.6	26.7	10.2	24.2	26.3	61.7	22.6	77.4
			21.7	38.6	7.0	26.8	5.9	45.7		
	50–75	1.1	15.3	21.0	13.6	14.6	25.0	62.6	28.4	71.6
		0.7	38.2	26.8	4.4	22.8	7.1	34.3		
4	0–25	0.2	18.4	22.2	9.6	22.8	26.9	59.3	21.5	78.5
		0.8	31.6	41.6	7.0	13.2	5.8	26.0		
	25–50	0.2	17.6	20.4	10.2	23.8	27.8	61.8	22.1	77.9
		0.9	29.0	39.7	6.0	18.3	6.2	30.4		
	50–75	0.04	16.2	24.1	10.5	22.7	26.4	59.6	27.4	72.7
		1.2	36.4	32.7	6.3	16.3	7.2	29.8		
5	0–25	0.1	18.5	22.8	10.0	24.8	23.8	58.6	22.7	77.4
		1.1	30.0	42.7	8.1	18.8	5.4	26.2		
	25–50	0.1	15.9	20.8	10.2	24.2	28.8	63.2	22.7	77.3
		0.8	36.9	31.0	6.8	18.0	6.6	31.4		
	50–75	0.2	14.0	25.6	13.8	20.0	26.4	60.2	28.8	71.2
		–	35.6	36.4	7.2	13.2	7.6	28.0		
6	0–25	0.1	16.6	25.2	12.0	22.0	26.1	58.1	23.3	76.7
		0.8	28.4	40.5	8.7	15.6	6.1	30.4		
	25–50	1.9	15.0	24.1	14.8	17.5	26.8	59.0	24.3	75.7
		–	33.6	36.2	7.6	16.1	6.5	30.2		
	50–75	0.2	16.0	24.3	15.9	20.4	23.3	59.5	31.6	64.5
		1.1	32.9	34.7	9.8	14.2	7.4	31.3		

Таблица 2. Окончание

Вариант	Глубина, см	Фракции (мм) и их содержание (%)							Коэффициент дисперсности	Степень агрегированности доминирующих фракций Степень агрегированности доминирующих фракций
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01		
7	0–25	<u>0.1</u>	<u>11.5</u>	<u>30.9</u>	<u>11.1</u>	<u>20.8</u>	<u>25.6</u>	<u>57.5</u>	22.6	77.4
		0.7	26.5	43.0	7.1	17.0	5.8	29.9		
	25–50	<u>0.3</u>	<u>10.4</u>	<u>28.4</u>	<u>15.6</u>	<u>18.7</u>	<u>26.7</u>	<u>61.0</u>	22.5	77.6
		0.6	33.1	30.3	9.6	20.4	6.0	36.0		
	50–75	<u>0.2</u>	<u>8.0</u>	<u>28.0</u>	<u>13.1</u>	<u>25.3</u>	<u>25.4</u>	<u>63.9</u>	34.3	69.6
		–	32.1	34.7	5.3	19.3	8.7	33.3		
8	0–25	<u>0.02</u>	<u>11.3</u>	<u>29.0</u>	<u>9.0</u>	<u>22.0</u>	<u>27.7</u>	<u>59.7</u>	19.5	80.5
		–	40.9	30.4	4.1	17.1	5.4	26.6		
	25–50	<u>0.1</u>	<u>14.2</u>	<u>24.3</u>	<u>12.2</u>	<u>20.9</u>	<u>28.3</u>	<u>61.4</u>	21.3	80.2
		1.1	36.1	33.4	8.1	15.2	6.0	29.3		
	50–75	<u>0.4</u>	<u>13.5</u>	<u>24.9</u>	<u>10.2</u>	<u>23.8</u>	<u>27.1</u>	<u>61.1</u>	29.5	73.3
		0.1	38.9	31.0	5.2	16.9	8.0	30.0		
9	0–25	<u>0.08</u>	<u>16.9</u>	<u>23.9</u>	<u>8.7</u>	<u>22.6</u>	<u>27.8</u>	<u>59.1</u>	16.2	83.8
		0.69	37.9	36.1	5.1	15.7	4.5	25.3		
	25–50	<u>0.17</u>	<u>13.9</u>	<u>24.4</u>	<u>10.1</u>	<u>23.1</u>	<u>28.3</u>	<u>61.6</u>	16.7	83.3
		–	39.9	33.9	5.9	15.6	4.7	26.2		
	50–75	<u>0.09</u>	<u>15.0</u>	<u>23.3</u>	<u>12.0</u>	<u>22.3</u>	<u>27.3</u>	<u>61.6</u>	23.8	76.2
		0.70	40.0	35.1	5.8	12.0	6.5	24.3		
10	0–25	<u>0.3</u>	<u>16.3</u>	<u>23.0</u>	<u>10.0</u>	<u>24.0</u>	<u>26.5</u>	<u>60.5</u>	21.9	78.1
		2.0	40.7	30.6	8.8	12.1	5.8	26.8		
	25–50	<u>0.5</u>	<u>9.9</u>	<u>27.7</u>	<u>11.0</u>	<u>23.1</u>	<u>27.9</u>	<u>61.9</u>	22.3	77.7
		0.1	30.8	39.4	6.6	16.9	6.2	29.7		
	50–75	<u>0.2</u>	<u>13.6</u>	<u>25.8</u>	<u>12.7</u>	<u>21.0</u>	<u>26.7</u>	<u>60.5</u>	28.5	71.5
		0.1	25.0	40.0	9.7	17.6	7.6	34.9		
11	0–25	<u>0.3</u>	<u>11.2</u>	<u>27.5</u>	<u>11.8</u>	<u>23.7</u>	<u>25.6</u>	<u>61.0</u>	23.5	76.5
		1.0	28.1	35.5	9.1	20.2	6.0	35.3		
	25–50	<u>0.8</u>	<u>10.7</u>	<u>27.0</u>	<u>10.5</u>	<u>25.2</u>	<u>25.8</u>	<u>61.5</u>	24.4	75.6
		1.1	30.4	27.9	8.3	26.0	6.3	40.6		
	50–75	<u>1.7</u>	<u>14.1</u>	<u>25.8</u>	<u>9.0</u>	<u>25.1</u>	<u>24.3</u>	<u>58.4</u>	30.9	69.1
		0.9	27.6	30.8	11.0	14.3	7.5	40.8		

Профили почвы вариантов ячмень + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (3-й урожай), озимая рожь + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (3-й урожай), и эспарцета были

более рыхловатыми: во всем слое 0–50 см почвы отмечены полуразложившиеся остатки прошлогодней запаханной стерни, ходы червей и поры, что и придавало рыхлость профилю. Если в вариантах 2, 3, 6 и 11 структура слоя 0–25 почвы была мелкокомковато-пылеватая, то в вариантах 4, 5,

8, 9 и 10 как в слое 0–25 см, так и в слое 25–50 см почвы — мелкокомковато-зернистая, причем в слое 25–50 см серо-коричневой (каштановой) почвы преобладала хорошо выраженная зернистая структура. В вариантах с ячменем на зерно (хозяйственный посев) и с основными посевами кукурузы, а также в смеси с соей, сорго и амарантом свойства почв не изменились.

Длительное сельскохозяйственное использование орошаемых почв с применением интенсивной технологии возделывания культур не могло не отразиться на гранулометрическом и микроагрегатном составе. Установлено, что несмотря на устойчивость гранулометрического и микроагрегатного составов, в орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почвах отмечены изменения в гранулометрическом составе частиц (табл. 1, 2).

В пахотном слое (0–25 см) орошаемых серо-коричневых почв содержание мелкого песка менялось в пределах от 11.6 до 18.0%. Минимальное содержание этой фракции (6.5%) было в слое 50–75 см почвы под люцерной, наибольшее — под люцерной хозяйственного посева и кукурузой основного весеннего посева (14.1%).

В пахотном слое отмечено повышенное содержание крупной пыли (0.05–0.01 мм), доля которой менялась в пределах 21.3–28.9%.

Количество средней пыли (0.01–0.005 мм) определяет связанность и пластичность почвы, удерживает влагу. Однако эта фракция обладает слабой водопроницаемостью и не способна к коагуляции. Исходя из этого, невысокое содержание средней пыли в почве (менее <10%) позволяет избежать ее запыливания [25].

Наименьшее содержание этой фракции в слое 0–25 см почвы отмечено в вариантах 8 и 9 (8.5 и 8.1%), наибольшее — в варианте с ячменем хозяйственного посева (14.9%), остальные варианты занимали промежуточное положение.

В сухостепной и полупустынной наблюдается вынос тонких частиц по профилю [26–29]. Наши исследования подтвердили это положение. Установлено, что количество фракции <0.001 мм возросло до 24.3–26.9 в слое 0–25 см почвы и до 25.6–27.7% в иллювиальном, но в слое 75–100 см почвы снижалось до 25.0–26.4%. Это свидетельствовало о некотором утяжелении гранулометрического состава и накоплении илистых частиц на глубине 25–50 см.

Анализируя количественные изменения содержания илистой фракции по профилю почв, отметили, что в варианте 9 происходило равномерное ее распределение. Оглинение наблюдали в

орошаемой серо-коричневой (каштановой) почве по увеличению количества физической глины и илистой фракции, особенно в средних слоях почвенного профиля. Это было связано со слитностью верхней и средней частей профиля при их орошении (увлажнении). Вместе с тем почвы в вариантах 8 и 9 уступали по степени оглинения и мощности горизонта элювиального оглинения почвам в вариантах 2, 3, 6, 11. Варианты 4, 5, 7 и 10 занимали промежуточное положение. Однако глинонакопление в вариантах 8 и 9 было несколько меньше, чем в почвах остальных вариантов. Выявлено, что в сухостепной зоне в слое 0–25 см целинной (содержание физической глины (<0.01 мм) составляло 57.3%) и орошаемой серо-коричневой (каштановой) почвах (<0.01 мм — 58.4–59.8%) гранулометрический состав был тяжелосуглинистым. Отмечено заметное оглинение в слое 25–50 см почвы профиля, где содержание частиц <0.01 мм (60.1%) и <0.001 мм (27.9%) было сравнительно высоко.

Гранулометрический состав в слое 0–25 см целинной лугово-сероземной почвы (полупустынная зона) почвы был несколько легче (<0.01 мм — 56.0 и <0.001 мм — 20.0%) и оглинение профиля (слой 25–50 см) выражено слабее (<0.01 мм — 59.2 и <0.001 мм — 23.1%), чем в целинной серо-коричневой (каштановой) почве.

На свойства орошаемых лугово-сероземных почв такие факторы как орошение, возделываемые культуры и агротехника их возделывания также оказали существенное влияние (табл. 2). Гранулометрический состав орошаемых лугово-сероземных почв по сравнению с целинными аналогами, был более тяжелым. Отмечено изменение в гранулометрическом составе частиц орошаемых лугово-сероземных почв в слое 0–25 см: количество фракции 0.25–0.05 мм менялось в пределах 11.2–19.9%. Минимальное количество мелкого песка содержалось в слое 50–75 см почвы в варианте с ячменем хозяйственного посева (7.0%), максимальное — в варианте 2 (18.7%).

Количество крупной пыли (0.05–0.01 мм) в пахотном слое почвы варьировало в пределах 20.1–30.9% (минимальное — в варианте ячмень (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай), максимальное — в варианте кукуруза + соя + сорго + амарант весеннего посева, остальные варианты занимали промежуточное положение).

Фракция частиц размером 0.01–0.005 мм определяет связанность и пластичность почвы, удерживает влагу. Минимальное содержание этой фракции в пахотном слое почвы выявлено в вариантах 8 и 9 (8.7 и 9.0%), максимальное — в варианте

с кукурузой весеннего посева (12.0%), остальные варианты занимали промежуточное положение.

Тяжелосуглинистый гранулометрический состав целинной почвы под карганным, карганно-попынным и попынно-эфемероидным ценозами объясняется содержанием физической глины в пределах 53.4–59.2%, орошаемых почв – гранулометрическим составом на границе тяжелого суглинка и легкой глины (58.4–63.869%), что объясняется интенсивным накоплением агроирригационных наносов и их тяжелым гранулометрическим составом. С глубиной по профилю почвы наблюдали снижение содержания физической глины (<0.01 мм) во всех вариантах. Очевидно, это было связано с некоторым утяжелением с глубиной гранулометрического состава. В подпахотном слое почвы отмечено накопление илистой фракции (<0.001 мм) в вариантах 2, 3, 6 и 11: илистой фракции было на 3.0% меньше, чем в остальных вариантах.

Степень оглинения орошаемых лугово-сероземных почв была больше, чем серо-коричневых (каштановых) почв. В орошаемой лугово-сероземной почве содержание крупной пыли по сравнению с серо-коричневой почвой во всех вариантах было больше. Наименьшее содержание фракции 0.005–0.001 мм было в почве в почве вариантов 8 и 9 (22.0–22.6%), наибольшее (25.2%) – в варианте 2.

Одновременно с гранулометрическим составом определили и микроагрегатный состав целинных и орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почв (табл. 1, 2). Преобладающими фракциями как в орошаемых серо-коричневых (каштановых), так и в лугово-сероземных почвах были фракции 0.05–0.01 и 0.25–0.05 мм. Полученные другими авторами данные совпадали с результатами нашего исследования.

По показателям гранулометрического и микроагрегатного составов по формуле рассчитали показатель фактора дисперсности [17]:

$K_g = (a/B) \times 100$, где K_g – фактор дисперсности, a – содержание ила (частиц <0.001 мм) в микроагрегатном составе, %; B – содержание ила в гранулометрическом составе, %. В пахотном горизонте наибольшая величина фактора дисперсности установлена как для орошаемых серо-коричневых (каштановых), так и для лугово-сероземных почв в вариантах ячменя на зерно (соответственно 23.9 и 23.5%), кукурузы чистого посева – 23.2 и 23.3%. Это свидетельствовало о слабой оструктуренности данного слоя почв под этими культурами. Под люцерной, эспарцетом, в вариантах 8 и 9 фактор дисперсности был равен соответственно

22.1, 22.3, 18.8, 16.9% и 21.5, 22.7, 19.5 и 16.2%. Установлено, что с глубиной в обоих исследованных типах почв коэффициент дисперсности увеличивался, что, вероятно, можно объяснить снижением содержания гумуса.

Оптимальная величина коэффициента дисперсности отмечена в слое 0–25 см исследованных почв в варианте озимая рожь + вика + рапс (на 3/м, 1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (3-й урожай). Видимо, этому способствовало наличие в почве органического вещества в виде стерне-корневых остатков, распад которых определял новообразование органических коллоидов в этом слое и наравне с расщеплением агрегатов, возникших при коагуляции дисперсных систем на первичные частицы под действием воды более крупных почвенных частиц приводило к увеличению содержания илистой фракции.

Для характеристики уровня микроагрегатности (табл. 3) как в орошаемых серо-коричневых (каштановых), так и в лугово-сероземных почвах было рассчитано содержание так называемых “истинных” водопрочных агрегатов по методу [17], как разность однотипных фракций микроагрегатного и гранулометрического составов.

Установлено, что в орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почвах в вариантах 8 и 9 были созданы оптимальные условия для образования и сохранения микроагрегатного строения. В данных вариантах количество “истинных” микроагрегатов было почти одинаковым (33.1–33.2 – в орошаемой лугово-сероземной и 34.0–34.9% – в орошаемой серо-коричневой (каштановой) почвах).

Несколько меньшее количество истинных микроагрегатов отмечено в вариантах с люцерной и эспарцетом (соответственно 31.4–32.6 и 33.2–32.7%), варианты 2, 3 и 7 занимали промежуточное положение. В вариантах 6 и 11 их было еще меньше, чем в предыдущих вариантах (24.9–27.1%), и возделывание злаковых культур способствовало некоторому разрушению микроагрегатной структуры.

В условиях интенсивно орошаемого земледелия структура является одним из определяющих признаков при диагностике плодородия окультуренных почв [15]. Установлено, что в целинной серо-коричневой (каштановой) почве под попынно-бородачевым и эфемеро-бородачевым ценозами содержание водопрочных агрегатов >0.25 мм в пахотном слое составляло 49.9%, а в орошаемой (в зависимости от схемы промежуточных культур) – 25.0–28.2%. Это подтвердило, что в бес-

Таблица 3. Содержание “истинных” водопрочных микроагрегатов в почве, %

Вариант	Глубина, см	Фракции 0.25—0.01 мм			Фракции 0.25—0.01 мм		
		состав		3	состав		3
		1	2		1	2	
		Лугово-сероземные почвы			Серо-коричневые (каштановые)		
1	0—25	63.2	43.3	20.0	73.0	41.3	31.8
	25—50	65.6	40.8	24.8	62.4	39.2	23.2
	50—75	61.1	41.9	19.2	79.6	45.0	34.6
2	0—25	63.2	40.0	23.1	64.3	39.3	25.0
	25—50	58.8	37.7	21.1	59.6	35.4	24.2
	50—75	60.1	40.7	19.5	66.9	42.6	24.3
3	0—25	62.7	38.8	23.9	65.3	39.3	26.0
	25—50	60.3	38.3	21.9	60.5	35.5	25.1
	50—75	65.0	36.3	28.7	67.1	42.5	24.6
4	0—25	73.2	40.6	32.6	74.0	40.7	33.2
	25—50	68.7	38.0	30.6	73.1	40.8	32.3
	50—75	69.1	40.4	28.7	72.7	35.9	36.8
5	0—25	72.7	41.3	31.4	72.7	40.0	32.7
	25—50	67.9	36.7	31.2	72.4	38.8	33.5
	50—75	72.0	39.6	32.4	71.0	36.4	34.7
6	0—25	68.9	41.8	27.1	66.8	38.7	28.2
	25—50	69.8	39.1	30.7	64.9	36.3	28.6
	50—75	67.6	40.3	27.2	72.9	40.1	32.8
7	0—25	69.4	42.4	27.0	68.9	40.6	28.3
	25—50	63.4	38.7	24.7	69.7	39.8	29.9
	50—75	66.7	36.0	34.7	71.2	40.9	30.3
8	0—25	73.4	40.3	33.1	75.4	41.5	33.9
	25—50	69.6	38.5	31.1	73.4	38.8	34.6
	50—75	69.9	38.4	31.4	71.7	43.8	27.9
9	0—25	74.0	40.8	33.2	75.3	40.4	34.9
	25—50	70.8	38.3	32.5	74.4	39.5	34.9
	50—75	75.0	38.3	36.7	75.1	42.2	33.0
10	0—25	71.2	39.3	32.0	71.3	40.5	30.8
	25—50	70.2	37.6	32.6	63.0	39.1	32.9
	50—75	65.0	39.4	25.7	74.5	43.5	31.0
11	0—25	63.7	38.8	24.9	65.0	40.0	25.0
	25—50	58.3	37.7	20.6	66.2	39.7	26.6
	50—75	58.4	40.0	18.4	65.9	41.1	24.8

Примечание. В графе 1 – микроагрегатный, 2 – гранулометрический состав, 3 – количество “истинных” микроагрегатов. То же в табл. 4.

сменных посевах кормовых культур содержание водопрочных агрегатов >0.25 мм в слое 0–25 см варьировало в пределах 24.0–55.6%. Наибольшее содержание водопрочных агрегатов в пахотном слое отмечено в варианте 9 (55.6%), затем следовали варианты 8 (53.7%), варианты с люцерной и эспарцетом (48.2 и 47.9%), наименьшее – в варианте с кукурузой весеннего посева (24.0%), остальные варианты занимали промежуточное положение.

Выявлено, что при мокром рассеивании почвы как в орошаемых серо-коричневых (каштановых), так и в лугово-сероземных почвах в вариантах промежуточных посевов кормовых культур преобладали фракции >0.25 мм (соответственно 24.0–55.6 и 22.8–43.3%) и фракции 0.5–0.25 мм (8.7–20.1 и 8.6–17.1%).

Установлено, что на долю фракции >0.25 мм в слое 0–25 см почвы в вариантах 2, 3, 6, 7 и 11 в

Таблица 4. Статистические показатели данных физических свойств генетически различных почв сухой субтропической зоны

Вариант	Глубина, см	Доверительный интервал при уровне значимости 05: ($x \pm t_{05} s_x$) фракций 0.25–0.01 мм ($n = 10$)					
		Лугово-сероземная почва			Серо-коричневая (каштановая) почва		
		1	2	3	1	2	3
1	0–25	64.4 ± 4.2	43.3 ± 4.3	21.1 ± 0.1	73.0 ± 4.4	41.3 ± 4.4	31.8 ± 0.04
	25–50	68.6 ± 4.1	40.9 ± 4.4	27.7 ± 0.3	62.4 ± 4.4	39.2 ± 4.4	23.2 ± 0.02
	50–75	65.4 ± 4.1	42.0 ± 4.3	23.4 ± 0.2	79.6 ± 4.3	45.0 ± 4.3	34.6 ± 0.00
2	0–25	74.0 ± 3.7	40.4 ± 4.3	33.6 ± 0.6	64.3 ± 4.4	39.3 ± 4.4	25.0 ± 0.02
	25–50	63.2 ± 4.0	38.0 ± 4.3	21.1 ± 0.3	59.6 ± 4.3	35.4 ± 4.4	24.2 ± 0.03
	50–75	64.4 ± 4.0	41.0 ± 4.3	19.5 ± 0.2	66.9 ± 4.4	42.6 ± 4.4	24.3 ± 0.00
3	0–25	66.0 ± 4.1	38.5 ± 4.3	23.9 ± 0.4	65.3 ± 4.4	39.3 ± 4.4	26.0 ± 0.02
	25–50	60.0 ± 4.3	38.5 ± 4.3	21.9 ± 0.1	60.5 ± 4.4	35.5 ± 4.3	25.1 ± 0.1
	50–75	65.0 ± 4.3	36.0 ± 4.4	28.7 ± 0.1	67.1 ± 4.8	42.5 ± 4.3	24.6 ± 0.03
4	0–25	77.0 ± 4.1	40.5 ± 4.3	32.6 ± 0.2	74.0 ± 4.3	40.7 ± 4.4	33.2 ± 0.02
	25–50	71.0 ± 4.2	38.0 ± 4.4	30.6 ± 0.2	73.1 ± 4.4	40.8 ± 4.4	32.3 ± 0.01
	50–75	69.0 ± 4.3	40.0 ± 4.4	28.7 ± 0.1	72.7 ± 4.4	35.9 ± 4.4	36.8 ± 0.02
5	0–25	75.0 ± 4.2	41.9 ± 4.3	31.4 ± 0.1	72.7 ± 4.4	40.0 ± 4.3	32.7 ± 0.03
	25–50	68.1 ± 4.3	36.0 ± 4.3	31.2 ± 0.02	72.4 ± 4.4	38.8 ± 4.4	33.5 ± 0.02
	50–75	75.0 ± 4.2	40.0 ± 4.3	32.4 ± 0.2	71.0 ± 4.4	36.4 ± 4.4	34.7 ± 0.00
6	0–25	69.0 ± 4.3	42.0 ± 4.3	27.1 ± 0.02	66.8 ± 4.4	38.7 ± 4.3	28.2 ± 0.02
	25–50	70.0 ± 4.3	39.2 ± 4.3	30.7 ± 0.02	64.9 ± 4.3	36.3 ± 4.4	28.6 ± 0.03
	50–75	67.9 ± 4.4	40.5 ± 4.3	27.2 ± 0.04	72.9 ± 4.4	40.1 ± 4.4	32.8 ± 0.02
7	0–25	70.0 ± 4.3	42.2 ± 4.3	27.0 ± 0.04	68.9 ± 4.4	40.6 ± 4.3	28.3 ± 0.1
	25–50	64.0 ± 4.3	38.6 ± 4.4	24.7 ± 0.1	69.7 ± 4.4	39.8 ± 4.4	29.9 ± 0.1
	50–75	67.2 ± 4.3	35.9 ± 4.3	34.7 ± 0.0	71.2 ± 4.4	40.9 ± 4.3	30.3 ± 0.1
8	0–25	74.0 ± 4.3	40.2 ± 4.4	33.1 ± 0.1	75.4 ± 4.4	41.5 ± 4.4	33.9 ± 0.02
	25–50	70.0 ± 4.6	38.4 ± 4.3	31.1 ± 0.2	73.4 ± 4.4	38.8 ± 4.3	34.6 ± 0.04
	50–75	70.0 ± 4.3	38.4 ± 4.3	31.4 ± 0.04	71.7 ± 4.4	43.8 ± 4.3	27.9 ± 0.04
9	0–25	74.0 ± 4.4	40.7 ± 4.3	33.2 ± 0.1	75.3 ± 4.3	40.4 ± 4.4	34.9 ± 0.1
	25–50	71.0 ± 4.3	38.3 ± 4.4	32.5 ± 0.1	74.4 ± 4.4	39.5 ± 4.3	34.9 ± 0.1
	50–75	75.0 ± 4.3	38.3 ± 4.3	36.7 ± 0.0	75.1 ± 4.4	42.2 ± 4.3	33.0 ± 0.02
10	0–25	71.0 ± 4.4	39.3 ± 4.3	32.0 ± 0.1	71.3 ± 4.4	40.5 ± 4.3	30.8 ± 0.03
	25–50	70.0 ± 4.4	37.4 ± 4.3	32.6 ± 0.03	63.0 ± 4.4	39.1 ± 4.3	32.9 ± 0.1
	50–75	65.0 ± 4.4	39.4 ± 4.3	25.7 ± 0.01	74.5 ± 4.4	43.5 ± 4.4	31.0 ± 0.01
11	0–25	64.0 ± 4.3	38.9 ± 4.3	24.9 ± 0.01	65.0 ± 4.4	40.0 ± 4.3	25.0 ± 0.03
	25–50	58.0 ± 4.4	37.7 ± 4.3	20.6 ± 0.1	66.2 ± 4.4	39.7 ± 4.3	26.6 ± 0.1
	50–75	58.3 ± 4.3	40.2 ± 4.3	18.4 ± 0.02	65.9 ± 4.3	41.0 ± 4.3	24.8 ± 0.0

орошаемых серо-коричневых (каштановых) почвах приходилось 24.–37.1%, в лугово-сероземных почвах – 22.8–35.8%. Это можно объяснить тем, что при бессменном возделывании злаковых культур под влиянием поливов структура почв распалялась, и уменьшалось количество водопрочных агрегатов.

В слое 25–50 см их водопрочность возросла соответственно до 42.3–47.0 и 41.0–52.7%. В почве

под люцерной, эспарцетом и травосмесями (варианты 8 и 9) их содержание в пахотном слое как в орошаемых серо-коричневых (каштановых), так и лугово-сероземных почвах было соответственно на 15.7–28.7 и 7.5–16.2% больше, чем в вариантах 8 и 9. Очевидно, изменение долевого состава водопрочных агрегатов >0.25 мм в почве этих вариантов в сторону оптимального можно объяснить наибольшим содержанием в орошае-

рых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почвах органического вещества за счет периодического внесения навоза и возделывания травосмесей, обеспечивших круглогодичное поступление в почву высококачественных растительных остатков и создающих благоприятные условия для склеивания почвенных частиц в более крупные водопрочные агрегаты. В целинном варианте заметных изменений содержания водопрочных агрегатов в слое 25–50 см как в серо-коричневых (каштановых), так и в лугово-сероземных почвах под скудной целинной растительностью не наблюдали.

Содержание водопрочных агрегатов >0.25 мм в целом под промежуточными посевами кормовых культур возрастало в следующем порядке: озимая рожь + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза + + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + + вика (3-й урожай) > ячмень + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (3-й урожай) > люцерна > > эспарцет > люцерна (хозяйственный посев) > > озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай) > ячмень (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай) > целина > кукуруза + соя + сорго + амарант (весенний посев) > кукуруза (весенний посев) > > ячмень (хозяйственный посев).

Достоверность полученных данных содержания “истинных” агрегатов подтверждена статистической обработкой на 5%-ном уровне значимости (табл. 4).

Средняя величина “истинных” водопрочных микроагрегатов с 95%-ным уровнем вероятности в наилучшем варианте (вариант 5) в серо-коричневой (каштановой) почве находилась в доверительном интервале $(33.0 \pm 0.02) - (35.0 \pm 0.1)$, в лугово-сероземной почве — $(32.5 \pm 0.1) - (36.7 \pm 0.0)$.

ВЫВОДЫ

1. В длительных стационарных опытах на орошаемых серо-коричневых и лугово-сероземных почвах сухостепной и полупустынной зон установлен оптимальный вариант промежуточных посевов кормовых культур (озимая рожь + вика + + рапс (1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (3-й урожай)), положительно влиявший на гранулометрический и микроагрегатный состав исследованных генетически различных почв сухой субтропической зоны Азербайджана. В целинном варианте данных почв изменений этих показателей по отношению к исходным данным не наблюдали.

2. Установлено, что орошаемые серо-коричневая (каштановая) и лугово-сероземная почвы в

варианте озимая рожь + вика + рапс (1-й урожай) → → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → → ячмень + вика (3-й урожай) характеризовались более удовлетворительным гранулометрическим составом, количеством “истинных” микроагрегатов (в слое 0–25 см — 34.9 и 33.1%), микроагрегированностью, наименьшим фактором дисперсности (16.9 и 16.2%) и наибольшим количеством водопрочных агрегатов (43.3 и 55.6%). В целинном варианте эти показатели были меньше.

3. Выявлено, что в целинной серо-коричневой (каштановой) (содержание в пахотном слое почвы частиц <0.01 мм — 57.3%) и орошаемой (<0.01 мм — 58.5–59.8%) почвах структурный состав тяжело-суглинистый; в целинной лугово-сероземной почве (<0.01 мм — 56.0%) — тяжелосуглинистый, в орошаемой — на границе тяжелого суглинка (<0.01 мм — 58.1–59.3%) и легкой глины (<0.01 мм — 61.0–61.9%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подарь Л.П., Бессонова А.С. Агрегатный состав почвы // Плодородие и обработка почвы в севообороте. Межвуз. сб. научн. ст. Кишинев СХИ им. М.В. Фрунзе. Кишинев, 1986. С. 114.
2. Синещев В.Е., Слесарев В.Н., Ткаченко Г.И., Дудкина Е.А. Гранулометрический состав и микроагрегатный состав черноземов выщелоченных при минимизации основной обработки // Сибир. вестн. с.-х. науки. 2017. Т. 47. № 1. С. 18–24.
3. Мамедов Р.Г. Агрофизическая характеристика почв Приараксинской полосы. Баку: Изд-во “Элм”, 1970. 320 с.
4. Бабаев М.П., Рамазанова Ф.М. Воспроизводство плодородия орошаемых серо-бурых почв аридной зоны Азербайджана // Научн. электр. период. изд-е ЮФУ “Живые и биокосные системы”. 2017. № 21. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-21/article-4>
5. Рамазанова Ф.М. Влияние промежуточных посевов кормовых культур на агрофизические показатели орошаемых почв сухой субтропической зоны Азербайджана // Рос. сел.-хоз. наука (Докл. РАСХН). 2017. № 4. С. 47–50.
6. Семендяева Н.В., Крупская Т.Н., Карловец Л.А. Влияние севооборотов на гранулометрический и микроагрегатный состав чернозема выщелоченного Новосибирского Приобья в длительных опытах // Агрохимия. 2015. № 1. С. 23–34.
7. Панфилов В.П. Физические свойства и водный режим почв Кулундинской степи. Новосибирск: Наука, 1973. 259 с.
8. Татаринцев В.Л. Структура гранулометрического состава и ее влияние на физическое состояние пахотных почв Алтайского Приобья. Барнаул: АлтайГАУ, 2004. 179 с.
9. Ковда В.А. Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. М.: Наука, 1981. 182 с.

10. *Ramazanova F.M., Babayev M.P.* The Role of the uninterrupted sowings of fodder crops in the current process of soil formation // *Soil Water J. Kyrgyzstan, Bishkek*, 2013. V. 2. № 2(1). P. 943–950.
11. *Роде А.А.* Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука, 1971. 91 с.
12. *Рамзанова Ф.М.* Влияние промежуточных посевов кормовых культур на плодородие орошаемых почв Азербайджана // *Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. Краснообск: СФНЦА РАН*, 2017. № 4. С. 103–109.
13. *Бабаев М.П., Гурбанов Э.А., Рамзанова Ф.М.* Основные виды деградации почв в Кура-Аразской низменности Азербайджана // *Почвоведение*. 2015. № 4. С. 501–512.
14. *Салаев М.Э., Бабаев М.П., Джафарова Ч.М., Гасанов В.Г.* Морфогенетические профили почв Азербайджана. Баку: Изд-во “Элм”, 2004. 202 с.
15. *Бабаев М.П.* Орошаемые почвы Кура-Араксинской низменности и их производительная способность. Баку: Изд-во “Элм”, 1984. 176 с.
16. *Агрофизические методы исследования почв.* М.: Наука, 1966. С. 5–42.
17. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высш. шк., 1973. С. 5–82.
18. *Доспехов В.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
19. *Ramazanova F.M.* Biology of the Irrigated soils under fodder crops in the subtropical region of Azerbaijan // *Inter. Soil Sci. Kongr. “Soil Science in International Year of Soils 2015”*. Eurasian Soil Science Societies, 19–23 october. Sochi-Russia. 2015. P. 352–355.
20. *Баламирзоев М.А., Саидов А.К., Мирзоев Э.М.-Р., Магомедов И.А.* Морфогенез основных типов почв Терско-Сулакской низменности Дагестана // *Вестн. ДагестанНЦ*. 2012. № 46. С. 45–51.
21. *Скрябина О.А., Боталов И.С.* Физические свойства генетически различных почв Юсьвинского района Пермского края // *Пермский аграр. вестн.* 2014. № 4(8). С. 51–56.
22. *Макарычев С.В., Зайкова Н.И.* Агрофизические особенности орошаемых черноземов Правобережья р. Оби // *Вестн. АлтайГАУ*. 2014. № 2(112). С. 40–45.
23. *Минашина Г.Г.* Орошаемые почвы пустынь и их мелиорация. М.: Колос, 1978. 263 с.
24. *Шеин Е.В., Гончаров В.М.* Агрофизика. Ростов/НД.: Изд-во Феникс, 2006. 400 с.
25. *Кауричев М.С., Панов Н.П., Розанов Н.Н.* Почвоведение: уч. пособ. М.: Агропромиздат, 1989. 719 с.
26. *Салаев М.Э.* Почвы Малого Кавказа. Баку: Изд-во АН Азерб.ССР, 1966. 329 с.
27. *Гасанов В.Г.* Состав и сезонные изменения минерализации речных, грунтовых и родниковых вод поймы р. Куры // *Изв. АН Азерб.ССР. Сер. биол. науки*. 1972. С. 65–71.
28. *Рамзанова Ф.М.* Воспроизводство плодородия орошаемых серо-коричневых (каштановых) почв Азербайджана посевами промежуточных культур // *Научный. Журнал. Рос. НИИ проблем мелиорации*. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2018. № 1(29). С. 86–104. <http://www.rosniipm-sm.ru/>
29. *Yong Z.L., Sprycher Y.* Water-dispersible soil organic mineral particles: 1. Carbon and nitrogen distribution // *Soil Sci. Soc. Am.* 1979. V. 43. P. 324–328.

Influence of the Intermediate Sowings of Fodder Crops on Granulometric and Microaggregate Composition Genetically Different Soils in the Arid Subtropical Zone of Azerbaijan

M. P. Babaev^a, F.M. Ramazanov^{a, #}, and E. A. Gurbanov^b

^a The Institute of Soil Science and Agrochemistry, Azerbaijan National Academy of Sciences
Mamed Rahim str. 5, Baku AZ1073, Azerbaijan

^b Azerbaijan University of Architecture and Construction
A. Sultanova str. 5, Baku AZ1073, Azerbaijan

[#]E-mail: firoza.ramazanov@rambler.ru

It is revealed that for the virgin (at the layer 0–25 cm a fraction content <0.01 mm forms – 57.3%) and irrigative (<0.01 mm – 58.4–59.8%) Kastanozems and Irragri Kastanozems soils the mechanical composition is heavy loamy, but for the Gleyic Calcisols – heavy loamy (<0.01 mm – 56.0%) and for the Irragri Gleyic Calcisols – in limit of heavy loamy (<0.01 mm – 58.1–59.6%) and light clay (<0.01 mm – 60.0%). It is revealed that under an influence of the irrigation and plant interseeding on both types of the soil, after long experiments happened enleaching of the silt fraction and its accumulation at the layer 25–50 cm. This accumulation is noticeable under a variant of winter rye + vetch + rape (harvest 1) → corn + soybean + sorghum + + amaranth (harvest 2) → barley + vetch (harvest 3). The dispersion coefficient at the layer 0–25 cm of soil of the given variant – the lowest (for Irragri Kastanozems – 16.9%, Irragri Gleyic Calcisols – 16.2%), but a quantity of the waterstable aggregates <0.25 mm under this variant is higher than under virgin vegetation on the corresponding virgin soils.

Key words: gleyic calcisols and kastanozems soils, intermediate sowings, granulometric and microaggregate composition.

УДК 631.417.1:631.51.011(571.51)

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ В УСЛОВИЯХ МИНИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ В КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

© 2020 г. А. А. Белоусов^{1,*}, Е. Н. Белоусова¹

¹ Красноярский государственный аграрный университет
660049 Красноярск, ул. Елены Стасовой, 44, Россия

*E-mail: svoboda57130@mail.ru

Поступила в редакцию 23.06.2019 г.

После доработки 15.09.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Исследовали влияние отвального способа обработки почвы и поверхностного дискования на содержание органического углерода и его подвижных компонентов в черноземах выщелоченных и обыкновенных. Использование минимальной обработки на протяжении 9-ти лет способствовало достоверной разнице между сравниваемыми слоями по содержанию $C_{\text{орг}}$ с максимумами в поверхностном слое. Отвальная вспашка достоверно стимулировала образование подвижных форм органических соединений в сравнении с поверхностной обработкой. Содержание подвижного органического вещества в почве, обработанной отвальным способом и дисковыми орудиями, достоверно различалось.

Ключевые слова: органический углерод, подвижные органические соединения, микробная биомасса, почвозащитные технологии

DOI: 10.31857/S0002188120030059

ВВЕДЕНИЕ

Роль органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в почве, растениях и в агроэкосфере не менее важная, а может, даже более существенная, чем элементов, традиционно рассматриваемых агрохимией, а поддержание сбалансированного круговорота углерода является базовым условием стабильности агроэкосистем и ключевым принципом устойчивого земледелия [1]. Подвижная фракция органического углерода выполняет одну из основных функций в формировании эффективного плодородия и быстро реагирует на изменения в системе земледелия в целом, так и при смене способа основной обработки почвы. Поэтому подвижное органическое вещество (ПОВ) является индикатором происходящих перемен в содержании органического углерода в почве. Содержание микробной биомассы и ее доля от органического углерода почвы ($C_{\text{мб}}/C_{\text{орг}}$) также являются значимыми параметрами, диагностирующими трансформации, происходящие в почвенном органическом веществе.

В современном земледелии Красноярского региона доля почвозащитных технологий в последнее десятилетие повышается. Информации о динамике ПОВ и экофизиологическом показателе

$C_{\text{мб}}/C_{\text{орг}}$ при использовании этих воздействий пока еще недостаточно. Часто она противоречива, носит не системный характер. Научная проблема исследования – сокращение в агропочвах подвижного органического вещества, обусловленная их выпаханностью вследствие использования экстенсивных систем земледелия.

Цель работы – оценка содержания органического углерода и его подвижных компонентов в почве, обрабатываемой отвальным способом и с использованием поверхностного дискования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент в Красноярском природном округе на земельных площадях СПК “Шилинское” Сухобузимского р-на (56° с.ш., 93° в.д.). Изучение влияния способов обработки почвы на трансформацию углеродсодержащих соединений осуществляли в 2014–2015 гг. на базе длительного опыта, заложенного в 2005 г. И.А. Куприным и Л.Р. Мукиной. Почвенный покров опытного стационара характеризовался преобладанием комплекса старопашотных черноземов выщелоченных и обыкновенных тяжелосуглинистого грану-

Таблица 1. Метеорологические показатели в годы наблюдений

Год	Месяц					Сумма за вегетацию
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
Средняя температура воздуха, °С						
2014 г.	6.8	16.0	19.2	15.9	6.5	1565
2015 г.	10.9	17.0	19.9	16.5	8.4	1535
Норма (1980—2010 гг.)	8.7	15.5	18.3	14.9	8.3	1627
Осадки, мм						
2014 г.	54	50	89	75	32	301
2015 г.	31	33	68	63	73	268
Норма (1980—2010 гг.)	35	47	64	59	42	247

лометрического состава. Это почвы с высоким содержанием органического углерода (5.2%), близкой к нейтральной величине pH_{H_2O} 6.8, с высоким содержанием суммы обменных оснований (60 ммоль/100 г почвы) и степенью насыщенности основаниями 99%.

В пределах производственных посевов были выделены опытные участки (варианты) с учетной площадью делянок 360 м². Отвальная основная обработка (вариант 1) состояла из зяблевой вспашки на глубину 20–22 см. Посев яровой пшеницы в 2014–2015 гг. проводили комбинированным агрегатом – стерневой сеялкой СС-6 с одновременным припосевным внесением НАФК. Поверхностную обработку дисковыми орудиями (вариант 2) осуществляли СКС-3.2. С помощью дисковых горизонтальных сошников посевного комплекса проводили обработку почвы на глубину 4–5 см и посев зерновых культур с одновременным внесением НАФК в дозе N25P12K12 с соотношением 21:10:10. В 2014 г. выращивали яровую пшеницу сорта Тулунская-12, в 2015 г. – озимое тритикале сорта Житница. В каждом варианте трижды за вегетационный сезон рандомизированным методом отбирали почвенные образцы из слоев 0–5 (надсеменной) и 5–20 см (подсеменной). Объем выборки ($n = 15$) рассчитывали, исходя из определенной до проведения опыта величины варьирования почвенного плодородия. Период действия изученных технологий к началу наших наблюдений составил 9 лет.

Химические и физико-химические показатели определяли общепринятыми методами [2]. В подготовленных образцах определяли органический углерод по Тюрину ($C_{орг}$), 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 водораствори-

мого органического вещества (C_{H_2O}) определяли по Тюрину, щелочнорастворимого углерода ($C_{0.1 н. NaOH}$) – по Тюрину в модификации Пономаревой–Плотниковой [3]. Углерод микробной биомассы устанавливали путем пересчета скорости субстрат-индуцированного дыхания по формуле: $C_{мб}$ (мкг С/г) = (мкл CO₂/г почвы/ч) × 40.04 + 0.37 [4]. Статистический анализ данных проводили с использованием пакета программ MS Excel.

Агрометеорологические условия района наблюдений характеризовались следующими показателями (табл. 1). На протяжении большинства месяцев теплого периода 2014 г. уровень увлажнения превышал средние многолетние показатели. Максимальное количество осадков выпало в июле (89 мм). Особенностью теплового режима стали прохладные май и сентябрь, тогда как среднемесячные температуры летних месяцев были выше нормы. Такое сочетание тепла и влаги обусловило достаточное увлажнение в течение периода вегетации полевых культур. Согласно Г.Т. Селянинову, величина ГТК за июнь–август составила 1.3. Начало вегетационного периода 2015 г. характеризовалось более высокими температурами в сравнении с предшествующим сезоном и далее к осени среднемесячные температуры превышали параметры 2014 г. Количество выпавших осадков, напротив, существенно уступало показателям прошлого года. Величина ГТК за период активной вегетации составила 1.0. Таким образом, условия вегетационного периода 2015 г. оценивали, как более засушливые в сравнении с сезоном 2014 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика содержания органического углерода. Преобразования органического вещества (углерода) в сезонном цикле определяют направлен-

Таблица 2. Содержание и динамика $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{мб}}/C_{\text{орг}}$ в черноземе выщелоченном ($n = 15$), %

Вариант	Сроки взятия проб	Слой, см	$x^- \pm ts_x$	$C_{\text{мб}}/C_{\text{орг}}$	$x^- \pm ts_x$	$C_{\text{мб}}/C_{\text{орг}}$
			2014 г.		2015 г.	
1. Отвальная вспашка	Июнь	0–5	5.12 ± 0.23	3.5	5.12 ± 0.23	2.0
		5–20	5.09 ± 0.25	4.2	5.00 ± 0.29	2.8
	Июль	0–5	3.67 ± 0.31	4.5	4.16 ± 0.31	3.6
		5–20	4.17 ± 0.15	5.5	4.02 ± 0.34	4.3
	Сентябрь	0–5	4.61 ± 0.30	1.3	4.80 ± 0.30	3.0
		5–20	4.66 ± 0.28	1.6	4.54 ± 0.24	3.6
2. Поверхностная обработка	Июнь	0–5	4.15 ± 0.27	3.0	4.44 ± 0.26	3.5
		5–20	3.95 ± 0.35	4.5	4.05 ± 0.17	4.2
	Июль	0–5	4.13 ± 0.19	3.9	4.68 ± 0.28	3.2
		5–20	4.23 ± 0.25	2.3	4.47 ± 0.21	3.8
	Сентябрь	0–5	4.36 ± 0.17	3.1	4.37 ± 0.20	4.9
		5–20	3.89 ± 0.25	1.7	3.90 ± 0.26	4.9

Примечание. $\pm ts_x$ – доверительная погрешность выборочного среднего. То же в табл. 6.

ность его трансформации, а концентрация $C_{\text{орг}}$ в определенный период развития сельскохозяйственных культур во многом влияет на процесс питания растений [1]. Внутрисезонная динамика изменений органического углерода почвы при использовании отвальной обработки обнаруживала достоверные минимумы в середине вегетационного сезона (табл. 2). Вероятно, в ходе вегетации яровой пшеницы от весны к периоду уборки в двадцатисантиметровом слое складывались гетерогенные условия для аккумуляции органического углерода. До прохождения растениями яровой пшеницы фазы кушения количество органического вещества почвы было “законсервировано” на уровне осени прошедшего года.

Благоприятные условия для функционирования почвенной биоты определили интенсивный процесс деструкции органических соединений, приведший к значительному сокращению $C_{\text{орг}}$ в период июля. Далее продукционный процесс яровой пшеницы содействовал пополнению почвы органическим углеродом за счет новых порций мортмассы, детрита и корневых выделений. Коэффициент $C_{\text{мб}}/C_{\text{орг}}$ демонстрировал высокую степень иммобилизации углерода органического вещества микробной биомассой почвы, свидетельствуя о преобладании процесса анаболизма.

Напротив, на фоне использования дисковых орудий наблюдали сохранение стерни, что препятствовало быстрому прогреванию почвы и сдерживало активность микрофлоры. Поэтому трансформация органических веществ проходила с опозданием. Характер их внутрисезонной дина-

мики в этом случае оценивался как более стабильный (табл. 3).

В связи с многообразием причин, влияющих на вектор превращений органических компонентов почвы, определен вклад изученных условий в вариабельность содержания $C_{\text{орг}}$. Наибольшее воздействие на изменчивость органического уг-

Таблица 3. Статистическая значимость внутрисезонной динамики содержания $C_{\text{орг}}$ в черноземах

Вариант	Сроки взятия проб	0–5 см	5–20 см
2014 г.			
1. Отвальная вспашка	Июнь (1)	$t_1 t_2 > t_{05}$	$t_1 t_2 > t_{05}$
	Июль (2)	$t_1 t_3 > t_{05}$	$t_1 t_3 > t_{05}$
	Сентябрь (3)	$t_2 t_3 > t_{05}$	$t_2 t_3 > t_{05}$
2. Минимальная обработка	Июнь (1)	$t_1 t_2 < t_{05}$	$t_1 t_2 < t_{05}$
	Июль (2)	$t_1 t_3 < t_{05}$	$t_1 t_3 < t_{05}$
	Сентябрь (3)	$t_2 t_3 > t_{05}$	$t_2 t_3 < t_{05}$
2015 г.			
1. Вспашка	Июнь (1)	$t_1 t_2 > t_{05}$	$t_1 t_2 > t_{05}$
	Июль (2)	$t_1 t_3 < t_{05}$	$t_1 t_3 < t_{05}$
	Сентябрь (3)	$t_2 t_3 > t_{05}$	$t_2 t_3 > t_{05}$
2. Минимальная обработка	Июнь (1)	$t_1 t_2 < t_{05}$	$t_1 t_2 > t_{05}$
	Июль (2)	$t_1 t_3 < t_{05}$	$t_1 t_3 < t_{05}$
	Сентябрь (3)	$t_2 t_3 < t_{05}$	$t_2 t_3 > t_{05}$

Примечание. (1), (2), (3) – сравниваемые сроки. То же в табл. 8.

Таблица 4. Оценка вклада факторов в изменение содержания органического углерода (двухфакторный анализ ANOVA)

Фактор	Вклад, %			
	2014 г.		2015 г.	
	0–5 см	5–20 см	0–5 см	5–20 см
Вариант обработки почвы	4	23	3	10
Сроки взятия проб	28	6	7	6
Взаимодействие сроков и способов обработки	21	18	21	25
Не учитываемые в опыте факторы	47	53	69	59

Таблица 5. Достоверность различий содержания $C_{орг}$ в слоях 0–5 и 5–20 см ($t_{05} = 2.1$), %

Вариант	Июнь		Июль		Сентябрь	
	$t_{\text{факт}}$	$C_{\text{орг}}$	$t_{\text{факт}}$	$C_{\text{орг}}$	$t_{\text{факт}}$	$C_{\text{орг}}$
2014 г.						
1. Отвальная вспашка	0.4	<u>5.12</u>	−3.2	<u>3.65</u>	−0.5	<u>4.61</u>
		5.09		4.10		4.66
2. Минимальная обработка	2.2	<u>4.19</u>	−0.9	<u>4.13</u>	5.6	<u>4.36</u>
		3.97		4.23		3.89
2015 г.						
1. Отвальная вспашка	0.7	<u>5.12</u>	1.8	<u>4.15</u>	1.7	<u>4.80</u>
		5.00		4.02		4.54
2. Минимальная обработка	2.7	<u>4.44</u>	2.3	<u>4.68</u>	5.4	<u>4.37</u>
		4.05		4.47		3.91

Примечания. 1. $t_{факт}$ – t -критерий Стьюдента (фактическая величина). 2. Над чертой – слой 0–5 см, под чертой – слой 5–20 см. То же в табл. 9.

лерода оказывали “не учитываемые в опыте факторы”, что доказывало сложность и комплексность системы органических соединений почвы (табл. 4).

Весьма заметный вклад вносил фактор “взаимодействие”, подтверждая существенность совместного влияния динамических изменений агрометеорологических условий и параметров, определяемых технологией обработки почвы. Тогда как в отдельности эти факторы не обнаруживали достоверного воздействия.

Изменения содержания $C_{орг}$ в слоях почвы. Применение различных технологий обработки почвы сопровождалось преобразованиями пахотного слоя. Исследования свидетельствуют о диффе-

ренциации пахотного слоя почвы по плодородию [5–7]. Многолетний период использования почвозащитной технологии значимо повлиял на разделение сравниваемых слоев почвы по содержанию в них органического углерода (табл. 5). В течение сезона 2014 г. существенные различия между слоями по содержанию $C_{орг}$ при отвальном перемешивании почвы были только в середине сезона. Причем преимущественное содержание $C_{орг}$ при данном виде обработки отмечено в слое 5–20 см, свидетельствуя о способности подсеменного слоя аккумулировать достаточно высокие количества органического углерода. Это могло указывать на благоприятное сочетание условий для стабилизации углерода в микроразонах анализируемого почвенного слоя.

При поверхностной обработке почвы наблюдали обратную зависимость. Максимальное содержание $C_{орг}$ в этом варианте обработки отметили в слое 0–5 см по отношению к нижележащему слою в июне и в сентябре. Следует отметить, что большая разница в содержании $C_{орг}$ в слоях 0–5 и 5–20 см выявлена в сентябре, причем в этом месяце содержание $C_{орг}$ в слое 0–5 см было максимальным за весь анализируемый период. По-видимому, в отсутствие оборота пласта основной объем мортмассы и детрита сосредоточился в надсеменном слое и участвовал в пополнении пула органического углерода.

Следующий сезон, в отличие от предыдущего, в варианте отвальной обработки почвы не выявил достоверных различий в содержании $C_{орг}$ между сравниваемыми слоями. Поверхностная обработка почвы определила существенные различия, как и в 2014 г, с максимумом содержания $C_{орг}$ в надсеменном слое по отношению к нижележащему.

Внутрисезонная динамика подвижного органического вещества. Содержание подвижных органических соединений зависит от запасов органического вещества в почве и может быть подвержено изменениям. Их сезонная изменчивость определяется неодинаковой скоростью отмирания, поступления и разложения растительных остатков, в том числе различной интенсивностью их трансформации в новообразованные гумусовые вещества [8]. Используемые в опыте технологии обработки почвы обусловили значимые различия в концентрации и динамике подвижных соединений углерода в вегетационных сезонах 2014–2015 гг. (табл. 6).

Показано, что многолетняя отвальная вспашка достоверно стимулировала образование подвижных форм органических соединений в сравнении с поверхностной обработкой в течение 2-х лет на-

Таблица 6. Статистические параметры содержания и динамики фракции $C_{0.1 \text{ н. NaOH}}$ в черноземе выщелоченном, %

Вариант	Срок взятия проб	Слой, см	$x^- \pm ts_x$	$V, \%^*$	$x^- \pm ts_x$	$V, \%^*$
			2014 г.		2015 г.	
1. Отвальная вспашка	Июнь	0–5	0.72 ± 0.03	17	0.52 ± 0.04	14
		5–20	0.67 ± 0.03	18	0.49 ± 0.07	14
	Июль	0–5	0.51 ± 0.03	22	0.55 ± 0.11	36
		5–20	0.44 ± 0.03	24	0.44 ± 0.08	33
	Сентябрь	0–5	0.49 ± 0.03	25	0.59 ± 0.02	7
		5–20	0.40 ± 0.02	23	0.53 ± 0.02	8
2. Минимальная обработка	Июнь	0–5	0.53 ± 0.03	20	0.50 ± 0.05	18
		5–20	0.51 ± 0.03	18	0.50 ± 0.06	21
	Июль	0–5	0.57 ± 0.03	20	0.30 ± 0.05	30
		5–20	0.49 ± 0.02	18	0.43 ± 0.06	27
	Сентябрь	0–5	0.67 ± 0.03	20	0.51 ± 0.03	11
		5–20	0.55 ± 0.03	24	0.55 ± 0.08	24

* $V, \%$ – коэффициент вариации.

Таблица 7. Доля подвижного органического вещества ($C_{0.1 \text{ н. NaOH}} / C_{\text{орг}}$), %

Вариант	Июнь		Июль		Сентябрь	
	0–5 см	5–20 см	0–5 см	5–20 см	0–5 см	5–20 см
2014 г.						
1. Отвальная вспашка	14	13	12	11	13	10
2. Минимальная обработка	12	11	13	11	15	12
2015 г.						
1. Отвальная вспашка	9	10	13	11	12	11
2. Минимальная обработка	11	12	9	11	11	11

блюдений. Информация о доле щелочнорастворимого углерода в составе $C_{\text{орг}}$ также свидетельствовала о наибольшей степени его подвижности в начале сезона 2014 г. при использовании отвальной вспашки (табл. 7). Вероятно, это явление определяли перемешивание почвы, увеличение аэрации и, как следствие, усиление минерализационных процессов. Кроме того, повышение количества новообразованных органических соединений совпадало с максимумом продукционного процесса колосовых культур. К периоду их созревания подвижность соединений, переходящих в вытяжку $C_{0.1 \text{ н. NaOH}}$ ослабевала. Уплотнение почвы и смена условий тепло- и влагообеспеченности обусловили сокращение фонда подвижных соединений.

В целом, степень подвижности органических соединений в почве сравниваемых вариантов оценили как низкую, тогда как, по данным [9] для черноземов земледельческой территории Крас-

ноярского края, доля $C_{0.1 \text{ н. NaOH}}$ от $C_{\text{орг}}$ варьировала в интервале 18–20%. Это было связано с насыщенностью исследованных агроценозов злаковыми культурами. Обогащение их растительных тканей трудногидролизуемыми соединениями и широкое соотношение $C : N$ обеспечивали слабую деструкционную способность органических компонентов старопахотных черноземов.

Динамика содержания подвижных соединений, переходящих в щелочной экстракт, была статистически достоверной, однако векторы этих изменений в течение периода наблюдений различались (табл. 8). Например, оборот пласта вызывал достоверное уменьшение фракции $C_{0.1 \text{ н. NaOH}}$ от июня к окончанию вегетационного периода, свидетельствуя о преобладании минерализации. Тренд на их снижение свидетельствовал о биодоступности органических соединений при обороте пласта почвы. Более того, посевы в этом варианте были изреженными, что, вероятно, усиливало

Таблица 8. Статистическая значимость внутрисезонной динамики содержания фракции $C_{0,1 \text{ н. NaOH}}$

Вариант	Сроки взятия проб	$t_{\text{факт}}$	
		0—5 см	5—20 см
	2014 г.		
1. Отвальная вспашка	Июнь	$t_{12} > t_{05}$	$t_{12} > t_{05}$
	Июль	$t_{13} > t_{05}$	$t_{13} > t_{05}$
	Сентябрь	$t_{23} < t_{05}$	$t_{23} > t_{05}$
2. Минимальная обработка	Июнь	$t_{12} < t_{05}$	$t_{12} < t_{05}$
	Июль	$t_{13} > t_{05}$	$t_{13} < t_{05}$
	Сентябрь	$t_{23} > t_{05}$	$t_{23} > t_{05}$
2015 г.			
1. Отвальная вспашка	Июнь	$t_{12} < t_{05}$	$t_{12} < t_{05}$
	Июль	$t_{13} > t_{05}$	$t_{13} > t_{05}$
	Сентябрь	$t_{23} > t_{05}$	$t_{23} > t_{05}$
2. Минимальная обработка	Июнь	$t_{12} > t_{05}$	$t_{12} < t_{05}$
	Июль	$t_{13} > t_{05}$	$t_{13} > t_{05}$
	Сентябрь	$t_{23} > t_{05}$	$t_{23} > t_{05}$

Таблица 9. Достоверность различий содержания фракции $C_{0,1 \text{ н. NaOH}}$ (%) в сравниваемых слоях ($t_{05} = 2.1$)

Вариант	Июнь		Июль		Сентябрь	
	$t_{\text{факт}}$	$C_{\text{орг}}$	$t_{\text{факт}}$	$C_{\text{орг}}$	$t_{\text{факт}}$	$C_{\text{орг}}$
	2014 г.					
1. Отвальная вспашка	1.6	<u>0.72</u> 0.67	5.1	<u>0.51</u> 0.44	8.1	<u>0.49</u> 0.40
2. Минимальная обработка	0.0	<u>0.53</u> 0.51	4.4	<u>0.57</u> 0.49	1.4	<u>0.66</u> 0.55
2015 г.						
1. Отвальная вспашка	2.0	<u>0.52</u> 0.49	2.8	<u>0.55</u> 0.45	4.1	<u>0.59</u> 0.53
2. Минимальная обработка	0.6	<u>0.50</u> 0.50	2.3	<u>0.27</u> 0.43	5.8	<u>0.49</u> 0.55

приход солнечной радиации и увеличивало температуру почвы.

Напротив, существенное сокращение глубины обработки сопровождалось ослаблением процессов разложения и накоплением подвижного органического вещества к окончанию вегетационного сезона. Экспериментальные данные свидетельствовали о положительной роли минимизации поверхностных обработок в формировании пула подвижного органического вещества. Во-первых, минимальное механическое воздействие на почву

повышало физическую защищенность органических соединений, их ограниченную доступность для микроорганизмов и кислорода почвенного воздуха. Во-вторых, состояние посевов яровой пшеницы, возделываемой по минимальной технологии, отличалось густым и замкнутым стеблестоем и не инициировало процессы минерализации.

Исследование пространственной изменчивости содержания фракции $C_{0,1 \text{ н. NaOH}}$ выявило его высокий уровень в изученных вариантах. Причиной этого процесса была объективная закономерность, связанная с проявлением мозаичности биохимических процессов, обусловленных неравномерностью поступления и трансформации растительного материала в почве.

Вегетационный сезон 2015 г. отличался иным ходом динамики содержания подвижного органического вещества (табл. 8). Под влиянием отвальной вспашки в слое 0–20 см почвы зафиксировано достоверное увеличение содержания щелочнорастворимых гумусовых соединений к осеннему периоду. Также отмечено и некоторое увеличение степени их мобильности. Противоположный характер трансформации подвижного органического вещества, вероятно, был обусловлен иным уровнем атмосферного увлажнения второй половины лета и осени 2015 г.

Сокращение глубины механического воздействия на почву вызывало в слое 0–20 см почвы существенное снижение содержания гумусовых веществ, перешедших в щелочную вытяжку к середине лета, а затем довольно значимый рост их количества к осени. Наблюдаемое свидетельствовало о возможной стабилизации органических соединений в ходе структурообразования и замедления минерализационных процессов.

В варианте с отвальной вспашкой в июле–сентябре 2014–2015 гг. содержание щелочнорастворимого углерода в поверхностном слое 0–5 см по сравнению с нижележащим слоем было достоверно больше (табл. 9). В период максимальных среднесуточных температур воздуха (июнь) между сравниваемыми слоями существенных различий не выявлено.

Применение поверхностной обработки обнаружало достоверные различия содержания щелочнорастворимого углерода только в июле. При этом сохранялась тенденция к доминированию содержания щелочнорастворимого углерода в слое 0–5 см. Вероятно, процесс новообразования почвенного органического вещества в почве этого варианта совершался с большей интенсивностью благодаря оптимальным гидротермическим условиям.

Содержание щелочнорастворимого углерода в почве в 2015 г. достоверно различалось во всех вариантах обработки в период июль–сентябрь. При отвальной вспашке в слое 0–5 см содержание щелочнорастворимого углерода статистически значимо было больше, чем в почве нижележащего слоя. При минимальной обработке отмечена обратная закономерность — превышение содержания фракции щелочнорастворимого углерода в слое 5–20 см по сравнению со слоем 0–5 см.

В.В. Пономарева [10] отмечала, что корни верхнего слоя 0–10 см должны быть интенсивными продуцентами водорастворимых корневых выделений, а они имеют возможность в какой-то степени “растекаться” по всему почвенному профилю.

При отвальной вспашке достоверные различия наблюдали в июле, при этом в слое 0–5 см выявлено превышение содержания фракции щелочнорастворимого углерода по сравнению с нижележащим слоем. Это было обусловлено замедлением процесса гумификации в слое 5–20 см вследствие недостатка элементов, способствующих этому процессу.

ВЫВОДЫ

1. При отвальном способе обработки почвы отмечена более отчетливая внутрисезонная динамика содержания органического углерода почвы. Фактор обработки оказывал существенное влияние на изменение содержания органического углерода в черноземе выщелоченном.

2. Отвальная технология обработки почвы не вызывала существенную дифференциацию пахотного слоя, а в отдельные периоды вегетации колосовых культур способствовала накоплению значимых количеств $C_{орг}$ в слое 5–20 см относительно верхнего слоя 0–5 см. При минимальной обработке, напротив, отмечена достоверная раз-

ница между сравниваемыми слоями по содержанию $C_{орг}$ с максимумом в верхнем слое 0–5 см.

3. Примененные в опыте технологии основной обработки почвы определили значимые различия в содержании и динамике подвижных соединений углерода. Пространственное варьирование содержания подвижных форм органических соединений оценили как высокое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3–12.
2. Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
3. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах. Л.: Наука, 1975. 105 с.
4. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
5. Холзаков В.М. О дифференциации пахотного слоя по плодородию при разных системах обработки почвы // Всерос. научн.-практ. конф., посвящ. памяти уральских ученых. Сб. науч. тр. Екатеринбург, 2001. Т. 1. С. 94–104.
6. Коржов С.И., Трофимова Т.А., Маслов В.А. Дифференциация пахотного слоя по плодородию в зависимости от приемов основной обработки почвы // Усп. совр. науки. 2016. Т. 1. № 2. С. 13–16.
7. Манторова Г.Ф., Зайкова Л.А. Эффективное плодородие частей пахотного слоя почвы // Аграр. Россия. 2014. № 11. С. 7–10.
8. Чупрова В.В. Запасы, состав и трансформация органического вещества в агропочвах Средней Сибири // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 96–115.
9. Чупрова В.В. Состояние и функционирование черноземов Средней Сибири // Почвы Сибири: Особенности функционирования и использования: Сб. научн. ст. Красноярск, 2003. С. 11–14.
10. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 1980. 221 с.

Dynamics of the Content of Organic Matter of Chernozems in Conditions of Minimization of Processing in Krasnoyarsk Forest-Steppe

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

^aKrasnoyarsk State Agrarian University, ul. Eleny Stasovoy 44, Krasnoyarsk 660049, Russia

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

The influence of the moldboard plowing of soil treatment and surface disking on the content of organic carbon and its mobile components was investigated. The use of minimum processing for nine years contributed to a significant difference between the compared layers of organic carbon content with the maximum in the surface layer. Moldboard plowing significantly stimulated the formation of mobile forms of organic compounds in comparison with surface treatment. The content of mobile organic matter in the soil treated by the dump method and disk tools was estimated at one level.

Key words: organic carbon, mobile organic matter, microbial biomass, soil protection technologies.

УДК 633.52:631.82

ВЫРАЩИВАНИЕ САЛАТА ЛИСТОВОГО (*Lactuca sativa* L.) СОРТА АФИЦИОН НА БЕЗНИТРАТНОМ ЦЕОЛИТНОМ СУБСТРАТЕ

© 2020 г. В. С. Солдатов^{1,*}, С. Ю. Косандрович¹, О. В. Ионов¹,
А. П. Езубец¹, Н. В. Вонсович¹

¹ Институт физико-органической химии НАН Беларуси
220072 Минск, ул. Сурганова, 13, Республика Беларусь

*E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 22.04.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Новый безнитратный субстрат цион-100 был испытан в лабораторных условиях в вазонных экспериментах (50 мл) на плодородие и содержание нитратов в биомассе листьев салата листового (*Lactuca sativa* L.) сорта Афицион. Субстрат содержал все необходимые для растений питательные элементы в высокой концентрации и не содержал органических веществ и нитратов. Весь азот в субстрате содержался в аммонийной форме. Растения выращивали на 100%-ном субстрате и его смесях (5–50%) с бесплодным кварцевым песком. При самой низкой концентрации субстрата в песке они генерировали 2.5 г зеленой биомассы/г субстрата с концентрацией хлорофилла 2.3–3.3 мг/г и NO_3^- – 70–210 мг/кг, что было на порядок меньше разрешенной санитарной нормы для растений, использованных в эксперименте. Потребление азота составило 50% от его содержания в свежем субстрате. Подкормки удобрениями в процессе вегетации не проводили.

Ключевые слова: салат листовой (*Lactuca sativa* L.), сорт Афицион, безнитратный цеолитный субстрат.

DOI: 10.31857/S0002188120030138

ВВЕДЕНИЕ

Проблема получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур с низким содержанием нитратов без применения фитогормонов и других химических средств воздействия на физиологические процессы в растениях является одной из основных при получении гарантированно безопасной для человека и животных сельскохозяйственной продукции. Это важнейший элемент так называемого органического сельского хозяйства – перспективного нового направления растениеводства.

Такую возможность открывают разработанные цеолитные субстраты [1], которые содержат полный комплект необходимых растению биогенных элементов в виде ионов, сорбированных природным цеолитом – клиноптилолитом и труднорастворимыми природными или синтетическими неорганическими минералами. Предпосылкой для использования таких питательных сред является высокая концентрация питательных веществ в субстратах в сочетании с безопасной для растений концентрацией равновесных

растворов и отсутствием в них нитратов. Весь азот в них находится в аммонийной форме.

В настоящее время эти субстраты практически не исследованы в процессах выращивания растений, т.к. их опытное производство делает лишь первые шаги. Среди известных аналогов можно назвать только субстраты типа биона на основе органических ионитов или их смесей с клиноптилолитом [2, 3]. Однако они не соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям, запрещающим введение полимерных ионитов в почвы.

Целью работы – испытание одного из цеолитных субстратов (рабочее название цион-100) на принципиальную возможность выращивания на нем салата листового (*Lactuca sativa* L.) сорта Афицион.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Субстрат цион-100 получали на основе природного клиноптилолита Холинского месторождения (РФ, Забайкальская группа). Доля основного минерала в природном цеолите составляла ≈70%,

Таблица 1. Состав цеолита Холинского месторождения

Химический состав		Элементный состав		Содержание токсичных элементов	
компонент	среднее содержание компонента, %	элемент	среднее содержание элемента, $n \times 10^{-3}\%$	элемент	массовая доля, $n \times 10^{-4}, \%$
SiO ₂	65.6	Co	0.956	Pb	15 ± 2
P ₂ O ₅	0.004	Cr	5.18	Cd	0.26 ± 0.02
Al ₂ O ₃	12.2	Cu	191	As	3.5 ± 0.5
TiO ₂	0.07	Fe	8370	Hg	0.020 ± 0.003
Fe ₂ O ₃	1.25	Mg	10800	Sr	0.0041 ± 0.0003
FeO	0.06	Mn	3674		
CaO	2.07	Mo	101		
MgO	0.64	Ni	38.7		
Na ₂ O	1.90	P	2.36		
K ₂ O	4.14	Zn	105		
S _{общ}	0.016				
MnO	0.14				
H ₂ O	3.82				

Таблица 2. Содержание подвижных ионов в субстрате цион при pH = 7.0 и их концентрация в водных вытяжках

Ион	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻
Содержание в субстрате, мэкв/100 г	37	25	12	1.8	29	<0.01	<0.01	<0.003	7.6*
Содержание в субстрате, мг/100 г	666	975	276	21.6	580	<0.50	<0.50	<0.20	722
Концентрация в вытяжке дистиллированной водой, мэкв/л	4.92	1.50	3.33	0.31	0.83	0.85	0.16	0	5.98**
Концентрация в вытяжке водопроводной водой, мэкв/л	5.35	1.62	3.97	0.48	1.06	1.59	0.65	0.10	4.73**
Концентрация в поливной (водопроводной) воде мэкв/л	<0.03	<0.01	0.50	1.34	3.19	0.76	0.54	0.18	<0.003

* ммоль/100 г.

** ммоль/л.

его состав приведен в табл. 1 [4, 5]. Минерал содержит ничтожно мало фосфора и отсутствует бор. В нем не содержатся в опасных концентрациях токсичные элементы.

Субстрат цион-100 на 98% состоит из клиноптилолита, модифицированного введением в него ионов питательных элементов и корректирующих добавок малорастворимых природных минералов фосфора или компонентов минеральных удобрений. Дополнительное внесение микроэлементов может быть сделано в соответствии с потребностью выращиваемых культур общепринятыми способами [6, 7]. В нашем случае в этом не

было необходимости. Состав подвижных ионов в субстрате приведен в табл. 2.

Цион образует при контакте с водой питательный раствор с концентрацией и соотношением ионов, близкими к оптимальным [8], что исключает возможность передозировки удобрений в субстратном растворе и допускает возможность прямого контакта частиц субстрата с корнем растения. Состав вытяжек циона дистиллированной и поливной (водопроводной) водой, приведен в табл. 2. Состав воды, применяемой для полива, отвечает стандартам питьевой воды и близок к средневропейскому. Другие свойства субстрата: на 50% он состоит из частиц размером 2–4 мм,

Таблица 3. Состав равновесных растворов над субстратом цион в поливной воде

N : K	pH	УЭП, μS	[C], мэкв/л								
			NH_4^+	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	H_2PO_4^-
3:1	7.0	882	5.19	1.53	3.78	0.43	0.98	1.48	0.58	0.10	4.26
3:1	6.0	838	4.27	1.42	4.05	0.50	1.66	1.41	0.59	0.11	7.50
3:1	5.0	838	3.34	1.30	4.29	0.52	2.62	1.40	0.62	0.13	10.2
2:1	5.0	817	3.07	1.47	4.19	0.52	2.57	1.37	0.56	0.11	10.3
4:1	6.0	857	4.57	1.31	4.02	0.47	1.72	1.34	0.56	0.10	8.22
5:1	6.0	846	4.66	1.24	4.07	0.48	1.82	1.43	0.57	0.09	8.98
4:1	7.0	875	5.49	1.35	3.74	0.41	0.91	1.30	0.53	0.08	4.84
5:1	7.0	864	5.55	1.27	3.68	0.41	0.90	1.24	0.54	0.08	4.63
6:1	7.0	865	6.00	1.25	3.85	0.41	1.03	1.28	0.56	0.07	4.85

38% — размером 0.5–2.0 мм и 12% <0.5 мм, pH 5.0–7.0, удельная электропроводность (УЭП) — 560–750 μS (в экстрактах дистиллированной водой).

Субстрат может быть получен с любым заданным соотношением количеств подвижных ионов и актуальной кислотностью. В настоящей работе его использовали в 100%-ном виде и в виде добавки к бесплодному песку. Кварцевый песок перед использованием обрабатывали 2 М раствором соляной кислоты для отмывки от карбонатов и оксидов, присутствующих в исходном материале.

При изготовлении субстратов и их использовании в биологических экспериментах контроль параметров производили с помощью следующих приборов: pH-метра HANNA 213 (измерение величины pH), кондуктометра HANNA EC214, (измерение удельной электропроводности — УЭП), прибора капиллярного электрофореза “Капель 104-Т” (определение концентрации растворов макроэлементов), и ИСР-спектрометра (определение концентрации ионов Al^{3+} и Fe^{3+}), нитрат-селективного электрода ЭМ- NO_3 -07СР с иономером И-160МП (определение концентрации NO_3^-).

Субстраты, использованные в биологическом эксперименте, различались исходной актуальной кислотностью и соотношением концентраций аммония и калия (N : K). Состав макроионов в равновесных растворах над субстратом цион с различными номинальными pH и соотношениями N : K в субстрате представлен в табл. 3. Фактические величины pH могли отличаться от номинальных не более чем на 0.2.

В качестве тест-культуры использовали салат листовой (*Lactuca sativa* L.) сорта Афицион. Эту культуру выбрали в связи с коротким сроком его выращивания до товарных кондиций (техниче-

ская вегетация от 30 до 45 сут) и высоким уровнем накопления нитратов в биомассе (официальная ПДК — 1500 мг/кг зеленой массы [9]).

Растения выращивали в стандартных кассетах 60 × 60 см, содержащих 64 (8 × 8) ячейки, объемом 50 мл и глубиной 5 см. В эксперименте использовали 3 кассеты. Информация о составе питательных сред в каждой ячейке приведена в табл. 3, 4. Кассеты заполняли питательными средами и выращивали по 4 растения рядом. Четверки в соседних рядах размещали в шахматном порядке во избежание чрезмерной загущенности, наступающей после 20 сут вегетации. В каждой четверке состав питательной среды был одинаковым. Освещение в вегетостате осуществляли лампами ДНБО1–4 × 9–001 У4.1 “Светодар” (отношение интенсивности в синем и красном диапазоне 4:1) с фотопериодом 18 ч (6:00–24:00) — 6 ч темноты. Общая освещенность — 10000 Лк на среднем уровне листьев. Дневную температуру поддерживали на уровне 21–23°C, ночную — 18–20°C.

В процессе выращивания 3 раза проводили промывку ячеек поливной водой для предотвращения влияния излишнего засоления субстратного раствора. Растения снимали на 32-е сут после посадки, определяли их зеленую и сухую биомассу (сушка при 60°C). В выбранных пробах растений определяли содержание нитратов и хлорофилла *a* в зеленой биомассе стандартным методом [10]. Рассчитывали среднюю биомассу растений и ее стандартное отклонение от среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех случаях растения, выращенные на смеси песка с ционом, не имели особенностей и отклонений от нормального вида (табл. 4). Биомасса наземной части растений, выращенных при

Таблица 4. Содержание хлорофилла в растениях и накопление биомассы салатом при выращивании на субстратах с разным соотношением циона и песка

Цион, % в субстрате	N : K	Содержание хлорофилла, мг/г	NO ₃ ⁻ , мг/кг	Средняя сырая биомасса	Средняя сухая биомасса	Сухое вещество, %	
				г/растение			
Кассета 1 (песок + цион, pH 7.0)							
5	3	2.03	210	4.66 ± 0.39	0.69 ± 0.09	14.8	
10	3	—	—	4.61 ± 0.67	0.51 ± 0.09	11.2	
100	3	3.30	90	9.45 ± 0.36	0.79 ± 0.04	8.3	
5	2	2.38	130	3.98 ± 0.28	0.58 ± 0.07	14.6	
10	2	—	—	4.42 ± 0.67	0.49 ± 0.08	11.0	
100	2	—	70	7.89 ± 1.32	0.61 ± 0.15	7.7	
Кассета 2 (песок + цион, pH 6.0)							
5	3	2.38	200	4.82 ± 0.49	0.55 ± 0.03	11.4	
10	3	—	—	4.21 ± 1.16	0.51 ± 0.12	12.1	
100	3	2.33	120	6.14 ± 0.06	0.50 ± 0.02	8.1	
5	2	2.15	180	3.53 ± 0.24	0.43 ± 0.04	12.2	
10	2	—	—	4.54 ± 0.83	0.51 ± 0.10	11.2	
100	2	—	70	5.21 ± 1.15	0.42 ± 0.06	8.0	
Кассета 3 (песок + цион, pH 5.0–7.0)							
N : K	pH	Песок, %	Содержание хлорофилла, мг/г	NO ₃ ⁻ , мг/кг	Средняя сырая биомасса	Средняя сухая биомасса	Сухое вещество, %
					г/растение		
Контроль*		0	1.70	—	0.34 ± 0.06	0.045	13.3
2	5.0	90	—	100	3.03 ± 0.65	0.41 ± 0.18	13.5
3	5.0	90	2.80	180	3.79 ± 0.21	0.51 ± 0.04	13.3
4	7.0	90	—	110	4.09 ± 0.68	0.45 ± 0.10	11.0
6	7.0	90	2.84	140	4.69 ± 1.09	0.50 ± 0.09	10.7

*Контроль — торф 100%.

дозе циона 2.5 и 5.0 г/растение (5 и 10% циона в смеси с песком), достоверно не различалась. Она составила соответственно 5.03 ± 1.24 и 5.17 ± 1.90 г зеленой и 0.55 ± 0.12 и 0.52 ± 0.10 г сухой биомассы/растение, независимо от величины pH в пределах 5.0–7.0 и соотношения N : K = 3–6. При pH = 6.0 биомасса растения была равна 5.07 ± 1.25 г. Это свидетельствовало о том, что при количестве циона 2.5 г/растение в его смесях с бесплодным грунтом практически полностью удовлетворялись потребности растения в элементах питания. Более высокая биомасса оказалась у растений, выращенных на 100%-ном ционе (50 г/на растение), особенно при pH = 7.0: 8.56 ± 1.18 г/растение.

При увеличении доли циона в смесях с песком возрастало содержание сухого вещества в растениях. Это явление наблюдали во всех случаях, когда условия корневого питания растений салата, райграса и др. улучшались, в частности, за счет

разрыхления грунта. В нашем случае наиболее вероятной причиной этого было улучшение аэрации корневой системы по мере замены песка на цион. В опыте использовали кварцевый песок с размером частиц 0.1–0.63 мм. Субстрат цион был полидисперсным и состоял из частиц размером от 0.5 до 3.0 мм, преимущественно — 0.7–2.0 мм. Изучение их водно-воздушных свойств показало, что в условиях полива в поддон вегетационного сосуда в ционе объемная доля воздуха составляла 16.3, воды — 40.0%; для песка эти величины были равны 2.3 и 40.0% соответственно.

В надземной биомассе растений, выросших на питательных средах с добавлением циона, концентрация хлорофилла *a* изменялась в пределах 2.3–3.3 мг/г и оказалась малочувствительной к количеству добавленного циона.

Субстрат цион до посева растений не содержал в своем составе нитратов. Тем не менее, в зеленой

массе растений после их среза на 32-е сут были обнаружены нитраты в концентрации до 210 мг/кг зеленой биомассы растений, выросших на смесях субстрата с песком. Для исследованной тест-культуры это было низким уровнем, однако нитраты присутствовали во всех случаях. Их концентрация была несколько меньше в растениях, выросших на 100%-ном циионе-100 — до 120 мг/кг. Кроме наличия следовых количеств нитратов в поливной воде, вероятной причиной появления нитратов в биомассе растений было обсеменение питательной прикорневой среды нитрифицирующими бактериями в процессе роста растений, т.к. эксперимент проводили в нестерильных условиях. Известно, что присутствие в почве и водных средах цеолитов способствует закреплению на них колоний и быстрому развитию бактерий [11], которые используют ион аммония, выделяющийся из субстрата в процессе роста растений. Окончательное выяснение причин этого явления требует постановки специального эксперимента с выращиванием растений, подготовки субстрата, поливной воды и воздуха помещения с соблюдением требований стерильности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что цеолитный субстрат циион-100 в чистом виде и в смесях с бесплодным грунтом (кварцевым песком) обеспечивал без дополнительного удобрения на протяжении 32-суточной вегетации потребности растений салата листового (*Lactuca sativa* L.) сорта Афицион всеми питательными элементами. Количество субстрата 2.5 г/растение в виде 5%-ной смеси с кварцевым песком в вазоне объемом 50 мл было достаточным для получения растений с массой надземной части 5.03 ± 1.24 г. Это соответствовало получению ~2 г биомассы/г субстрата. При этом содержание азота в субстрате уменьшалось на 50%. Вариации количества клиноптилолитного субстрата в пределах 2.5–10 г/растение, pH питательной среды в пределах 5.0–7.0, соотношении N : K = 3–6 существенно не влияли на урожай первой вегетации. Содержание нитратов в биомассе растений салата, выращенных на чистом циионе-100 и

его смесях с отмытым кварцевым песком, было многократно меньше его предельной санитарной нормы. Это открывает возможность получения малонитратной продукции зеленных культур, отвечающих существенно более высоким санитарным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов Д.А., Косандрович Е.Г., Мельников И.А., Печкуров А.Н., Полховский Е.М., Солдатов В.С., Сапрыкин В.В. Питательные субстраты для выращивания растений: Пат. № 2662772, РФ//Б.И. 2018.
2. Солдатов В.С., Терентьев В.М., Перишкина Н.Г. Искусственные питательные среды для роста растений на основе ионообменных материалов // Агрохимия. 1969. № 2. С. 101–107.
3. Солдатов В.С., Перишкина Н.Г., Хорошко Р.П. Ионитные почвы. Минск: Наука и техника, 1978. 270 с.
4. Хатькова А.Н., Размахин К.К. Цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья: новые технологии переработки // Вестн. ИГКоми НЦУрОРАН. 2016. № 1. С. 30–33.
5. Хатькова А.Н., Растовцев В.И., Размахин К.К. Изучение эффективности влияния ускоренных электронов на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья // Вестн. ИркутскГТУ. 2014. № 2. С. 85–91.
6. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия: учебник. М.: Проспект, 2016. 608 с.
7. Вильдфлуш И.Р. Агрохимия. Минск: ИВЦ Минфина, 2013. 704 с.
8. Чесноков В.А. Выращивание растений без почвы. Л.: ЛГУ, 1960. 170 с.
9. Об утверждении санитарных норм, правил и гигиенических нормативов “Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов” и признании утратившими силу некоторых постановлений Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь и постановлений Министерства здравоохранения Республики Беларусь: постановление Министерства здравоохранения РБ // 09.06.2009 г. № 63.
10. Кидин В.В., Дерюгин И.П. Практикум по агрохимии: уч. пособ. М.: КолосС, 2008. 599 с.
11. Weatherley L.R., McVeigh R.J. The enhancement of ammonium ion removal onto columns of clinoptilolite in the presence of nitrifying bacteria, In Ion exchange at the millennium // Imper. College Press. 2000. P. 133–141.

Growing of the Leaf Salad (*Lactuca sativa* L.) Cultivator Afition on the Zeolit Nitrate Free Substrate

V. S. Soldatov^{a, #}, S. Y. Kosandrovich^a, O. V. Ionova, H. P. Yezubets^a, and N. V. Vonsovich^a

^a Institute of physical organic chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus
ul. Surganova 13, Minsk 220072, Republic of Belarus

[#]E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by

A new nitrate free nutrient substrate Zion-100 has been tested in the laboratory conditions in pot experiments (50 ml) for the fertility and the nitrates concentration in the biomass of leaf salad (*Lactuca sativa* L.) cultivar Aficion. The substrate contained all necessary for the plant nutrient elements in chemically bound state in a high concentration; it did not contain any organic matter and nitrates. All nutrient elements in the substrate are contained in chemically bound state in a high concentration. All nitrogen in the substrate is present in the ammonium form. The plants were grown on the 100% substrate as well as on its mixtures (5–50%) with fruitless quartz sand. At the lowest concentration of the substrate in the sand they generated 2.5 g/g substrate of green biomass with concentration of chlorophyll *a* 2.3–3.3 mg/g and NO_3^- – 70–210 mg/kg. This is lower than the admitted sanitary norm for the plants used in the study by an order of magnitude. The consumption of nitrogen was 50% from its content in the fresh substrate. No additional fertilization was done in the vegetation period.

Key words: leaf salad (*Lactuca sativa* L.) cultivator Aficion, zeolit nitrate free substrate.

УДК 581.1:632.93:631.53.01

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ РАСТЕНИЙ ТОМАТА НА ПРЕДПОСЕВНУЮ ОБРАБОТКУ СЕМЯН ЭКСТРАКТОМ *Fucus vesiculosus*¹

© 2020 г. Е. Н. Икконен^{1,*}, Т. Г. Шибаева¹, М. Г. Юркевич¹

¹ Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр РАН”
185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия

*E-mail: likkonen@gmail.com

Поступила в редакцию 15.07.2019 г.

После доработки 07.10.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Исследовали влияние предпосевного замачивания семян томата в экстракте бурых водорослей (*Fucus vesiculosus* L.) на основные физиологические процессы растений томата (рост, фотосинтез, дыхание, водный обмен). Предпосевная обработка семян томата экстрактом бурых водорослей *F. vesiculosus* в диапазоне концентраций 0.5–50 г/л не оказала значимого влияния на ростовые процессы растений, интенсивность фотосинтеза, устьичную проводимость и транспирацию растений. Использование экстракта в концентрации 5 г/л способствовало повышению эффективности использования растением световой энергии на фотосинтез и снижению доли дыхательных затрат на этот процесс.

Ключевые слова: *Solanum lycopersicum*, бурая водоросль *Fucus vesiculosus*, обработка семян, фотосинтез, дыхание.

DOI: 10.31857/S0002188120030060

ВВЕДЕНИЕ

Одним из критериев продовольственной безопасности является продовольственная независимость страны и ее регионов, для обеспечения которой требуется стабильный и устойчивый рост сельскохозяйственного производства. В зонах рискованного земледелия, к которым относится практически весь Русский Север, для этого существуют объективные препятствия, что связано с экстремальным и неустойчивым климатом, а также низким естественным плодородием почв. Решение задачи повышения производительности сельского хозяйства особенно в условиях Севера может быть связано, наряду с другими мерами, с поиском новых способов повышения эффективности использования почв на основе экологически индифферентных технологий, в том числе при использовании природных мелиорантов биологического происхождения. В этом отношении

большим потенциалом в сельскохозяйственном использовании могут обладать бурые морские водоросли из-за значительного содержания в них стимуляторов роста [1].

Благодаря содержанию в своем составе большого спектра фитогормонов (цитокининов, ауксинов, ауксиноподобных веществ, абсцизовой кислоты), бетаинов, стеролов, полисахаридов (фукоидана), полифенолов, витаминов, аминокислот, антибиотиков, микро- и макроэлементов [2, 3], а также возможности улучшения водно-физических свойств и минерального состава почвы [4] применение морских водорослей в сельскохозяйственной индустрии может способствовать повышению продуктивности растений [5], их устойчивости к действию стрессовых факторов различной природы [1], росту урожайности и повышению послеурожайного качества продукции [6].

Север России обладает большим ресурсным потенциалом бурых морских водорослей, которые представлены в основном ламинариями и видами фукусовых, в том числе фукусом пузырчатый (*Fucus vesiculosus* L.), который является массовым видом литорали Баренцева, Балтийского и Белого морей. В настоящее время российский

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Карельского научного центра РАН (№ 0218-2019-0079 и 0221-2017-0047) и при частичной поддержке РФФИ (№ 19-29-05174). Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”

промышленный промысел *F. vesiculosus* осуществляется в основном на побережье Белого моря, однако объемы его добычи постоянно снижаются, что возможно связано с невысоким уровнем его вовлечения в инновационное предпринимательство, особенно в сфере сельскохозяйственного производства. Масштабному применению фукуса в растениеводстве должно предшествовать комплексное изучение аграрной результативности его использования, что невозможно без понимания механизмов влияния фукуса на растения и выявления физиологических причин его стимулирующего действия на сельскохозяйственные культуры.

Использование бурых морских водорослей в виде экстрактов или коммерческих продуктов может положительно отразиться на росте и развитии растений, усилить активность фотосинтетического аппарата [5], что было выявлено, в том числе для фукусовых водорослей, в основном на примере аскофиллума узловатого [1]. Вопрос о влиянии *F. vesiculosus* на физиологическое состояние сельскохозяйственных культур остается открытым, но гипотетически можно предположить, что данный вид водорослей также способен оказывать определенное положительное влияние на интенсивность и эффективность основных физиологических процессов в растениях.

Цель работы — изучение влияния экстракта фукуса пузырчатого различной концентрации на ростовые показатели, фотосинтез и дыхание растений томата. В растениеводстве экстракты водорослей могут использоваться путем внесения в почву, фолиарной обработки растений или предпосевной обработки семян. В данной работе исследовали прием замачивания семян перед посевом как экономически целесообразный.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Семена томата (*Solanum lycopersicum* L., гибрид Верлиока Плюс F1) в течение 3-х сут замачивали в водных экстрактах водорослей (*F. vesiculosus*), полученных методом мацерации в концентрации 0, 0.5, 5 и 50 г сухой массы/л, контролем служила дистиллированная вода. Пророщенные семена высаживали в сосуды, заполненные смесью торфяного субстрата (PS-2, “Агроторф”) и песка в соотношении 2 : 1. Растения выращивали в камере искусственного климата (ВКШ-73, Россия) при ежедневном поливе, температуре воздуха 23/20°C (день/ночь), фотосинтетически активной радиации (ФАР) 250 мкмоль/м²/с, фотопериоде 16 ч, влажности воздуха 60–70%. Биометрические (высота растения, длина и количество ли-

стьев) и физиологические параметры измеряли на растениях в фазе 6–7 листьев. Суммарное содержание хлорофиллов *a* и *b* оценивали с помощью измерителя уровня хлорофилла SPAD 502 Plus (Konica Minolta, Osaka, Япония) в условных единицах SPAD. Газообмен, устьичную проводимость и транспирацию определяли с использованием портативной фотосинтетической системы HSM-1000 (Walz, Германия) при температуре листа 13 и 23°C. Все измерения газообмена начинали не ранее чем через 2 ч после наступления у растений светового периода. Видимый фотосинтез (A_n) листьев измеряли, начиная с ФАР, равной 1000 мкмоль/м²/с, и далее при 60, 40 и 20 мкмоль/м²/с ФАР. При каждой интенсивности ФАР величину газообмена определяли после полной его стабилизации. По окончании измерений газообмена листа на свету растение выдерживали в течение 30 мин в темноте и определяли скорость газообмена при 0 мкмоль/м²/с ФАР, принимая данную величину за дыхание листьев в темноте (R_d). Видимый квантовый выход фотосинтеза (α) и световой компенсационный пункт (СКП) вычисляли по величинам скорости видимого фотосинтеза при 60, 40 и 20 мкмоль/м²/с ФАР [7]. Митохондриальное дыхание листьев на свету (R_l) определено согласно методу Kok [8] экстраполяцией на ось Y (A_n) прямой линии, аппроксимирующей величины A_n при 60, 40 и 20 мкмоль/м²/с ФАР. Точка пересечения аппроксимирующей прямой с осью Y отражала величину газообмена при 0 мкмоль/м²/с ФАР и была принята за R_l [9]. Скорость истинного фотосинтеза (A_g) рассчитывали как сумму A_n и R_l . Для определения величины отношения сухой массы листа к его площади (LMA , от англ. leaf mass area) высечки листовых пластинок известной площади (2.6 см²) высушивали при 105°C до постоянного веса.

Измерения фотосинтетических параметров, дыхания и водного обмена проводили на завершивших рост 3–4-м листьях. Температурную чувствительность дыхания выражали посредством величины Q_{10} , показывающей во сколько раз изменяется скорость процесса при изменении температуры на 10°C. На рисунках представлены средние величины 6-ти и более биологических повторностей и их стандартные ошибки. Достоверность различий между средними величинами определяли на основе дисперсионного анализа (LSD-тест) с использованием программного обеспечения Statistica (v. 8.0.550.0, “StatSoft, Inc.”). При $P < 0.05$ различия средних величин

Таблица 1. Биометрические показатели и содержание хлорофилла в растениях томата при обработке семян экстрактом *F. vesiculosus* различной концентрации

Показатель	Концентрации экстракта, г/л			
	0	0.5	5	50
Высота растения, см	17.6 ± 0.4 ^a	18.2 ± 0.4 ^a	18.3 ± 0.4 ^a	17.4 ± 0.3 ^a
Количество листьев, шт.	6.3 ± 0.6 ^a	6.7 ± 0.4 ^a	6.8 ± 0.3 ^a	7.0 ± 0.4 ^a
Суммарная длина листьев, см	38.2 ± 2.2 ^a	40.3 ± 1.3 ^a	42.4 ± 1.7 ^a	42.5 ± 2.2 ^a
<i>LMA</i> , мг/см ²	2.52 ± 0.09 ^b	2.81 ± 0.09 ^a	2.83 ± 0.09 ^a	2.56 ± 0.08 ^b
Хл, у.е.	43.8 ± 1.1 ^b	44.3 ± 1.8 ^b	47.3 ± 0.6 ^a	43.8 ± 1.2 ^b

Примечание. *LMA* — отношение сухой массы листа к его площади (от англ. leaf mass area), Хл, у.е. — содержание хлорофилла, условные единицы SPAD. Для каждого показателя разные буквы указывают на достоверность различий средних величин при $P < 0.05$.

считали как достоверные, при $P < 0.1$ обсуждали тенденцию к изменению параметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка семян экстрактом *F. vesiculosus* слабо повлияла на ростовые процессы растений томата (табл. 1). Можно отметить только тенденцию к увеличению количества листьев с повышением концентрации экстракта. Содержание хлорофилла и величина отношения сухой массы листа к его площади (*LMA*) возрастали соответственно на 8 и 12% в результате обработки семян экстрактом в концентрации 0.5 г/л. Повышение показателя *LMA* косвенно отражает утолщение листа, что вместе с увеличением длины и количества листьев может способствовать росту продуктивности целого растения, т.к. фотосинтетические способности растений во многом определяются величиной *LMA* [10]. Кроме того, изменение *LMA* может рассматриваться как один из механизмов структурных преобразований, обеспечивающих рост устойчивости растений к ухудшению условий среды [11].

Обработка семян экстрактом не влияла на скорость видимого фотосинтеза, устьичную проводимость и транспирацию (результаты не представлены), однако способствовала повышению величины видимого квантового выхода фотосинтеза (α). Данный параметр световой кривой фотосинтеза, показывает количество связанного в процессе фотосинтеза CO_2 на один квант падающей на растение световой энергии и отражает эффективность использования растением света на фотосинтез [7]. В результате обработки семян экстрактом *F. vesiculosus* в концентрации 0.5 и 5 г/л величина α листьев томатов повышалась соответственно на 30 ($P = 0.011$) и 16% ($P = 0.087$) при температуре измерения 23°C (рис. 1а). По-

скольку величина α отражает эффективность фотосинтеза преимущественно при малой и средней интенсивности света, а рост растений происходит чаще всего при потоке света, не достигающем насыщающих фотосинтез величин, величина видимого квантового выхода может определять скорость первичной продукции растений [12]. Поэтому с определенной долей вероятности можно предположить, что повышение эффективности использования энергии света на фотосинтез у томатов в результате обработки семян экстрактом фукуса может быть одним из механизмов, способствующих росту продуктивности растений. К факторам, определяющим изменение параметра α , часто относят преобразования в пигментном комплексе [7]. Например, было выявлено, что у растений затененных местообитаний формирование более мощного пигментного комплекса сопровождалось повышением величины α [7]. Видимо, выявленное в данной работе увеличение содержания хлорофилла (табл. 1) в результате обработки семян способствовало росту показателя α , т.е. повышению эффективности фотосинтетического использования света. Однако данный рост эффективности проявлялся в большей степени при оптимальных температурных условиях, а при кратковременном понижении температуры он был менее выражен. Также следует отметить, что преобразования пигментного комплекса, такие как, например, определенное в данной работе повышение содержания хлорофилла, могут являться частью процесса повышения устойчивости растений к действию неблагоприятных факторов [13]. Поэтому стимулирующее действие обработки семян экстрактом фукуса может проявиться через оптимизацию физиологических процессов роста и развития растений в стрессовых условиях. Однако данное предположение требует дальнейшего исследования и подтверждения.

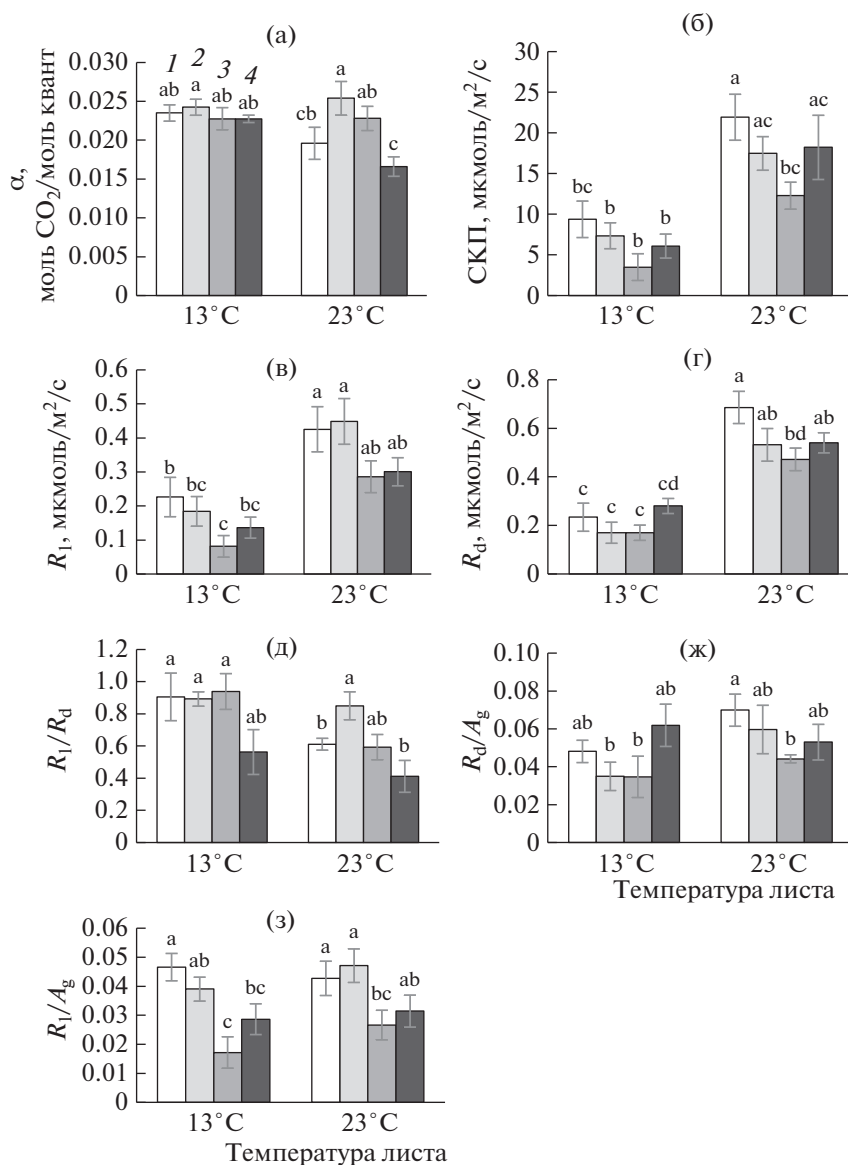


Рис. 1. Видимый квантовый выход фотосинтеза (α) – (а), световой компенсационный пункт (СКП) – (б), дыхание на свету (R_l) – (в), дыхание в темноте (R_d) – (г), величина соотношения R_l к R_d (R_l/R_d) – (д), величина соотношения R_d к истинному фотосинтезу (R_d/A_g) – (ж), величина отношения R_l к истинному фотосинтезу (R_l/A_g) – (з) листьев томата, выращенных из семян, обработанных экстрактом *F. vesiculosus* в концентрации 0 (1), 0.5 (2), 5 (3) и 50 (4) г/л. В пределах каждого показателя разные буквы указывают на достоверность различий средних величин при уровне значимости $P < 0.05$.

Обработка семян экстрактом в концентрации 5 г/л понижала величину светового компенсационного пункта (СКП) на 43% ($P = 0.026$) при 23°C (рис. 1б). При температуре измерения 13°C также было выявлено понижение СКП на 60% у растений, выросших из обработанных экстрактом семян, однако данное снижение не было статистически достоверным ($P = 0.300$). Снижение СКП, отражающее в определенной мере повышение теневыносливости растений, может быть следствием уменьшения скорости митохондриального дыхания как на свету (R_l), так и в темноте (R_d)

(рис. 1в, г). Скорость дыхания на свету, как правило, меньше, чем скорость дыхания в темноте из-за ингибирования процесса светом [14]. Результаты настоящей работы показали, что обработка семян экстрактом *F. vesiculosus* могла уменьшать степень ингибирования светом дыхания листьев растений, как это было выявлено по повышению величины R_l/R_d ($P = 0.035$) при использовании экстракта в концентрации 0.5 г/л при температуре измерения дыхания 23°C (рис. 1д). Однако следует отметить, что при использовании высоко концентрированного экстракта (50 г/л)

Таблица 2. Величина Q_{10} митохондриального дыхания листьев томатов в темноте (R_d) и на свету (R_l) при предпосевной обработке семян экстрактом *F. vesiculosus* различной концентрации

Показатель	Концентрация экстракта, г/л			
	0	0.5	5	50
R_d	2.9	3.1	2.8	2.8
R_l	1.9	2.4	3.5	2.2

величина R_l/R_d снижалась независимо от температуры измерения ($P = 0.048$ при 13°C и $P = 0.011$ при 23°C), что отражало увеличение светового ингибирования дыхания.

Наряду со скоростью, важным показателем процесса дыхания растений является температурный коэффициент Q_{10} , по которому можно судить о зависимости дыхания от изменений температуры. Величина параметра Q_{10} может меняться в зависимости от воздействующих на растения факторов, отражая определенные преобразования в дыхательном процессе. Ранее было выявлено, что дыхание в темноте в большей степени, чем дыхание на свету, чувствительно к изменению температуры [15], что было подтверждено и результатами настоящей работы (табл. 2). Обработка семян экстрактом *F. vesiculosus* вызывала увеличение температурной чувствительности R_l , но не R_d .

Соотношение дыхания и фотосинтеза (R/A) является важной характеристикой углеродного баланса растений [16] и показателем сбалансированности у растений основных физиологических процессов – фотосинтеза, дыхания, роста, транспорта ассимилятов и т.п. [17]. Предпосевная обработка семян экстрактом *F. vesiculosus* способствовала снижению величины отношения дыхания к фотосинтезу у обработанных экстрактом растений, т.е. снижению доли дыхательных затрат от фотосинтеза (рис. 1 ж, з). Например, величина R_d/A_g у растений, обработанных экстрактом с концентрацией 5 г/л была меньше контрольных на 37% ($P = 0.044$) при 23°C , а величина R_l/A_g – на 63 и 38% ($P = 0.006$ и $P = 0.039$) соответственно при 13 и 23°C . Данное снижение доли дыхательных затрат от фотосинтеза как в темноте, так и на свету могло быть вызвано уменьшением энергетических и метаболических запросов растительной клетки. Изменение баланса фотосинтез–дыхание в сторону преобладания поступления ассимилятов как при оптимальных температурных условиях, так и понижении температуры, могло способствовать накоплению растением углеводов и, как следствие, росту продуктивности растений

и/или повышению их устойчивости к действию неблагоприятных факторов среды [18].

ВЫВОДЫ

1. Предпосевная обработка семян томата экстрактом бурых водорослей *F. vesiculosus* не оказывала значимого влияния на ростовые процессы растений, интенсивность фотосинтеза, устьичную проводимость и транспирацию независимо от концентрации экстракта в диапазоне 0.5–50 г/л, но увеличивала содержание в листьях хлорофилла и величину отношения сухой массы листа к его площади при использовании экстракта в концентрации 5 г/л.

2. Снижение скорости дыхания и, как следствие, снижение доли дыхательных затрат от фотосинтеза у растений томата при обработке семян экстрактом *F. vesiculosus* в концентрации 5 г/л могло способствовать смещению баланса углерода в сторону накопления растениями ассимилятов.

3. Предпосевная обработка семян томата экстрактом *F. vesiculosus* в концентрации 0.5 г/л снижала степень ингибирования дыхания светом, но высококонцентрированный экстракт (50 г/л) увеличивал данное ингибирование. В результате обработки семян экстрактом *F. vesiculosus* температурная чувствительность дыхания листьев на свету увеличивалась.

4. В целом результаты выявили стимулирующий эффект влияния предпосевной обработки семян томата экстрактами *F. vesiculosus* в невысокой концентрации на некоторые физиологические процессы растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan W., Rayirath U.P., Subramanian S., Jithesh M.N., Rayorath P., Hodges D.M., Critchley A.T., Craigie J.S., Norrie J., Prithiviraj B. Seaweed extract as biostimulants of plant growth and Development // J. Plant Growth Regul. 2009. V. 28. P. 386–399.
2. Ertani A., Cavani L., Pizzeghello D., Brandellero E., Altissimo A., Ciavatta C., Nardi S. Biostimulant activity of two protein hydrolyzates in the growth and nitrogen metabolism of maize seedlings // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2009. V. 172. P. 237–244.
3. Варзугина М.А., Макачук Р.Н., Яворский А.С., Нуколаенко О.А., Куранова Л.К. Фукусовые водоросли Арктического региона – характеристика, направления использования // Изв. высш. учеб. завед. Арктический регион. 2015. № 1. С. 48–53.
4. Gandhiyappan K., Perumal P. Growth promoting effect of seaweed liquid fertilizer *Enteromorpha intestinalis* on the sesame crop plant // Seaweed Res. Util. 2001. V. 23. P. 23–25.

5. Чайкина Е.Л., Герасименко Н.И., Клыков А.Г., Анисимов М.М. Влияние экстрактивных веществ бурой водоросли *Laminaria cichorioides* Miyabe на рост проростков и продуктивность растений гречихи // Агрохимия. 2015. № 2. С. 94–96.
6. Panda D., Pramanik K., Nayak B.R. Use of sea weed extracts as plant growth regulators for sustainable agriculture // Inter. J. Bio-resource and Stress Manag. 2012. V. 3. № 3. P. 404–411.
7. Гармаш Е.В., Головкин Т.К. CO₂-газообмен и рост *Rhaponticum carthamoides* в условиях подзоны средней тайги европейского Северо-Востока. 1. Зависимость фотосинтеза и дыхания от внешних факторов // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 6. С. 854–863.
8. Kok B. A critical consideration of the quantum yield of *Chlorella*-photosynthesis // Enzymologia. 1948. V. 13. P. 1–56.
9. Ayub G., Zaragoza-Castells J., Griffin K.L., Atkin O.K. Leaf respiration in darkness and in the light under pre-industrial, current and elevated atmospheric CO₂ concentrations // Plant Sci. 2014. V. 226. P. 120–130.
10. Lambers H., Poorter H. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences // Adv. Ecol. Res. 1992. V. 23. P. 187–261.
11. Poorter H., Niinemets U., Poorter L., Wright I.J., Villar R. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis // New Phytol. 2009. V. 182. P. 565–588.
12. Ehleringer J., Björkman O. Quantum yields for CO₂ uptake in C₃ and C₄ plants. Dependence on temperature, CO₂ and O₂ concentration // Plant Physiol. 1977. V. 59. P. 86–90.
13. Savitch L.V., Leonardos E.D., Krol M., Jansson S., Grodzinski B., Huner N.P. A., Öquist G. Two different strategies for light utilization in photosynthesis in relation to growth and cold acclimation // Plant Cell Environ. 2002. № 25. P. 761–771.
14. Гармаш Е.В. Митохондриальное дыхание фотосинтезирующей клетки // Физиология растений. 2016. Т. 63. № 1. С. 17–30.
15. Atkin O.K., Evans J.R., Ball M.C., Lambers H., Pons T.L. Leaf respiration of snow gum in the light and dark. Interaction between temperature and irradiance // Plant Phys. 2000. V. 122. P. 915–923.
16. Мурей И.А., Рахманкулова З.Ф. Соотношение фотосинтеза и составляющих дыхания у сахарной свеклы в вегетативную фазу роста растений // Физиология растений. 1990. Т. 37. С. 468–475.
17. Рахманкулова З.Ф. Физиологические аспекты взаимосвязи фотосинтеза и дыхания // Физиология растений. 2019. Т. 66. № 3. С. 178–188.
18. Климов С.В. Пути адаптации растений к низким температурам // Усп. совр. биол. 2001. Т. 121. № 1. С. 3–22.

Physiological Reactions of Tomato Plants to Pre-Sowing Treatment of Seeds with Extract of *Fucus vesiculosus* L.

E. N. Ikkonen^{a, #}, T. G. Shibaeva^a, and M. G. Yurkevich^a

^a Institute of biology, Karelian scientific center RAS, Pushkinskaya ul. 11, Petrozavodsk 185910, Russia

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

The influence of pre-sowing soaking of tomato seeds in the extract of brown algae (*Fucus vesiculosus* L.) on the main physiological processes of tomato plants (growth, photosynthesis, respiration, water relation) was investigated. Pre-sowing treatment of tomato seeds with *F. vesiculosus* brown algae extract in the concentration range 0.5–50 g/l had no significant effect on plant growth processes, photosynthesis intensity, stomatal conductivity and transpiration of plants. The use of the extract in a concentration of 5.0 g/l enhanced photosynthetic light use efficiency and reduced respiratory costs for growth.

Key words: *Solanum lycopersicum*, brown algae *Fucus vesiculosus*, seed treatment, photosynthesis, respiration.

УДК 632.95

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕСТИЦИДОВ В АГРАРНОМ СЕКТОРЕ РОССИИ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ РЫНКОВ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

© 2020 г. В. А. Захаренко

Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”

143026 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, Россия

E-mail: zwa@mosniish.ru

Поступила в редакцию 02.10.2019 г.

После доработки 23.10.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Рассмотрены состояние и перспективы использования пестицидов в России в связи с развитием глобальных рынков средств защиты растений по материалам 9-й Международной конференции “Пестициды 2019”, 17 сентября 2019 г., Москва.

Ключевые слова: пестициды, аграрный сектор России, развитие глобальных рынков средств защиты растений, 9-я Международная конференция “Пестициды 2019”.

DOI: 10.31857/S000218812003014X

Мировой рынок пестицидов, несмотря на неустойчивость в динамике по годам и в отдельных странах, связанных с политическими событиями, за анализируемый десятилетний период (2008–2018 гг.), проявляет тенденцию к росту. При этом рынок пестицидов России по показателю прироста объема их продаж занимает первое место в мире за этот период.

Обстоятельный анализ А. Марфи (менеджер Kleffman Group) в докладе “Состояние и перспективы развития мирового рынка средств защиты растений” позволил оценить количественные тренды развития глобальных рынков средств защиты растений (СЗР) и семян за 2008–2018 гг. Использование пестицидов в сельском хозяйстве с 2008 г. (на сумму 44.1 млрд долл. США, не сельскохозяйственного использования – 5.1 млрд долл. и семян на 27.5 млрд долл.), которое к 2010 г. несколько снизилось (соответственно до 43.5, 5.1 и 32.7 млрд долл.), к 2014 г. выросло и достигло максимального уровня (60.5, 6.4 и 44 млрд долл.), а после снижения в 2016 г. – до 53.1, 6.2 и 42 млрд долл. С 2017 г. оно начало повышаться до 54.2, 6.4 и 44.7 млрд долл. и в 2018 г. составило 55.3, 6.6 и 45.2 млрд долл. Страны по объемам продаж пестицидов размещались в 2018 г. от более высоких к менее высоким продажам в последовательности: Бразилия – 8597, США – 7970, Китай – 5491, Япония – 2675, Индия – 2436, Аргентина – 2111,

Франция – 1945, Россия – 1834, Канада – 1598, Германия – 1479, Австралия – 1228, Италия – 1128, Испания – 834, Украина – 792, Великобритания – 791 млн долл. Развитие рынков пестицидов по показателю прироста продаж пестицидов в среднем ежегодно за пятилетие (2013–2018 гг.) в странах происходило в последовательности: Россия – 10.1, Гондурас – 9.3, Румыния – 9.1, Эквадор – 7.7, Коста-Рика – 7.4, Уругвай – 6.5, Тайланд – 6.2, Гватемала – 6.0, Боливия – 6.0, Парагвай – 5.6%. Страны с ежегодным уменьшением прироста за период 2013–2018 гг. включали: Узбекистан – на 15.6, Иран – 14.0, Нигерия – 12.5, Турция – 11.2, Египет – 11.7, Венесуэла – 10.0, Алжир – 9.9, Швеция – 8.6, Германия – 7.1%. Стоимость пестицидов, используемых на 1 га пахотных земель в регионах (материках) оценивали в 2018 г. в Латинской Америке и Азии – 6, в Африке и на Ближнем Востоке – 8, в Северной Америке – 14, в Европе – 17 долл./га.

Существенное влияние на изменение емкости рынка пестицидов оказало объединение компаний производителей пестицидов. Доля общего рынка до объединения составляла для различных фирм: Syngenta – 22, Bayer – 17, BASF – 16, Dow Agrosaiens – 9, Monsanto – 7, Dupont – 6, ADAMA – 5, FMC – 4, UPL – 4, Arista – 3, прочие – 15%. После объединения объем рынков компаний составил: Syngenta/ChemChina (ADAMA) – 22,

Bayer/Monsanto — 17, BASF — 16, Dow Agrosaiens — 9, Monsanto — 22, DowDupont — 14, BASF (включая Bayer, разделенный) — 13, Arista/UPL — 7, FMC (включая DuPont разделенный) — 6, прочие — 16%. При оценке будущего развития мирового рынка пестицидов следует учитывать торговую войну между Китаем и США, нестабильность поставок и распределения рынков по странам. Однако при всех возможных изменениях рынков отдельных стран прогнозируется общий ежегодный рост мирового рынка пестицидов на 1–3% в год.

В отношении перспектив развития рынка пестицидов России важно принимать во внимание возможное сдерживающее влияние европейских тенденций в сфере средств защиты растений на сельское хозяйство России, представленное Дж. Брауном (председателем Комитета производителей средств защиты растений, директором ООО “Сингента”). В его докладе “Влияние европейских тенденций в сфере средств защиты растений на сельское хозяйство России” рассмотрены европейские тенденции, связанные с отзывом действующих веществ пестицидов с рынков или с ограничениями для использования действующих веществ в странах ЕС. После вступления в действие Регламента 1107 в мае 2009 г. отозвано более 50 д.в., значительно увеличилось количество регистраций д.в. в связи с чрезвычайными ситуациями, а арсенал препаратов для защиты урожая, которым располагают европейские фермеры, начал сокращаться. Темпы снижения количества используемых пестицидов характеризуются следующими данными: зарегистрированные и доступные д.в. в июне 1993 г. составляли 987 д.в. (703 д.в. *СЗР*, 189 — биологических и 4 прочих (медь и сера)), в июне 2011 г. — соответственно 483 д.в. (327, 120 и 32), в мае 2019 г. — 478 д.в. (293, 128, 37) и базовые д.в., которые используют в первую очередь не как пестициды, но могут применять и в этом качестве (например, фруктоза, известь). Показательными примерами являются отзываемые пестициды: глифосат — Международное агентство исследований рака классифицировало глифосат как возможное канцерогенное вещество. Для полной отмены регистрации не было оснований — он не является канцерогеном класса 1А или 1В. Получена регистрация глифосата только на 5 лет. Результаты более 800 научных исследований определили глифосат как безопасный продукт (при соблюдении регламентов его применения); неоникотиноиды — в 2018 г. введены ограничения на использование неоникотиноидов на основе имидаклоприда, клотианидина и тиаметоксама. В ЕС препараты с этими д.в. запрещены, за исключением использования

на культурах в защищенном грунте. Они по-прежнему зарегистрированы в ЕС и остаются в Приложении 1 к Регламенту № 1107/2009, но только для доиспользования остатков; триазолы — некоторые из д.в. этой группы уже запрещены, многие из них находятся под угрозой введения запрета; дикват — по предложению Европейской комиссии отозван с рынка *СЗР* 4 мая 2019 г., производителям дана отсрочка для реализации остатков препаратов на основе диквата до 4 февраля 2020 г.

По мнению Б. Брауна, следует принимать решения по возможному ограничению использования действующих веществ в России с учетом результатов объективных научных исследований, специфики сельского хозяйства РФ, на основе обсуждения при участии всех заинтересованных сторон: органов государственной власти, компаний-производителей *СЗР*, научных учреждений, отраслевых союзов и ассоциаций. При этом следует учитывать также перспективы развития аграрного сектора как удвоение экспорта сельскохозяйственной продукции к 2024 г. до 45 млрд долл. США (объем экспорта сельскохозяйственной продукции из России в 2018 г. составил 25 млрд долл. США), увеличение урожая зерновых в России, достигшего в 2018 г. 110 млн т (прогноз МСХ РФ на 2019 г. — 118 млн т), снижение фитосанитарных рисков. Важно принимать во внимание и менее высокий уровень интенсификации сельского хозяйства (соответственно объем использования пестицидов в России не более 2 кг/га, в то время как в странах ЕС он составляет около 4.5 кг/га).

Особенности развития сельского хозяйства в связи с развитием рынка пестицидов представлены в докладе Д. Снитко (Центр экономического прогнозирования Gazprombank.ru) “Сельское хозяйство в России: состояние и среднесрочные перспективы”. В докладе уделено внимание регулированию АПК, национальным проектам развития АПК, учитывая увеличение целевых объемов экспорта масла рапсового в 2 раза, соевого — на 70%, подсолнечного — в 2.2 раза, зерна — на 9%. Экспорт продукции АПК в бюджете национального проекта “Международная кооперация и экспорт” оценивается в 408 млрд руб. При этом следует учитывать создание экспортера зерна на базе активов ВТБ, строительства портовых терминалов, торговую войну США—Китай, возможности и риски для растениеводческих отраслей, а также введение в оборот 10–35 млн га пахотных земель при недостатке площадей для расширения производства продукции растениеводства с учетом оценки параметров стратегии роста произ-

водства зерна до рекордного валового сбора 134 млн т в 2017 г., его экспорта 54.7 млн т в 2018 г. а также коэффициента использования пашни — доли посевных площадей (используемой пашни) к общим ресурсам пашни (как категории земель сельхозназначения), который составляет в России в среднем 70%, однако с большими изменениями в зависимости от региона. Например, в ДВФО этот показатель составляет 87% (в Амурской обл. — 97%), в Центральном Нечерноземье — до 30% (Костромская обл.) Суммарный потенциал расширения обрабатываемой пашни в России составляет 35.5 млн га, причем 9 млн га приходится на 5 регионов — на Оренбургскую обл. и Алтайский край (освоение земель сдерживается нехваткой внутреннего потребления продукции и инфраструктуры для ее вывоза) и на засушливые регионы Европейской части России — Ростовскую, Волгоградскую и Саратовскую обл., развитие сельского хозяйства в которых требует восстановления мелиоративных систем. Потенциал увеличения посевной площади в регионах РФ (в млн га неиспользуемой пашни): ПФО — 10.8, СФО — 4.5, ЦФО — 4.7, ЮФО — 3.8, ЦФО — 2.6, УФО — 2.8 млн га. Цена земли в регионах менялась в 2018 г. от 30 тыс. руб./га (Липецкая обл.) до 130 тыс. руб./га (Краснодарский край) при доле посевных площадей в общей площади пашни регионов соответственно в Липецкой обл. — 89.7, в Краснодарском крае — 98.2%.

В связи с общими экономическими подходами к выполнению задач обеспечения продовольственной безопасности рассмотрена проблема снижения рисков потерь продукции растениеводства, вызываемых в агроэкосистемах вредными организмами, при недостаточном обеспечении сельских товаропроизводителей *СЗР* и техникой для их внесения. Состояние ситуации с обеспеченностью растениеводческих отраслей средствами защиты растений представлена в сообщении Е.А. Алекперовой “Основные тенденции развития рынка средств защиты растений по данным Агропанели-2018”.

Состояние уровня развития рынка *СЗР* рассмотрено по результатам опроса, проведенного в 2017–2018 гг. специалистами 2241 уникального хозяйства, по урожайности зерновых и технических культур. Для озимой пшеницы проанализированы показатели 1490, яровой — 1152 сельскохозяйственных предприятий. Объем рынка *СЗР* для защиты растений в указанных предприятиях составил в анализируемых хозяйствах суммарно 129 млрд руб. в 2017 г. и 133 млрд руб. в 2018 г, в том числе для групп препаратов: инсектицидов соот-

ветственно по годам — 6 и 7, протравителей — 13 и 14, фунгицидов — 25 и 23, гербицидов — 53 и 54%.

Рынок *СЗР* озимой пшеницы определен в объеме 36.9 млрд руб. (28% от общего), в котором рынок инсектицидов соответственно в 2017 и 2018 гг. составил 11 и 11, протравителей — 21 и 25, фунгицидов — 37 и 38, гербицидов — 27 и 24, прочих препаратов — 4 и 2%. Число обработок вегетирующих растений озимой пшеницы на единицу площади с применением гербицидов составил соответственно 1.17 и 1.14 раза, фунгицидами — 1.32 и 1.30 раза, инсектицидами — 1.23 и 1.18 раза. ТОП-5 действующих веществ в группах гербицидов в 2018 г. включал препараты, примененные против двудольных сорняков: 2,4-Д + флорасулам — 36, трибенурон-метил — 8, флоросулам + флуметсулам — 5, 2,4-Д — 5, амидсульфурон + иодсульфурон-метил натрий + мифенпир-диэтил — 4%; против злаковых: клоквинтосет + пиноксаден — 5, клоквинтосет-мексил + феноксапроп-П-этил — 4, клодинафоп-пропаргил + клоквинтосет-мексил + феноксапроп-П-этил — 3%; двойного действия: клоквинтосет-мексил + пироксулам — 2.8%.

Действующие вещества в примененных фунгицидах для однокомпонентных препаратов были представлены в 2018 г. карбендазимом — 19, пропиконазолом — 17, беномилом — 5, флутриафолом — 4, тебуконазолом — 4%; сочетания препаратов включали: пропиконазол + тебуконазол — 16, тебуконазол + ципроконазол — 13, спирокарсамин + тебуконазол + триадиоменол — 6, протиоконазол + спирокарсамин + тебуконазол — 4, пираклостробин + эпоксиконазол — 3%. Действующие вещества в однокомпонентных инсектицидах были представлены альфациперметрином — 19, лямбда-циперметрином — 17, диметоатом — 5, имидаклопридом — 4, тиаметоксамом — 4%; в сочетаниях веществ: имидаклоприд + лямбда-цигалотрин — 16, лямбда-цигалотрин + тиаметоксам — 13, бета-цигалометрин + диметоат — 6, ацетамиприд + лямбда-цигалотрин — 4, альфациперметрин + амадаклоприд — 3%.

Рынок *СЗР* сои оценен в 14.6 млрд руб. (11% от общего рынка). Структура рынка по группам пестицидов в 2017 и 2018 гг. характеризовалась соответственно по годам: инсектициды — 3 и 2, фунгициды — 8 и 5, протравители — 5 и 10, гербициды — 84 и 82, прочие препараты — 1 и 1%. Кратность обработки вегетирующих растений гербицидами составляла 1.53 и 1.80 раза, фунгицидами — 1.03 и 1.0 раза, инсектицидами — 1.01 и 1.16 раза. В группе гербицидов были использованы препараты с имидазолинонами в 2017 г. — 27 и в 2018 г. — 18%, послевсходовые противозлаковые гербициды — 30 и 42, противозлаковые — 23 и 24, почвенные —

18 и 15%. В 2018 г. были применены фунгициды (однокомпонентные препараты): пираклостробин – 40%, сочетания препаратов: пропиконазол + тебуконазол – 37, дифеноконазол + флутриафол – 15, пикоксистробин + ципроконазол – 6, ципроконазол + эпоксиконазол – 2, азоксистробин + эпоксиконазол – 1%; инсектициды (однокомпонентные препараты): лямбда-цигалотрин – 16, циперметрин – 16, альфациперметрин – 11, диметоат – 8, гекситиазон – 3%; сочетания препаратов: бетациперметрин + диметоат – 44, альфациперметрин + имидаклоприд – 2, хлорпирифос + циперметрин – 0.3, ацетамиприд + лямбда-цигалотрин – 0.1%.

Рынок пестицидов для подсолнечника, определенный в объеме 13.9 млрд руб., в 2018 г. (рост по сравнению с 2017 г. на 14%), составлял 10% от общего рынка. Структура рынка характеризовалась следующими группами препаратов: фунгициды – в 2017 г. – 7, в 2018 г. – 8%, гербициды – 91 и 91%. Количество обработок гербицидами – соответственно 1.17 и 1.07 раза, фунгицидами – 1.06 и 1.0 раза, инсектицидами – 1.01 и 1.14 раза.

В структуре рынка гербицидов препараты с имидазолинонами в 2017 г. составляли 24, в 2018 г. – 29%, с трибунилметилом – соответственно 7 и 10, послевсходовые противозлаковые – 38 и 38, почвенные – 25 и 19%, глифосатсодержащие – 5 и 3%. Действующие вещества в фунгицидах в 2018 г. были представлены однокомпонентными препаратами с пираклостробином – 27, сочетаниями азоксистробин + ципроконазол – 48, баскалид + димоксистробин – 7, дифеноконазол + крезоксил-метил + эпоксиконазол – 6, пропиконазол + тебуконазол – 5, пропиконазол + ципроконазол – 3%. В 2018 г. действующие вещества с однокомпонентными инсектицидами, содержащими циперметрин, составляли 28, индосакарб – 10, малатион – 8, альфациперметрин – 7, лямбда-цигалотрин – 3%; сочетания препаратов: бетациперметрин + диметоат – 39, лямбда-цигалотрин + хлорантранилинопрол – 3, хлорпирифос + циперметрин – 2%.

При большом ассортименте препаратов для вывода нового продукта в производство предполагается учет объективных параметров его активности в подавлении наиболее опасных вредных объектов, дифференцированных в зависимости от регионов и с учетом размеров хозяйств. Способы получения информации об эффективности средств защиты отличались количеством источников: лично на семинарах, от представителей предприятий в 88% случаев, по электронной почте – 67, на основе почтовой рассылки – 45%.

Особенности экономики пестицидов в основной отрасли растениеводства в зерновом производстве в России были представлены в сообщении В.А. Захаренко на тему “Экономика пестицидов в защите зерновых агроэкосистем”. Экономическая эффективность пестицидов обусловлена их ролью как одного из основных звеньев, определяющего уровень культуры земледелия в связи с обеспечением чистоты агроэкосистем от вредных организмов. Низкая культура земледелия в период реформ, связанная с неблагоприятным фитосанитарным состоянием зерновых агроэкосистем, обусловила вывод из оборота более 1/3 посевных площадей (свыше 20 млн га) с убыточным производством зерна. На оставшейся засеваемой 2/3 площадей при сложившемся уровне культуры земледелия и фитосанитарного состоянии агроэкосистем зерновых культур сохранились высокие риски потерь урожая, в среднем ежегодно с 2011–2015 гг. на уровне 39.55 млн т зерна при валовом сборе 93.5 млн т.

Часть потерь урожая предотвращали на основе системы интегрированной защиты растений, включающей прогрессивные методы и средства мониторинга фитосанитарного состояния агроэкосистем, химическую и нехимическую защиту растений.

Эффективность химической защиты растений (на основе использования пестицидов по показателю сохраненного урожая от вредителей, болезней и сорняков составила в 2011–2015 гг. в среднем 11 млн т (27.8% от потенциально возможного уровня предотвращения урожая от потерь), характеризовалась относительно высоким показателем уровня рентабельности 67.7%, превышающим в целом уровень рентабельности производства зерна 24.9%.

Представленные данные свидетельствовали об экономической целесообразности расширения объемов рациональной системы защиты зерновых культур в России с использованием пестицидов в связи с решением задачи обеспечения валового сбора зерна в России к 2030 г. до 130 млн т при расширении посевов до 50 млн га с учетом высокой экономической эффективности и минимальной опасностью загрязнения окружающей среды.

В. Григорьев (заместитель исполнительного директора, РАСП ХСЗР) в докладе “Особенности и проблематика российского рынка СЗР” сообщил о производстве пестицидов в России от общих объемов мирового рынка, об удовлетворении спроса сельских товаропроизводителей препаратами отечественного производства лишь на 50%.

Общая потребность отечественного сельского хозяйства составляет 160 тыс. т препаратов. Фирма “Август” большое внимание уделяет созданию новых производств, в частности “Август-Лабуга” (Татарстан), которое способно обеспечить высокоэффективной продукцией 1/3 российского рынка пестицидов. Компания “Август” реализует продукцию в 20-ти странах. Отмечено, что влияние современного мирового рынка на рынок отечественно производства связан в основном с развитием ситуации в Китае, который переходит от бесконтрольного производства, позволившего захватить мировой рынок, к строгому государственному регулированию и сокращению производства. Это вызывает опасность развития по ряду позиций дефицита поставок действующих веществ из Китая. Фирма “Август” ставит также вопрос возрождения собственного производства действующих веществ.

Общие организационные особенности использования пестицидов в растениеводстве России для обеспечения благоприятного фитосанитарного состояния агроэкосистем были представлены в сообщении А.В. Живых “Фитосанитарная обстановка на территории Российской Федерации в 2019 году”. Сфера оказания услуг ФГБУ “Россельхозцентр” в области защиты растений осуществляется 78 филиалами, более 1200 районными лабораториями, 48 аналитическими лабораториями, 30 биолaborаториями. Организация представляет услуги в сфере деятельности, связанной с комплексом мероприятий по защите растений, что включает производство средств защиты растений (биопрепараты – >900 т, энтомофаги – >7.9 млрд особей), фитоэкспертизу 6.9 млн т семенного материала, мероприятия по защите культур от особо опасных вредителей и болезней растений на площади около 115 тыс. га, аналитические лабораторные исследования >14 тыс. проб. Значительные объемы работ связаны с мониторингом и прогнозированием фитосанитарного состояния посевов в РФ (>102 млн га): выявление заболеваний (219 видов), опасности потерь урожая от вредителей (>465 видов), конкуренции сорняков за условия роста и развития культурных растений (>434 видов по группам зерновых и зернобобовых культур, технических, картофеля, овощных и плодово-ягодных растений и многолетних трав). Особо внимание уделено работе Россельхозцентра с чрезвычайно опасными объектами, вызывающими заболевание фузариозом колоса зерновых колосовых культур, с многоядными вредителями (саранчовыми, мышевидными грызунами, луговым мотыльком), с многолетними корневищными и корнеотпрысковыми

сорняками, в последние годы – с борщевиком Сосновского. Россельхозцентр оказывает услуги по анализу действующих веществ пестицидов на возмездной основе по заявкам сельхозпроизводителей (в 2019 г. проведение 2640 анализов позволило выявить 56 отклонений). За период 2008–2018 гг. выпущено 7 обстоятельных обзоров, в которых представлены сведения о распространении вредных организмов на уровне страны, федеральных округов и районов, прогнозируемые объемы работ против особо опасных вредителей, картографические данные по осеннему зимующему запасу особо опасных вредителей, представленных с использованием системы ГИС Карта 2011; данные в виде картограмм о заселяемых и заражаемых вредными организмами площадях.

Организационные основы сдерживания нежелательных экологических последствий использования пестицидов, учитывая отсутствие в России отечественного синтеза действующих веществ пестицидов, поставки действующих веществ и производимых на их основе препаративных форм пестицидов были представлены в сообщении Т.О. Белоусович “Технический регламент Евразийского экономического союза “О безопасности химической продукции”: чего ждать производителям СЗР?”. Этот документ (далее – ТР) принят 3 марта 2017 г. решением Совета Евразийской экономической комиссии ЕЭК № 19 и определен срок его вступления в силу 2 июня 2021 г. В РФ уполномоченным органом за реализацию положений ТР является Министерство промышленности и торговли. Документом предусмотрено, что действие ТР не распространяется на препаративные формы пестицидов и связанные с ними процессы их производства, хранения, перевозки (транспортирования), реализации и утилизации (переработки) до дня вступления в силу технического регламента Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС), устанавливающего требования к препаративным формам пестицидов и связанным с ними процессами их производства, хранения, перевозки (транспортирования), реализации и утилизации (переработки). В этот период сохраняется действие положений актов органов ЕАЭС или законодательство государств-членов ЕАЭС. Инвентаризация – первый этап формирования национальных частей Реестра – определен сроком до 1 марта 2021 г., а 13 мая 2019 г. официальным письмом Минпромторга сообщено о проведении инвентаризации химических веществ (в том числе в составе смесей), 10 августа 2019 г. открыто окно в Минпромторге для подачи информации. К середине 2020 г. запланировано завершение инвентаризации. Определен пере-

чень данных для инвентаризации, идентификационные данные химических веществ, включающие сведения об опасности (при наличии) и об изготовителе/импортере. Основу инвентаризации составляет базовый перечень химических веществ, находящихся в обращении в промышленности и торговле РФ.

Разработчиком документов является некоммерческое партнерство “Координационно-информационный центр государств-участников СНГ по сближению регуляторных практик” (по заданию Минпромторга). Базовый перечень химических веществ и единый шаблон для инвентаризации представлены на сайте <http://ciscenter.org/>.

Опыт и перспективные направления сдерживания загрязнения окружающей среды неиспользованными остатками пестицидов и находящихся в таре препаратами представлены в сообщении А.В. Ефимкина “Влияние рынка контрафакта на сбор и утилизацию тары”. Рассматриваемая оригинальная система сбора и утилизации “Экополе” включает следующие этапы: заключение договора с подрядчиками по поручению производителей, осуществления подрядчиками сбора отходов у аграриев и последующая утилизация отходов (система сбора основана на вывозе отходов с мест накопления у аграриев). Реализация

оригинальной системы сбора, вывоза и последующей утилизации отходов осуществлена в следующих объемах: в 2017 г. — 930, в 2018 г. — 1500, в 2019 г. — >1500 т. Выявленные возникающие проблемы при реализации схемы работы в 2017 г. были связаны с единичными случаями скупки тары на юге России, с ограниченностью в 2018 г. скупки лишь в Краснодарском крае и Ростовской обл., в 2019 г. при скупке тары в ЮФО и ЦФО доля тары наиболее популярных производителей снизилась в общем объеме отходов, переданных на утилизацию. Совершенствование путей решения проблем предполагается на основе контроля за соблюдением положений СанПиНа, возможности проверки концентрации действующих веществ, уточнения шкалы для сортирования и цен на продаваемые аграриями отходы (в настоящее время — до 350 руб./кг тары популярных производителей, до 10–15 руб./кг тары под видом вторичного сырья, без оплаты при передаче на утилизацию с получением акта).

Таким образом, на 9-й Международной конференции “Пестициды 2019” рассмотрены состояние и перспективы использования пестицидов в России в связи с развитием глобальных рынков средств защиты растений.

Use of Pesticides in the Agricultural Sector of Russia in the Context of the Development of Global Markets of Plant Protection Products

V. A. Zakharenko

Federal research center “Nemchinovka”

ul. Agrochemikov 6, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Novoivanovskoye 143026, Russia

E-mail: zwa@mosniish.ru

The state and prospects of pesticides use in Russia in connection with the development of global markets of plant protection products based on the materials of the “Ninth international conference “Pesticides 2019”, September 17, 2019, Moscow.

Key words: pesticides, agricultural sector of Russia, development of global markets of plant protection products.

УДК 631.5:631.8:633.11“321”(470.51/.54)

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ В ЗАУРАЛЬЕ¹

© 2020 г. С. Д. Гилев^{1,*}, И. Н. Цымбаленко¹, А. Н. Копылов¹,
Ю. В. Суркова¹, В. П. Ефремов¹

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

*E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

Поступила в редакцию 17.05.2019 г.

После доработки 22.05.2019 г.

Принята к публикации 08.08.2019 г.

Показана эффективность приемов интенсификации (применения удобрений, гербицидов, фунгицидов) возделывания яровой пшеницы сорта Зауралочка (местной селекции) в 3-польном зернопаровом севообороте на выщелоченных среднесуглинистых черноземах центральной лесостепной зоны Зауралья. На фоне гербицидов и удобрений, а в годы эпифитотий – и фунгицидов, яровая пшеница значительно превышала по урожайности и качеству зерна пшеницу, возделываемую без средств химизации. В процессе исследования были изучены и применены агроприемы, позволявшие снизить содержание остаточных количество пестицидов в зерне до максимально допустимого уровня. Расчет экономической эффективности по результатам исследования позволил установить наиболее эффективные технологии производства зерна пшеницы с высокими показателями качества.

Ключевые слова: зернопаровой севооборот, яровая пшеница, средства химизации, приемы интенсификации, пар черный, комбинированный, химический.

DOI: 10.31857/S0002188119120044

ВВЕДЕНИЕ

Проблема производства продуктов необходимого объема и хорошего качества имеет важнейшее значение для аграрного сектора страны. Научными исследованиями и производственной практикой установлено, что основой высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур являются современные интенсивные технологии. Научно обоснованное комплексное применение средств химизации обеспечивает оптимальное питание растений, защиту от фитопатогенов, яв-

ляясь гарантом стабильности и качества урожая, а также основным фактором сохранения почвенного плодородия. При низкой обеспеченности растений минеральным питанием и средствами защиты урожайность уменьшается в разы, снижается качество продукции и потенциальное плодородие почв [1]. Эта закономерность достаточно четко прослежена в длительных стационарах Курганского НИИСХ – филиала УрФАНЦ УрО РАН [2, 3], в опытах ученых Западной Сибири [4, 5] и Алтайского края [6].

Существует мнение, что необходимо внедрять систему “устойчивого сельского хозяйства” без средств химизации, к которому относится и органическое земледелие. Сторонники этого направления считают, что зерно пшеницы, выращенное без удобрений и средств защиты, экологически чистое, отличается высоким качеством, его можно использовать в диетическом питании и реализовывать по более высоким ценам [7]. По мнению [8], необходимость для перехода на экологические и экономически эффективные агротехнологии во всем мире давно уже назрела.

¹ Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – филиале УрФАНЦ УрО РАН в лаборатории земледелия в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования по направлению 142 Программы ФНИ государственных академий наук по теме № 0773-2019-0027 “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, интегрированной защиты растений, биологизации, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ и баз данных, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

В работе [9] достаточно четко обозначена суть проблемы, которая заключается в том, что агро-технологии, где наложен запрет на применение минеральных удобрений, пестицидов, регуляторов роста и других химических средств, не имеют объективного научного обоснования. По этому поводу высказано следующее: “Совмещение интенсификации и экологизации земледелия достигается лишь тогда, когда интенсификация приобретает адаптивный характер. Например, когда агрохимические ресурсы используются, прежде всего, как средства регулирования круговорота веществ в агроландшафтах, как фактор оптимизации севооборотов, освоения почвозащитных и минимальных систем обработки почвы, прямого посева и т.д.”.

В регионе Зауралья научных данных и практического опыта по производству экологически чистых продуктов растениеводства на фоне интенсивных приемов возделывания крайне мало. Поэтому цель работы — установить степень влияния приемов интенсификации (применения минеральных удобрений, гербицидов, фунгицидов и других средств) на продуктивность, качество зерна, экологическую безопасность и экономическую эффективность при возделывании основной продовольственной культуры Зауралья — яровой пшеницы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На центральном опытном поле Курганского НИИСХ в течение 2-х последних ротаций (2013–2018 гг.) 3-польного зернопарового севооборота (пар—пшеница—пшеница) на фоне современных высокоэффективных средств химизации разрабатывали интенсивные ресурсосберегающие технологии производства зерна яровой пшеницы сорта Зауралочка. В качестве экологических вариантов без удобрений и средств защиты изучали технологические агроприемы в системе черного пара.

Полевой эксперимент развернут по территории и во времени в системе 3-х видов паровых полей: черного (традиционного), химического и комбинированного. Традиционный пар: осенью после уборки урожая проводили вспашку на глубину 22–24 см и 4–5 культиваций летом по мере отрастания сорняков; пар химический: 2-кратная обработка глифосатсодержащими гербицидами (торнадо 500 или другими); пар комбинированный: 2 механические поверхностные обработки КПЭ-3,8, одна — баковой смесью гербицидов (глифосат + 2,4-Д). Под посев 2-й пшеницы в системе химического и комбинированного паров основную обработку почвы не проводили.

Минеральные удобрения (N60) применяли в 3-м поле севооборота. Контрольные варианты и первую пшеницу после пара не удобряли. В период кушения растений пшеницы проводили химическую прополку посевов баковой смесью гербицидов (2,4-Д и противозлаковых).

В годы эпифитотии листостебельных инфекций для защиты от болезней использовали фунгициды колосаль про (2016 г.) и титул дуо (2018 г.). В контрольных и экстенсивных вариантах опыта средства защиты не применяли. В зерне урожая 2016, 2017, 2018 гг. определяли остаточное количество пестицидов относительно максимально допустимых уровней (МДУ) по техническому регламенту Таможенного союза [10]. Исследования проводили в лаборатории филиала Российского сельскохозяйственного центра Тюменской обл.

В полевых экспериментах наблюдения, учеты, сопутствующие исследования проводили по общепринятым методикам. Качество клейковины и ее количество определяли в технологической лаборатории института (ГОСТ Р 54478-2011), содержание белка и микроэлементов — в лаборатории ГСАС “Курганская”. Математическую обработку полученных данных делали в программах Excel и Statistica 6.0, а также методом дисперсионного анализа по [11], экономическую оценку технологий — в программе, разработанной лабораторией экономики и инновационного развития Курганского НИИСХ.

Климат центральной лесостепной зоны Зауралья характеризуется неустойчивым увлажнением с периодически повторяющимися засухами. В период с 2013 по 2018 гг. гидротермические условия вегетационных периодов отличались засушливостью. В 2013 г. засуха проявилась в июне и в 2-х декадах июля (ГТК = 0.3 и 0.4). В мае и июне 2014 г. практически не было эффективных осадков (свыше 5.0 мм). В 2015 г. атмосферные засушливые явления особо проявились в июне, в этот период среднемесячная температура превысила норму на 3.7°C, ГТК составил 0.3. В мае 2016 г. выпало 9.5 мм осадков при норме 35 мм, в результате сложились неблагоприятные условия для всходов. За первые 2 декады июля количество осадков превысило норму в 3 раза, что вызвало активное развитие мучнистой росы, бурой листовой и стеблевой ржавчин. Вегетационный период 2017 г. в целом был благоприятным по гидротермическим условиям, ГТК составил 1.2. Однако в результате недобора тепла и обилия влаги в фазе формирования зерна сложились оптимальные условия для развития листовых инфекций, что привело к снижению урожайности в вариантах без средств защиты. 2018 г. по условиям тепло- и

Таблица 1. Влияние технологий возделывания на урожайность и качество зерна яровой пшеницы (2013–2018 гг.)

Технология возделывания (подготовка пара или обработка под 2-ю пшеницу)	Урожайность, ц/га			Качество зерна			
	Фактор А	Фактор Б	прибавка	содержание клейковины, %		ИДК, ед.	
				Фактор А	Фактор Б	Фактор А	Фактор Б
Пшеница после пара							
Черный пар	15.5	22.1	6.6	28.0	29.8	93.7	91.1
Комбинированный пар	12.8	20.2	7.4	27.4	30.8	87.8	96.3
Химический пар	13.1	18.5	5.4	28.3	30.4	78.8	91.1
Вторая пшеница							
Вспашка	14.1	19.5	5.4	25.2	29.0	83.6	96.7
Без обработки	11.6	18.9	7.3	24.6	28.3	80.0	93.7
Без обработки	10.6	15.8	5.2	24.3	29.3	67.8	83.4
Среднее в севообороте							
Черный пар/Вспашка	14.8	20.8	6.0	26.6	29.4	88.7	93.9
Комбинированный пар/Без обработки	12.2	19.6	7.4	26.0	29.6	83.9	95.0
Химический пар/Без обработки	11.9	17.2	5.3	26.3	29.9	73.3	87.3

HCP_{05} фактора А – 1.5, фактора Б – 1.8 ц/га

Примечание. Фактор А – без средств химизации, фактор Б – интенсивный фон (N60 + глифосат до посева (кроме отвальной системы обработки) + баковая смесь гербицидов + фунгицид в период вегетации). То же в табл. 2, 4.

влагообеспеченности был близким к среднепогодным показателям, в то время как июнь и июль оказались засушливыми (ГТК = 0.70 и 0.66 соответственно).

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднесуглинистый маломощный малогумусный (4–5%). Сумма поглощенных оснований в пахотном слое почвы менялась от 18 до 27 мг-экв/100 г почвы, PH_{KCl} 6.4–6.5. Содержание валового азота – 0.24%, гидролизующего (по Тюрину и Кононовой) – 11.7 мг/100 г почвы, подвижных форм фосфора в слое 0–40 см – 6.3 мг (по Чирикову), калия – до 19.7 и более мг/100 г почвы (по Масловой).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексное применение средств интенсификации (минеральных удобрений, гербицидов и фунгицидов) за анализируемый период (2013–2018 гг.) обеспечило максимальную (в пределах ресурсов климата) урожайность зерна яровой пшеницы. В среднем в севообороте уровень урожайности варьировал от 17.1 ц/га в системе химического пара до 21.2 ц/га – черного против 11.6–15.0 ц/га в вариантах без средств химизации (табл. 1).

Первая и вторая пшеницы севооборота, возделываемые на фоне комплексных интенсивных приемов, существенно превышали по урожайно-

сти и количеству клейковины в зерне пшеницы, возделываемую без средств химизации в системе изученных видов паров: черного – соответственно на 6.6 и 5.4 ц/га (на 42.6 и 38.3%); комбинированного – на 7.4 и 7.3 ц/га (на 57.8 и 62.9%); химического – на 5.4 и 5.2 ц/га (на 41.2 и 49.1%).

Аналогичную закономерность наблюдали и в среднем в севообороте. В вариантах черного пара преимущество интенсивной технологии составило 6.0 ц/га, или 40.5%, комбинированного пара – соответственно 7.4 ц/га (60.7%), химического пара – 5.3 ц/га (44.5%).

Лабораторными исследованиями установлено, что в зерне яровой пшеницы, возделываемой на интенсивном фоне, не выявлено отрицательного влияния азотных удобрений, гербицидов и фунгицида на показатели качества, включая количество белка в зерне и качество клейковины. Напротив, содержание сырой клейковины в зерне яровой пшеницы на фоне применения азотных удобрений и средств защиты увеличилось на 1.8–3.4% после парового предшественника и на 3.7–5.0% после зернового предшественника по сравнению с вариантами без средств химизации. Клейковина зерна интенсивных фонов, как и без средств химизации, отвечала требованиям 2-й группы качества. Не отмечено существенной разницы и в содержании минеральных веществ. Зерно пшеницы в большем количестве содержало фос-

Таблица 2. Содержание белка, макроэлементов (%), микроэлементов (мг/кг) в зерне яровой пшеницы в зависимости от технологии возделывания и предшественника (2017–2018 гг.)

Показатель	По Либиху [12]	Технология возделывания			
		Экстенсивная (А)		Интенсивная (Б)	
		пар	зерновые	пар	зерновые
Белок	—	9.69	9.7	12.9	12.4
P ₂ O ₅	0.79	0.5	0.5	0.46	0.57
K ₂ O	0.52	0.55	0.5	0.48	0.44
Mg	0.20	0.25	0.25	0.25	0.22
Ca	0.05	0.09	0.11	0.09	0.06
Cu	—	6.4	4.8	6.4	4.4
Zn	—	30.1	33.3	33.1	35.1
Mn	—	21.0	20.0	20.7	19.0

фор, калий и магний, в меньшем — кальций, что было близким к средним показателям, полученным еще 150 лет назад немецким ученым Ю. Либихом [12].

Равноценными были показатели содержания основных микроэлементов. В зерне содержалось наибольшее количество цинка и марганца, меньше — меди (табл. 2). Следовательно, зерно яровой пшеницы, выращенной без средств химизации, по содержанию макро- и микроэлементов не отличалось от зерна пшеницы, возделываемой с применением современных средств интенсификации, а по содержанию белка значительно уступало зерну интенсивного фона.

Наряду с изучением продуктивности пшеницы и качества зерна, в 2016–2018 гг. были разработа-

ны приемы, обеспечивающие безопасное производство растениеводческой продукции. Установлено, что в зерне пшеницы урожая 2016 г., возделываемой по технологиям с комплексным применением средств химизации, обнаружено остаточное количество примененных пестицидов. Меньше максимально допустимого уровня находилось содержание глифосата, метсульфурон-метила, феноксапроп-*n*-этила и пропиконазола (табл. 3).

В то же время для гербицида эстерон и фунгицида колосаль про в зерне урожая 2016 г. установлено превышение максимально допустимого количества д.в. препаратов 2,4-Д и тебуконазола. Полученные результаты в последующих полевых экспериментах и лабораторных исследованиях (2017, 2018 гг.) позволили разработать приемы корректировки видов, доз, сроков применения пестицидов, обеспечивающие исключение рисков загрязнения зерна вышеприведенными препаратами [13]. Вместо чистого препарата эстерон его стали применять в пониженных дозах (0.2–0.3 л/га) в составе баковых смесей с сульфонилмочевинами. Этот прием исключил наличие в зерне остаточного количества 2,4-Д.

Не обнаружено остаточного количества тебуконазола при переносе срока обработки фунгицидом колосаль про с поздней фазы колошения на более раннюю фазу флагового листа. Преимущество переноса обработки фунгицидом подтвердили исследования ВНИИ защиты растений, в которых было установлено, что после применения фунгицидов на основе тебуконазола и пропиконазола на 40-е сут остаточное количество д.в. препаратов в зерне пшеницы отсутствовало [14].

Расчет экономической эффективности агротехнологий по ценам на зерно пшеницы, которые

Таблица 3. Содержание остаточных количеств пестицидов в зерне пшеницы, возделываемой в зернопаровом севообороте с применением средств химизации (2016 г.), мг/кг

Пар и способ основной обработки почвы	Глифосат	2,4-Д	Метсульфуронметил	Феноксапроп- <i>n</i> -этил	Пропиконазол	Тебуконазол*
Максимально допустимый уровень (МДУ)	3.0	Не допускается	0.05	0.01	0.1	0.2
Пшеница после пара						
Черный пар	0.08	0.13	<0.01	<0.01	<0.01	0.70
Комбинированный пар	0.028	0.14	<	<	<	0.15
Химический пар	0.06	0.16	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
Вторая пшеница после пара на фоне N60						
Вспашка	0.01	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	0.30
Без обработки почвы	0.04	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	0.24

*Фунгицид колосаль про в фазе колошения пшеницы.

Таблица 4. Показатели экономической эффективности агротехнологий (средние в севообороте, 2013–2018 гг.)

Подготовка пара/обработка под 2-ю пшеницу	Вид технологии	Урожайность, ц/га	Всего затрат, руб./га	Себестоимость, руб./ц	Прибыль, руб./га
Черный пар/Вспашка	А	14.8	8705	585	4016
	Б	20.8	13429	648	4449
Пар/Без обработки	А	12.2	7445	605	3041
	Б	19.6	12202	624	4601
Химический пар/Без обработки	А	11.9	7014	586	3171
	Б	17.2	11677	685	3064

сложились в период 2013–2018 гг., показал, что наиболее дешевое зерно пшеницы с себестоимостью 585 руб./ц можно производить в зернопаровом короткоротационном севообороте по классической (отвальной) технологии без средств химизации (табл. 4).

Аналогичный уровень себестоимости зерна (586 руб./ц) получен и в системе химического пара, без применения средств химизации в полях севооборота за исключением обработки парового поля. Однако прибыль с 1 га посевной площади значительно больше была в экстенсивных вариантах классической технологии (4016 руб./га против 3171 руб./га). Максимальная прибыль (4601 руб./га) получена в системе комбинированного пара с применением приемов интенсификации во всех полях севооборота. Затраты на средства химизации в этом случае окупались высокой прибавкой урожайности (7.4 ц/га). Следовательно, система комбинированной обработки почвы в паровом поле с применением химических средств и механических приемов при возделывании яровой пшеницы позволила вести более прибыльное производство качественного зерна по сравнению с классической и нулевой технологиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что средства интенсификации существенно увеличивали продуктивность яровой пшеницы и улучшали качество зерна в условиях короткоротационных зернопаровых севооборотов. В среднем за 2 ротации 3-польного зернопарового севооборота за счет интенсификации технологических приемов яровая пшеница превысила по урожайности пшеницу, возделываемую в системе черного пара без средств химизации, на 40.5%, химического и комбинированного пара — на 44.5 и 60.7% соответственно. Содержание сырой клейковины в зерне при применении интенсивных технологий увеличилось на 1.8–3.4% после парового предшественника и на 3.7–5.0% —

после зернового. При выращивании пшеницы по технологии экологического земледелия (черный пар, вспашка под вторую пшеницу) без удобрений и пестицидов урожайность в 3-польном зернопаровом севообороте не превысила 14.8 ц/га. Этот уровень урожайности более чем на 40% меньше по сравнению с вариантами интенсивной технологии без преимущества в качестве зерна. Следовательно, при возделывании яровой пшеницы в центральной зоне Курганской обл. на щелоченных черноземах без средств химизации товаропроизводители теряют до 40% урожая, не улучшая качество зерна. При научно обоснованном подходе к применению удобрений и средств защиты растений загрязнение зерна яровой пшеницы пестицидами выше допустимых норм не происходит. Максимальную прибыль (4600 руб./га) обеспечила технология с комбинированным паром на фоне приемов интенсификации во всех полях зернопарового севооборота.

Следует отметить, что интенсификация зернового производства требует значительных средств на совершенствование систем удобрения и защиты растений, обеспечивающих стабильную урожайность, высокое качество продукции, экологическую безопасность и экономическую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад директора Департамента растениеводства, химизации и защиты растений Минсельхоза России П.А. Чекмарева на Всероссийском агрономическом совещании [Электр. ресурс]. Дата публикации 10.03.2015 г. URL: <https://www.apk-news.ru/doklad-direktora-departamenta-rastenievodstva-himizatsii-i-zashchityi-rasteniy-minselhoza-rossii-p-a-chekmareva-na-vsrossiyskom-agronomichesk-om-soveshhanii-na-temu-itogi-raboty-i-otrasli-ra/> (дата обращения 04.12.2018).
2. Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья / Под ред. Вольнкиной О.В. Куртамыш, 2017. С. 142–143.

3. Гилев С.Д., Цымбаленко И.Н., Суркова Ю.В. Продуктивность и экономическая эффективность короткоротационных зернопаровых севооборотов в центральной лесостепной зоне Зауралья // *Земледелие*. 2016. № 6. С. 8–11.
4. Захаров Г.М., Каличкин В.К., Малыгин А.Е. Урожайность пшеницы в зависимости от предшественников, условий года и средств интенсификации // *Земледелие и химизация*. 2012. № 1. С. 5–13.
5. Паршутин Е.И., Чибис В.В. Влияние средств интенсификации и предшественников на урожайность яровой пшеницы в условиях южной лесостепи Западной Сибири // *Вестн. АлтайГАУ*. 2011. № 12 (86). С. 23–26.
6. Семендяева Н.В., Ковешникова Л.А., Крупская Т.Н. Водопрочность структуры и содержание гумуса в черноземах выщелоченных Новосибирского Приобья в различных севооборотах // *Вестн. АлтайГАУ*. 2010. № 6 (68). С. 31–36.
7. Любовецкий Я.М. Цены на органическую продукцию на мировых рынках (электр. ресурс). sozrf.ru (дата обращения 04.12.2018).
8. Пыхтин И.Г. Соображение о содержании будущих технологий возделывания полевых культур // *Сб. докл. Междунаро. научн.-практ. конф. и школы молод. ученых, посвящ. году экологии и 50-летию выхода постановления о борьбе с эрозией почвы*. Курск: ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии, 2017. С. 234–238.
9. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. *Агротехнологии*. Учебник. СПб.: Изд-во “Лань”, 2015. 464 с.
10. Технический регламент таможенного союза “О безопасности зерна” ТРТС 015/2011 (с изменениями на 16 мая 2016 г.).
11. Доспехов Б.А. *Методика полевого опыта*. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
12. Либих Ю. *Химия в применении к земледелию и физиологии*. М.: Сельхозгиздат, 1936. 406 с.
13. Гилев С.Д., Цымбаленко И.Н., Копылов А.Н., Кекало А.Ю., Филиппов А.С. Приемы снижения остаточных количеств пестицидов в зерне при возделывании яровой пшеницы по ресурсосберегающим технологиям // *Агрохим. вестн.* № 4. С. 63–67.
14. Гришечкина Л.Д. Фунгициды на основе тебуконазола в борьбе с фузариозом колоса хлебных злаков // *Зерн. хоз-во России*. 2012. № 22(4). С. 59–64.

Agroecological and Economic Indicators of Spring Wheat Cultivation with the Use of Chemicals in the Trans-Urals

S. D. Gilev^{a, #}, I. N. Tsymbalenko^a, A. N. Kopylov^a, Yu. V. Surkova^a, and V. P. Efremov^a

^a Ural Federal Agricultural Research Center, Ural division, RAS
ul. Belinskogo 112a, Yekaterinburg 620142, Russia

[#]E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

It was shown the efficiency of methods of intensification (use of fertilizers, herbicides, fungicides) of spring wheat varieties Zauralochka (local selection) in the 3-dipole grain-fallow crop rotation on leached medium loam Chernozem of Central forest steppe zone of Trans-Urals. Against the background of herbicides and fertilizers, and in the years of epiphytotics — and fungicides, spring wheat is much higher in yield and grain quality wheat cultivated without chemicals. In the course of the study, agricultural practices were studied and applied to reduce the content of residual pesticides in the grain to the maximum permissible level. The calculation of economic efficiency according to the results of the study allowed to establish the most effective technologies for the production of wheat with high quality indicators.

Key words: grain-fallow crop rotation, spring wheat, tools, chemicals, techniques of intensification, black, combination, chemical vapor.

УДК 550.42:577.170.49 (571.54)

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПЫРЕЕ В ЗАПАДНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ¹

© 2020 г. В. К. Кашин

*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия*

E-mail: kashin-39@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 26.04.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Изучено среднее содержание и диапазоны варьирования 15-ти микроэлементов в надземной массе пырея ползучего, произрастающего в разных фитоценозах на разных типах почв. Выявлено, что Zn являлся наиболее дефицитным элементом, содержание Mo на 4-х пробных площадках (ПП) было в норме, на 6-ти – в избытке, содержание Cu на 5-ти ПП было недостаточным, на 5-ти ПП – в норме, содержание Cr и Ba на всех 10-ти ПП было избыточным. Содержание Li, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Sr, Zr в основном было в пределах нормы. По интенсивности биологического поглощения пыреем из почвы Mo и Cu отнесены к группе высокой, Li и Zn – средней, Mn, Ba, Co, Cr, Ni, Pb – низкой, V, Zr, Ti, Fe – очень низкой интенсивности.

Ключевые слова: микроэлементы, пырей, коэффициент биологического поглощения, Забайкалье.

DOI: 10.31857/S0002188120030072

ВВЕДЕНИЕ

Пырей произрастает в естественных условиях как дикорастущее растение и используется в культурных посевах. Пырей широко распространен в различных фитоценозах на разных типах почв на лугах, в степях, полях, на залежах, песках и галечниках по долинам рек, устойчив к засухе и холоду, в том числе в криолитозоне [1–3].

Пырей является ценным кормовым растением, а также используется как лекарственное растение. С лечебной целью в научной медицине применяют корневище пырея как обволакивающее (в нем содержится слизь), мочегонное и легкое слабительное средство. В народной медицине препараты из корневища используют при геморрое, воспалениях мочеиспускательного канала, желчекаменной болезни, камнях в почке, желтухе и водянке. Препараты из пырея являются сильным лечебным средством при часто возникающих фурункулах [4].

Что касается содержания в пырее микроэлементов, то сведения об этом ограничены. Например, в Южном Прибайкалье содержание 4-х микроэлементов в пырее составляло: Al – 410, Fe –

270, Sr – 40, Mn – 90 мг/кг [5]. В пырейно-полевицевом сене в Заиграевском р-не Бурятии содержание Fe было равно 160, Mn – 26, Cu – 4.3, Co – 0.18, Zn – 7.0 мг/кг сухой массы [6]. Имеются данные о содержании в сене злаковом с пыреем Fe, Mn, Cu, Co, Zn, Mo, I [7]. В то же время известно, что некоторые микроэлементы – важнейшие компоненты функционирования живых организмов, а некоторые относятся к токсичным, поэтому с практической точки все они должны учитываться при оценке качества кормовых и лекарственных растений. Цель работы – определение содержания ряда жизненно необходимых (Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Mo) и недостаточно изученных (Li, Ti, V, Cr, Ni, Sr, Zr, Ba, Pb) микроэлементов в растениях пырея, произрастающих на разных типах почв Западного Забайкалья, и интенсивности их поглощения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в 12 районах Республики Бурятия в лесостепных, степных, сухостепных и пойменных ландшафтах, расположенных в бассейне р. Селенги – главного притока оз. Байкал. На этой территории сосредоточено основное количество населения Бурятии, производится сельскохозяйственная продукция и на ней распо-

¹ Работа выполнена в рамках темы госзадания. Номер госрегистрации: АААА-А17-117011810038-7.

Таблица 1. Статистические показатели валового содержания микроэлементов в почвах, на которых произрастал пырей ползучий

Элемент	Содержание, мг/кг			V, %
	$M \pm m$	Lim	Кларк	
Li	25 ± 0.9	20–33	21/25	16
Ti	4730 ± 250	2100–6000	4400/5000	23
V	85.0 ± 5.0	50–115	129/90	23
Cr	55.0 ± 5.0	33–98	60/70	35
Mn	713 ± 46	450–910	900/1000	25
Fe	44700 ± 1800	29200–59500	–/40000	17
Co	10.3 ± 0.3	9–12	10/8	9
Ni	27.3 ± 2.4	12–49	29/50	34
Cu	25.4 ± 2.4	15–49	39/30	38
Zn	70 ± 6.2	38–100	70/90	35
Zr	288 ± 15	150–380	267/400	22
Mo	3.0 ± 0.28	1.2–4.8	1.5/1.2	41
Ba	1000 ± 24	805–1270	460/500	10
Pb	32 ± 1.4	21–43	15/12	17

Примечание. Над чертой – кларк по [12], под чертой – кларк по [23].

ложены крупные промышленные узлы, в числе которых предприятия по производству стекла, цемента, ТЭЦ, являющихся источниками выбросов в окружающую среду химических элементов.

Объектом исследования служили растения пырея ползучего (*Elytrigia repens* (L.) Nevski) из семейства Злаковые (Poaceae), произраставшие на черноземах дисперсно-карбонатных (Chernozems), каштановых (Kastanozems) и аллювиальных (Fluvisols) почвах. Методики отбора проб почв и растений, подготовка их к анализам опубликованы ранее [8].

Содержание микроэлементов в почвах и зольном остатке растений после сухой минерализации проб при температуре 480°C определяли в аттестованном на техническую компетентность Аналитическом центре Республики Бурятия: Mn, Cu, Zn, Ni, V, Cr, Pb – атомно-абсорбционным методом, Fe, Ti, Sr, Ba, Mo, Zr – методом атомно-эмиссионной спектроскопии с плазменным источником возбуждения. Погрешность анализа 7–10%. Для калибровки и контроля точности измерения использованы государственные стандартные образцы состава почв и золы растений. Аналитическая повторность трехкратная. О биологической доступности микроэлементов в почвах судили по коэффициенту биологического поглощения (**КБП**) – отношению содержания элемента в золе растений к валовому содержанию его в

почве [9]. Статистическая обработка результатов проведена стандартными методами с расчетом среднего арифметического (M), его стандартной ошибки (m), пределов изменений, коэффициента вариации (V) с использованием программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Статистические показатели содержания микроэлементов в почвах, на которых произрастал пырей, представлены в табл. 1. Все приведенные данные находятся в пределах нормального варьирования [10]. Содержание в почвах Li, Ti, V, Fe, Co, Zr, Ba, Pb было в пределах нижней нормы варьирования (9–23%), а Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Mo – в пределах верхней нормы (25–41%). Сравнение с кларками элементов в почвах, принимаемыми за эколого-геохимическую норму [11], показало, что средние содержания Li, Ti, V, Fe, Zr в изученных почвах практически соответствуют их кларкам. Повышенное содержание выявлено для Pb, Ba и Mo – в 2.0–2.2 раза и пониженное – Mn – в 1.3, V и Cu – в 1.5 раза [12], что обусловлено преобладанием в качестве коренных пород в регионе гранитоидов, относящихся к породам кислой группы [13].

Оценка содержания микроэлементов в почвах с санитарно-гигиеническими критериями [14] показала уровень ПДК в среднем только для Pb, что связано с высоким содержанием его в полевых шпатах (как и Ba), которые являются одним из основных пороодообразующих минералов в почвах Забайкалья – до 40–50% [15, 16] и минералов-носителей этих элементов за счет изоморфного замещения ими калия. Однако биологическая доступность Pb в почвах низкая, о чем свидетельствовал его КБП – в среднем 0.27 ± 0.02 . КБП Ba был значительно больше – 0.77 ± 0.06 , но он по Российскому общетоксикологическому нормативу относится к 3-му классу – малоопасным элементам.

Геохимическая структура изученных элементов в почвах представлена в следующем ряду: $Fe > Ti > Ba > Mn > Zr > V > Zn > Cr > Pb > Ni > Cu = Li > Co > Mo$.

Статистические показатели содержания микроэлементов в надземной массе пырея – средние величины, диапазоны их варьирования и коэффициенты вариации представлены в табл. 2. Содержание Li, Pb, Sr находилось в пределах нормального варьирования (нижней нормы – 14–18%); Co, Cr, V, Ba, Fe, Zr, Mo – в пределах верхней нормы (26–44%); Mn, Cu, Ti – значительного (46–64%); Zn – большого (73%) и Ni очень большого варьирования.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в надземной массе пырея полученного на разных типах почв, мг/кг сухого вещества

Тип почвы, № разреза, село	Li	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Mo	Ba	Pb
Чернозем, 54 Кж, Чесан	1.35	32.0	1.28	1.92	25.6	128	0.60	0.51	1.28	6.6	64	0.77	0.96	45	0.38
Каштановая, 33 М, Шаралдай	1.28	12.5	0.64	2.90	34.8	116	0.58	0.87	7.40	23.2	46	1.91	1.62	35	0.58
То же, 60 Д, Белоозерск	1.70	18.9	1.26	2.52	18.9	252	0.19	0.19	1.30	6.3	63	2.52	2.52	50	0.50
Аллювиальная дерновая, 19 К, Усть-Кяхта	1.92	6.4	0.70	3.84	51.2	65	0.51	0.64	6.40	6.4	51	0.64	1.92	52	0.51
То же, 24 Т, Надеено	1.07	15.6	0.62	3.20	52.0	104	0.42	2.08	5.20	10.4	42	1.56	1.46	52	0.62
—//—, 30 Б, М. Куналей	1.43	16.3	0.53	2.12	53.5	159	0.48	2.15	5.57	31.8	41	1.59	1.70	53	0.58
—//—, 52 Кж, Кижинга	1.24	31.0	0.56	1.86	12.4	186	0.62	0.50	1.86	6.5	62	0.62	3.10	31	0.50
—//—, 55 З, Унэгтэй	1.75	23.1	0.77	1.16	57.0	185	0.46	0.23	2.31	7.7	66	1.54	1.54	62	0.54
—//—, 59 Д, Петропавловка	1.41	28.2	0.94	2.35	23.5	141	0.42	0.19	1.41	7.1	47	1.41	2.82	24	0.42
Аллювиальная луговая, 40 К, Октябрьский	1.33	9.4	0.46	1.38	23.0	47	0.32	0.55	6.92	14.0	67	2.30	1.43	46	0.55
Среднее	1.53 ± 0.07	19.3 ± 2.8	0.78 ± 0.09	2.33 ± 0.26	35.0 ± 5.3	138 ± 19	0.44 ± 0.04	0.84 ± 0.23	4.00 ± 0.81	12.0 ± 2.8	56 ± 2.9	1.49 ± 0.21	1.91 ± 0.22	45 ± 3.7	0.51 ± 0.03
Пределы изменений	1.07—1.92	6.4—32	0.46—1.28	1.16—3.84	12.4—57.0	47—252	0.19—0.60	0.19—2.15	1.28—7.40	6.3—31.8	41—67	0.62—2.52	0.96—3.10	24—62	0.38—0.62
Коэффициент вариации, %	14	46	38	35	47	44	29	92	64	73	18	44	36	26	15
Норма или кларк	1.5	32.5	0.4—1.5	0.4—0.6	40—60	50—80	0.3—0.8	0.4—1.7	6—10	30—50	50—60	7.5	0.5—1.5	17—20	1.25
Избыток	5.0	200	5.0	5.0	500	300	3.0	3.0	20	400	—	15	3.0	500	6.0
Дефицит	—	—	—	—	<20	<25	0.2	—	<5	>20	—	—	0.2	—	—

Примечание. Норма или кларк, избыток и дефицит приведены по [12, 17, 18]. Прочерк — нет данных.

ния (92%) [10]. Это обусловлено разной степенью подвижности микроэлементов в почвах и разной степенью транслокации их в надземные части растений.

Показано, что среднее содержание изученных элементов в пырее различалось на 3 порядка: от 0.44 (Co) и 0.84 (Ni) до 138 (Fe) мг/кг. По их среднему содержанию в растительности микроэлементы можно условно подразделить на следующие группы (мг/кг): высокого содержания — Fe (138), повышенного — Sr, Mn, Ba (35–56), среднего — Ti, Zn (12–19), низкого — Cu, Cr, Mo, Zr, (1.49–4.0), очень низкого содержания — Li, V, Co, Ni, Pb (0.44–0.84). По степени снижения среднего содержания в пырее элементы представлены в следующем ряду: Fe > Sr > Ba > Mn > Ti > Zn > Cu > Cr > Mo > Zr > Ni > V > Li > Pb > Co, который существенно отличался от геохимического ряда содержания многих элементов в почвах.

Содержание Li в пырее варьировало в незначительном диапазоне — 1.07–1.92 мг/кг при средней величине 1.53 мг/кг и самом низком коэффициенте вариации 14%. Среднее содержание Li в пырее соответствовало среднему содержанию его в растительности континентов [17].

Содержание Ti в пырее изменялось от 6.4 до 32 мг/кг при среднем количестве 19.3 мг/кг. Самые низкие концентрации элемента выявлены в пырее, произраставшем на каштановой легкосуглинистой почве с. Шаралдай, аллювиальной луговой легкосуглинистой почве с. Надеено и аллювиальной дерновой легкосуглинистой почве с. Октябрьское. На 3-х пробных площадках (ПП) содержание Ti в пырее достигало его кларкового содержания в растительности. На остальных 5-ти ПП содержание Ti составляло 12.5–23.1 мг/кг. Нормальное содержание Ti в растениях составляет 15–80 мг/кг, а избыточное — 200 мг/кг [12]. Исходя из этих величин, можно заключить, что содержание Ti в пырее в основном низкое.

Содержание V в пырее варьировало в пределах 0.46–1.28 мг/кг, при среднем 0.78 мг/кг. На 2-х ПП содержание V в пырее составляло 1.26–1.28 мг/кг, на 8-ми — 0.46–0.94 мг/кг. Нормальное содержание V в растениях находится в пределах 0.4–1.5 мг/кг, избыточное — 5 мг/кг и более [17, 18]. Сравнивая содержание V в пырее с этими критериями, можно считать, что оно соответствует нормальным показателям.

Содержание Cr в пырее изменялось от 1.16 до 3.84 мг/кг, при средней величине 2.33 мг/кг. Нормальное содержание Cr в растениях — 0.4–0.6 мг/кг, избыточное — 5 мг/кг и более [12, 18]. На 2-х ПП содержание Cr в пырее было 3.20–3.84,

на 4-х — 2.12–2.90, на остальных 4-х ПП — 1.16–1.92 мг/кг. Таким образом, хотя содержание Cr в пырее не достигало избыточных величин, тем не менее оно было значительно больше нормы.

Изменения в содержании Mn в пырее составляли 12.4–57 мг/кг, (среднее — 35 мг/кг). Нормальное содержание Mn в растениях — 40–60 мг/кг [18, 19], избыток — 500 мг/кг [20]. На 4-х ПП содержание Mn в пырее находилось в пределах нормы, на 4-х ПП — 23.0–34.8 мг/кг, что меньше нормы в 0.5–0.7 раза, на 2-х ПП оно было дефицитным.

Содержание Fe в пырее варьировало в пределах 47–252 мг/кг (среднее — 138 мг/кг). Нормальное содержание Fe в растениях — 50–80 мг/кг, избыток 300 мг/кг [18, 20]. На 2-х ПП содержание Fe в пырее было в норме (47–65 мг/кг), на 8-ми ПП — больше нормы в 2–4 раза, но оно было значительно меньше избыточного содержания.

Изменения в содержании Co в пырее были наименьшими по сравнению с другими микроэлементами — 0.19–0.60 мг/кг при среднем 0.44 мг/кг. Норма содержания Co в растениях — 0.3–0.8 мг/кг, избыток — 3 мг/кг [12, 20]. На одной ПП содержание Co в пырее было в дефиците, на остальных 9-ти ПП — в пределах нормы.

Содержание Ni в пырее изменялось в наибольшей степени по сравнению с другими микроэлементами — от 0.19 до 2.15 мг/кг (среднее — 0.84 мг/кг) и коэффициенте вариации 92%. Нормальное количество Ni в растениях — 0.4–1.7 мг/кг, избыток — 3 мг/кг [12, 21]. На 3-х ПП содержание Ni в пырее было меньше нормы, на 5-ти ПП находилось в пределах нормы, на 2-х ПП — больше нормы, но не достигало избытка.

Содержание Cu в пырее варьировало в значительной степени — от 1.28 до 7.7 мг/кг (среднее — 4.0 мг/кг). Нормальное содержание Cu в растениях равно 6–10 мг/кг, избыток — 20, дефицит <5 мг/кг [12, 18, 20]. Исходя из этого, можно отметить, что на 5-ти ПП содержание Cu в пырее было дефицитным, на 5-ти ПП — в пределах нормы.

Содержание Zn в пырее отмечено в пределах 6.3–31.8 мг/кг (среднее — 12.0 мг/кг) и при значительном коэффициенте вариации 73%. Норма содержания Zn в растениях равна 30–50 мг/кг, избыток — 400, дефицит <20 мг/кг [18–20]. На 8-ми ПП содержание Zn в пырее было в дефиците, на 2-х ПП — в пределах нормы. Следовательно, Zn являлся наиболее дефицитным элементом в растениях пырея.

Содержание Sr в пырее изменялось от 41 до 67 мг/кг при среднем 56 мг/кг и низком коэффициенте вариации 18%. Норма Sr в растениях —

50–60 мг/кг [18]. На всех 10-ти ПП содержание Sr в пырее практически соответствовало норме.

Количество Zr в пырее составляло 0.62–2.52 мг/кг (среднее – 1.49 мг/кг). Цирконий – мало изученный в растениях элемент. Среднее содержание его в растительности суши равно 7.5 мг/кг [17], избыток – 15 мг/кг [12]. Пределы нормальных содержаний не определены. Содержание Zr в пырее в сравнении с этими показателями было очень низким.

Содержание Mo в пырее варьировало в пределах 0.96–3.10 мг/кг (среднее – 1.91 мг/кг). Норма Mo в растениях – 0.5–1.5, избыток – 3, недостаток – 0.2 мг/кг [19, 20]. На 4-х ПП содержание Mo в пырее практически соответствовало норме (0.96–1.54 мг/кг), на 5-ти ПП наблюдали превышение содержания Mo в пырее по сравнению с нормой, на одной ПП оно было избыточным.

Содержание Ba в пырее менялось от 24 до 62 мг/кг (среднее – 45 мг/кг). Норма содержания Ba в растениях равна 17–20 мг/кг, избыток – 500 мг/кг [12, 18]. На одной ПП содержание Ba в пырее было равно норме, на 9-ти ПП – в 1.8–3.1 раза больше нормы, но значительно меньше избыточной концентрации.

Содержание Pb в пырее изменялось от 0.38 до 0.62 мг/кг (среднее – 0.51 мг/кг) и низком коэффициенте вариации 15%. Нормальное (кларк) содержание Pb в растениях равно 1.25–2.0 мг/кг [12, 17]. ПДК Pb в лекарственных растениях – 6 мг/кг [СанПиН 2.3.2.1078]. На всех ПП содержание Pb в пырее было в норме.

Таким образом, из 15-ти изученных микроэлементов в пырее большинство из них (Li, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Sr, Zr, Pb) по среднему содержанию находилось практически в пределах нормы; содержание Zn на 8-ми ПП было в дефиците, на 2-х ПП – в норме; содержание Cu на 5-ти ПП было в дефиците, на 5-ти в норме; содержание Mo на 4-х ПП было в норме, на 6-ти ПП – в 2.0–3.1 раза больше нормы, содержание Cr, Ba было больше нормы практически на всех ПП. Следовательно, Zn являлся наиболее дефицитным элементом, Cr, Ba – наиболее избыточными, а в содержании Cu отмечены недостаток и норма в равном числе ПП.

Особую значимость имело соотношение Cu : Mo и Fe : Zn. В нормально обеспеченных растениях оно равно 12–16 и 1.5–1.7 соответственно [17, 19], в пырее же соотношение Cu к Mo в среднем было равно 2.1, Fe к Zn – 11.5, что на порядок меньше нормального соотношения.

Причина подобных различий в накоплении элементов может заключаться в разных уровнях и биодоступности микроэлементов в почвах, степе-

Таблица 3. Статистические показатели коэффициентов биологического поглощения микроэлементов растениями пырея ползучего

Элемент	<i>n</i>	$M \pm m$	Пределы	<i>V</i> , %
Li	7	1.28 ± 0.082	1.07–1.61	17
Ti	10	0.08 ± 0.014	0.02–0.15	60
V	10	0.14 ± 0.014	0.09–0.20	32
Cr	10	0.67 ± 0.044	0.52–0.94	21
Mn	10	0.75 ± 0.123	0.33–1.38	52
Fe	10	0.06 ± 0.009	0.02–0.12	52
Co	5	0.84 ± 0.056	0.58–0.89	17
Ni	8	0.38 ± 0.031	0.30–0.58	23
Cu	8	4.22 ± 0.863	1.33–7.14	62
Zn	10	2.33 ± 0.305	1.28–4.45	41
Zr	10	0.11 ± 0.018	0.03–0.20	54
Mo	10	9.12 ± 1.083	3.33–16.1	38
Ba	10	0.77 ± 0.063	0.50–1.0	26
Pb	10	0.27 ± 0.020	0.16–0.39	24

ню барьерности транслокации их в надземные части растений, соотношением видов и их взаимодействием в сообществах, а также особенностями физико-химических свойств элементов. В частности, повышенное накопление Cr и Mo определяется анионогенными свойствами этих элементов, проявляющих более высокую подвижность в нейтральной и слабощелочной среде, которая характерна для почв сухостепных и степных ландшафтов, тогда как большинство других элементов в этих условиях мало подвижны. Хром и молибден входят в VIБ группу периодической таблицы, близки по химическим свойствам, на последних электронных слоях имеют одинаковое количество электронов: Cr – $3d^5 4s^1$, Mo – $4d^5 5s^1$.

Кроме того, возможны и конкурентные взаимоотношения при поглощении элементов корневой системой: повышенное содержание Fe может снижать поступление в растения Cu, Zn, Ni. Высокое содержание Ba обусловлено значительно повышенной концентрацией его в горных породах Забайкалья по сравнению с кларком. Например, в батолитовых гранитоидных комплексах Джидинского р-на содержание Ba в среднем составляло 1470 мг/кг [22], при его кларке в гранитоидах 800 мг/кг или кларке земной коры 470 мг/кг [23].

Важную роль в снижении поглощения растениями Pb играет слизь, покрывающая корни. В составе слизи преобладает углеводный компонент, основу которого составляют гидроксиль-

ные и карбоксильные функциональные группы. Наиболее высоким сродством к этим группам обладают ионы Pb [24]. Поэтому при высоких содержаниях Pb в почвах Забайкалья (даже превышающих ПДК) содержание его в пырее характеризовалось низкими величинами – 0.38–0.62 мг/кг.

Анализ (табл. 2) содержания микроэлементов в пырее на 10 ПП на разных типах почв позволил сделать заключение о том, что более благоприятная обеспеченность (V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Pb) отмечена на аллювиальной дерновой легкосуглинистой почве с. Усть-Кяхта Кяхтинского р-на, наименее благоприятная (Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Mo) – на аллювиальной дерновой супесчаной почве с. Кижинга Кижингинского р-на.

Статистические показатели *КБП* микроэлементов пыреем приведены в табл. 3. Изученные микроэлементы по величине *КБП* условно можно разделить на следующие группы накопления: очень низкой интенсивности – Ti, Fe, Zr, V (0.06–0.14), низкой – Cr, Co, Ni, Ba, Pb, Mn (0.31–0.84), средней – Li, Zn (1.28–2.33), высокой – Mo, Cu (4.22–19.12). Некоторые из них присутствуют в почве преимущественно в формах, мало доступных для растений (Ti, Zr), а также принимают слабое участие в биологических процессах. Что касается Fe, то его *КБП* обусловлен тем, что в почвах он содержится в макро-, а в растениях – в микроколичестве. Ряд биогеохимической активности микроэлементов в почвах представлен в следующем убывающем порядке: Mo > Cu > Zn > Li > Ba > Mn = Co > Cr > Ni > Pb > V > Zr > Ti > Fe.

Сравнение среднего содержания изученных микроэлементов в пырее со средним содержанием их в люцерне серповидной, относящейся к семейству Бобовые (Fabaceae) [25], показало, что большинство из них накапливается в люцерне в значительно более высоких количествах (от 1.4 раза для Fe до 2.2 раза для Mo), кроме Cr, которого в 1.2 раза было больше в пырее и Ba, которого найдено в обоих видах в равном количестве. Видовая специфика накопления микроэлементов в растениях при одинаковом содержании их в почве обусловлена биологическими особенностями: избирательностью поглощения корневыми системами, различиями перемещения в надземную часть и метаболическими процессами в тканях. В частности, у злаковых преобладающий тип обмена веществ – углеводный, а у бобовых – белковый, у которых значительно больше различных функциональных групп, способствующих удержанию микроэлементов. Кроме того, у злаковых корневая система мочковатая, расположенная в верхнем слое почвы, у бобовых – стержневая, проникающая на значительную глубину. Поэтому

поглощение минеральных элементов у них корневыми системами осуществляется из разных почвенных горизонтов.

ВЫВОДЫ

1. Определены средние величины и диапазоны варьирования содержания 15-ти микроэлементов в пырее ползучем, произрастающем на разных типах почв в Западном Забайкалье. По уровню содержания выделены элементы высокого (Fe – 138 мг/кг), повышенного (Sr, Mn, Ba – 74–195), среднего (Ti, Zn – 12–19), низкого (Cu, Cr, Mo, Zr – 1.49–4.0) и очень низкого содержания (Li, V, Ni, Pb, Co – 0.44–0.84 мг/кг). Выявлена неоднородность содержания микроэлементов в пырее, обусловленная интенсивностью их поглощения и эколого-геохимическими факторами, определяющими биодоступность элементов. Наименьший коэффициент вариации (14–18%) отмечен для Li, Sr, Pb; наибольший – для Ni, Cu и Zn (64–92%).

2. По интенсивности биологического поглощения из почвы пыреем Mo, Cu отнесены к группе с высокой (*КБП* 4.2–9.1); Li, Zn – к средней (1.28–2.33); Mn, Cr, Co, Ni, Ba, Pb – с низкой (0.31–0.84); Ti, Fe, V, Zr – с очень низкой интенсивностью (0.06–0.14).

3. Сравнение среднего содержания микроэлементов в пырее с нормами обеспеченности или с кларками выявило следующее: в пределах нормы было содержание Li, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Sr, Zr, Pb; содержание цинка на 8-ми пробных площадках (ПП) было в дефиците, на 2-х ПП в норме; содержание меди на 5-ти ПП было в дефиците, на 5-ти ПП – в норме; содержание молибдена на 6-ти ПП было в избытке, на 4-х ПП – в норме; содержание Cr и Ba было больше нормы. Следовательно, Zn являлся наиболее дефицитным элементом в пырее, Cr и Ba – наиболее избыточными, а в содержании меди отмечали на половине ПП недостаток, в другой половине ПП – норму. Различия в среднем содержании жизненно необходимых микроэлементов послужили причиной неблагоприятного соотношения между Cu : Mo – 2.1 и между Fe : Zn = 11.5, что на порядок меньше нормы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аненхонов О.А., Пыхалова Т.Д., Осипов К.И. Определитель растений Бурятии. Улан-Удэ, 2001. 672 с.
2. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Убугунова В.И. Продукционные процессы в пойменных фитоценозах бассейна р. Селенги. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 392 с.

3. *Пигарева Н.Н., Убугунов Л.Л., Кожевникова Н.М.* Продуктивность лугово-пастбищных ценозов в криолитозоне Западного Забайкалья при внесении редкоземельных и минеральных удобрений. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2017. 198 с.
4. *Попов П.А.* Лекарственные растения в народной медицине. Киев: Здоров'я, 1967. 315 с.
5. *Белоголова Г.А., Коваль П.В., Матяшенко Г.В.* Распределение макроэлементов в растениях Южного Прибайкалья // Сибир. экол. журн. 2006. № 3. С. 359–369.
6. *Балдаев С.Н., Кириллов С.А.* Корма и профилактика эндемических болезней овец. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1986. 128 с.
7. *Аликаев В.А., Петухова Е.А., Халенева Л.Д., Видова Р.Ф.* Руководство по контролю качества кормов и полноценности кормления сельскохозяйственных животных. М.: Колос, 1967. 424 с.
8. *Кашин В.К.* Особенности накопления микроэлементов степной растительностью Западного Забайкалья // Агрохимия. 2014. № 6. С. 69–76.
9. *Ковалевский А.Л.* Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, 1991. 294 с.
10. *Зайцев Г.Н.* Математика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1990. 296 с.
11. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
12. *Kabata A.* Trace elements in soils and plants. 4-th ed. London—N.Y.: CRC Press Taylor and Francis Group Boca Raton, 2011. 534 p.
13. *Ногина Н.А.* Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.
14. ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
15. *Загузина Н.А., Рузавин Ю.Н.* Минералогический состав почв Бурятии и содержание в них различных форм соединений калия // Почвенные ресурсы Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1989. С. 59–66.
16. *Цыбжитов Ц.Х., Цыбжитов А.Ц.* Почвы бассейна озера Байкал. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2000. 165 с.
17. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Изд. дом "Академия", 2003. 400 с.
18. *Лебедев Н.И.* Использование микродобавок для повышения продуктивности жвачных животных. Л.: Агропромиздат, 1990. 96 с.
19. *Кальницкий Б.Д.* Минеральные вещества в кормлении животных. Л.: Агропромиздат, 1985. 207 с.
20. *Ковальский В.В.* Геохимическая среда, микроэлементы, реакции организмов // Тр. биогеохим. лаб. 1991. Т. 22. С. 5–24.
21. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 285 с.
22. *Дворкин-Самарский В.А., Каперская Ю.Н., Козулина И.М.* Закономерности распределения бария и стронция в горных породах Забайкалья. Улан-Удэ: БФ СО АН СССР, 1983. 152 с.
23. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования. М.: ИМГРЭ, 2002. 92 с.
24. *Серегин И.И., Кожевникова А.Д.* Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция // Физиология растений. 2008. Т. 55. № 1. С. 3–26.
25. *Кашин В.К.* Содержание микроэлементов в люцерне в Западном Забайкалье // Агрохимия. 2018. № 8. С. 46–51.

Microelements Content of *Elytrigia repens* (L.) in the Western Transbaikalia

V. K. Kashin

*Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch, RAS
ul. Sakhyanovoi, 6, Ulan-Ude 670047, Russia
E-mail: kashin-39@mail.ru*

The average contents and variation ranges of 15 microelements in *Elytrigia repens* have been determined. According to the rate accumulation by *E. repens*, Mo, Cu were classified as elements of high uptake; Li, Zn — middle; Cr, Co, Mn, Ni, Ba, Pb — low; Ti, Fe, V, Zr, — of very low uptake. The *Elytrigia repens* had deficiency of Zn, and higher content Cr, Ba, and normal content Li, Ti, Fe, V, Mn, Co, Ni, Zr, Sr, Pb. Contents of Cu 0.5 was normal on 1/2 of trial sites, on another 1/2 of trial sites — deficiency, contents of Mo was normal on 0.4 of trial sites, higher — on 0.6 of trial sites.

Key words: microelements, *Elytrigia repens*, coefficients of biological absorption, Western Transbaikalia.

ВЛИЯНИЕ БАКТЕРИЙ *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* И *Pseudomonas syringae* bv. *pisi* НА СОДЕРЖАНИЕ НЕГАТИВНЫХ АЛЛЕЛОПАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В КОРНЕВЫХ ЭКССУДАТАХ ПРОРОСТКОВ ГОРОХА (*Pisum sativum* L.)

© 2020 г. Л. Е. Макарова^{1,*}, И. Г. Петрова¹, Н. А. Соколова¹, А. С. Мориц¹

¹ Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

*E-mail: makarova@sifibr.irk.ru

Поступила в редакцию 13.08.2019 г.

После доработки 21.10.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Сравнили реакцию на инокуляцию бактериями *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* (мутуалист) и *Pseudomonas syringae* bv. *pisi* (антагонист), внесенных отдельно или совместно в водную среду роста корней проростков гороха (*Pisum sativum* L.) сорта Торсдаг. Показателями реакции были изменения содержания негативных аллелопатических соединений (пизатина, N-фенил-2-нафтиламина, фталатов) в корневых экссудатах. После инокуляции проростки росли 1 сут в камере “BINDER KBW-240” при 21°C, освещении 81 мкМ/м²/сек и фотопериоде 16/8 ч (день/ночь). В этилацетатных экстрактах из водной среды, куда погружали корни проростков, содержание соединений определяли методом ВЭЖХ, а изменения в составе фталатов — методом ГХ-МС. Установлено одинаковое влияние моно- и смешанных культур ризобий и псевдомонад на содержание пизатина и дибутилфталата, но разное — на содержание N-фенил-2-нафтиламина и соотношения фталатов в корневых экссудатах.

Ключевые слова: симбиоз, корневые экссудаты, фенольные соединения, *Pisum sativum* L., *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*, *Pseudomonas syringae* bv. *pisi*.

DOI: 10.31857/S0002188120030096

ВВЕДЕНИЕ

Начальные этапы взаимодействия растений с почвенными бактериями в ризосфере и ризоплане осуществляются посредством метаболитов, синтезируемых в клетках обоих партнеров. В почве в прикорневой области растений важную роль играют экскретируемые в виде корневых экссудатов высокомолекулярные (полисахаридные слизи или муцигель, ферменты) и низкомолекулярные (сахара, аминокислоты, органические кислоты, липиды, витамины, фенольные соединения и др.) соединения. Основными функциями этих веществ являются привлечение в прикорневую зону бактерий, контролирование их размножения и видового состава [1–4].

Сахара, аминокислоты, органические кислоты, липиды в корневых экссудатах доминируют среди низкомолекулярных компонентов и характеризуются специфичностью состава не только у растительных генотипов, но и у сортов растений [4–6]. По сравнению с перечисленными соедине-

ниями, количество ароматических соединений в корневых экссудатах много меньше [6], однако состав фенольных компонентов в экссудатах также определяется видовой принадлежностью растений [7]. В прикорневой зоне, отнесенной к области наиболее активного развития микроорганизмов [4], все вышеназванные низкомолекулярные компоненты корневых экссудатов, вероятно, имеют определяющее значение в регуляции взаимоотношений между конкретными видами растений и микроорганизмов. Специфическая роль фенольных соединений во взаимодействиях между растением и бактериями доказана многими исследователями бобово-ризобиального симбиоза, где эта их роль изучена в наибольшей степени [7–9]. Данные литературы позволяют констатировать, что компоненты корневых экссудатов ароматической и неароматической (сахара, аминокислоты, карбоновые кислоты) природы имеют схожее значение в отношении регуляции аттракции (хемотаксиса) бактерий и их трофике [7, 9, 10]. Ряд

представителей обеих групп соединений участвуют в снижении действия токсических элементов на растения и микрофлору почв [4, 11, 12].

Значение фенольных соединений в ризосфере бобового растения не ограничивается только их ролью в инициации инфицирования и нодуляции корней бобового растения. Необходимым для нормального существования и роста растения является контролирование посредством его метаболитов концентрации, а также видового состава микроорганизмов в его ризосфере и ризоплане. В этом аспекте особенно важным является участие ароматических соединений негативного действия на микроорганизмы. К числу веществ такого типа действия относят фитоалексины, химическая природа которых различается не только у представителей разных семейств растений, но и у представителей одного семейства [13].

У растений гороха (*Pisum sativum* L.), служивших объектом нашего исследования, наряду с фитоалексином пизатином к соединениям негативного действия отнесены N-фенил-2-нафтиламин и фталаты [14, 15]. Эти соединения могут появляться в почве не только вследствие проникновения в нее из синтезирующих их растений, но и иметь техногенное происхождение, поскольку интенсивно используются в химической промышленности. Например, N-фенил-2-нафтиламин находит применение как стабилизатор резины, ингибитор полимеризации, компонент топлива для ракет и т.п. Фталаты используют в химической промышленности в качестве пластификаторов полимеров и обнаруживают среди отходов промышленных производств [16]. N-фенил-2-нафтиламин и фталаты относят к ксенобиотикам, негативно действующим на живые организмы.

На примере сортов гороха Аксайский усатый и Ямалский ранее выявлена зависимость содержания в экссудатах пизатина, N-фенил-2-нафтиламина и фталатов от размера корня, обнаружены изменения в их содержании в связи с инокуляцией бактериями *Rhizobium leguminosarum* bv. *viceae* и *Pseudomonas syringae* pv. *pisi* [15, 17]. На содержание N-фенил-2-нафтиламина в экссудатах проростков гороха весьма заметно влияли абиотические факторы: условия освещения и температуры [15, 18]. При росте проростков гороха сорта Торсдаг в условиях температур 21 и 9°C в их экссудатах были замечены различия состава фталатов [19].

Вместе с ризобиями в ткани корней могут проникать ряд сосуществующих с ними видов бактерий из прикорневой зоны бобового растения [20]. Полагают, что виды бактерий, проникшие в кор-

ни вместе с ризобиями, могут сосуществовать в клубеньках, совместно участвуя в метаболических процессах в бактериоидных тканях клубеньков.

Для 2-х видов бактерий (*R. leguminosarum* bv. *viceae* и *P. syringae* pv. *pisi*), являющихся симбионтами растений гороха, но различной стратегии сосуществования с растением-хозяином (мутуалист и антагонист), данные о совместном их проникновении в ткани корня гороха в литературе отсутствуют. В то же время присутствие представителей рода *Pseudomonas* в бактериоидных тканях некоторых дикорастущих бобовых растений было замечено [21].

В работе [22] приведены данные, указывающие на различные адсорбционные свойства *R. leguminosarum* bv. *viceae* и *P. syringae* pv. *pisi* в течение 6 ч после инокуляции проростков гороха сорта Рондо. В течение указанного периода наблюдений адсорбция ризобий на поверхности корня усиливалась во времени, а у бактерий *P. syringae* pv. *pisi* зафиксировано ее ослабление уже после 15 мин после инокуляции корней проростков гороха. Возможно, для данного вида псевдомонад, поражающего у названного выше представителя бобовых культур органы его надземной части (листья), проникновение в ткани корня или не характерно, или ограничено.

Цель работы — изучение особенностей защитной (антимикробной) реакции растения гороха, проявляющейся на уровне его ризосферы при инфицировании его корней монокультурами и при совместной инокуляции бактериями *R. leguminosarum* bv. *viceae* и *P. syringae* pv. *pisi* (мутуалиста и антагониста). Для этого через 1 сут после инокуляции бактериями проследили за изменениями содержания (относительно контроля) в корневых экссудатах проростков гороха негативных аллелопатических соединений — пизатина, N-фенил-2-нафтиламина и фталатов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования. Объектами исследования служили проростки гороха (*Pisum sativum* L.) сорта Торсдаг и бактерии *R. leguminosarum* bv. *viceae* (штамм 245a, получен из Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии, г. Пушкин) и *P. syringae* pv. *pisi* (штамм 1845, из коллекции Центра коллективного пользования (ЦКП) “Биоресурсный центр” Сибирского института физиологии и биохимии растений (СИФИБР) СО РАН, г. Иркутск). Бактерии выращивали на твердых агаризованных средах, составленных по прописи [23].

Семена гороха обеззараживали путем промывания водопроводной водой с мылом и с последующей обработкой 3%-ным раствором пероксида водорода. Прорастание семян и рост проростков проходили в течение 2-х сут на стерильной фильтровальной бумаге, смоченной водопроводной водой, в термостате при 21°C, без освещения. Дальнейший рост проростков, после погружения их корней в водную среду, содержащую микроэлементы [15], в течение 1 сут происходил в камере BINDER KBW-240 при 21°C, освещении 81 $\mu\text{M}/\text{м}^2/\text{сек}$ и фотопериоде 16/8 ч (день/ночь). Объем раствора в сосудах составлял 250 мл, число проростков, приходившихся на 1 сосуд — 36. Средние размеры корней исходных проростков составляли в длину 30–35 мм, по окончании эксперимента — 40–45 мм. Для инокуляции растений культуру бактерий вносили в водную среду в виде водного смыва с твердой агаризованной среды, до концентрации 1.0×10^8 кл./мл (1.0×10^4 кл./мл для каждого вида при совместной инокуляции). Инокуляцию осуществляли одновременно с помещением корней проростков в водную среду. Контролем в эксперименте служили одно-возрастные неинокулированные проростки.

Получение экстрактов аллелопатических веществ, входящих в состав корневых экссудатов. Фенольные соединения корневых экссудатов трехкратно экстрагировали при помощи этилацетата из водной среды (соотношение 1 : 1, v/v), предварительно подкисленной раствором HCl до pH 3.0. Этилацетат из экстрактов упаривали в токе холодного воздуха в условиях затемнения. Сухой остаток растворяли 1.0 мл метанола, и содержащиеся в нем соединения вначале исследовали методом ВЭЖХ. Затем из экстракта в вакууме удаляли метанол. Остаток перерастворяли в этилацетате, производили силилирование соединений экстракта и исследовали их состав методом газохромато-масс-спектрометрического (ГХ-МС) анализа. Экстракты, растворенные в метаноле и этилацетате, помещали в стеклянные вials.

Определение содержания аллелопатических соединений методом ВЭЖХ. Определение содержания пизатина, N-фенил-2-нафтиламина и дибутилфталата осуществляли методом ВЭЖХ на хроматографе “Shimadzu LC-10ATvp” с УФ-детектором (“Shimadzu”, Япония). Идентифицировали соединения в адсорбционных профилях по времени удерживания метчиков, которое подтверждали УФ-спектрами, полученными в оставленном потоке элюента для метчиков и для изучаемых веществ. Для идентификации и получения калибровочных графиков использовали аутентичные образцы N-фенил-2-нафтиламина

(“Sigma”, США), дибутилфталата (“Реахим”, Россия) и пизатина, который был любезно предоставлен профессором Х.Д. Ван-Эттенем (Отдел науки о растениях университета Аризоны, США). Разделение содержащихся в экстрактах фенольных компонентов проводили на колонке (250 $\times$ 4.6 мм, 5 мкм) Perfect (“MZ Analysentechnik”, Германия), в возрастающем градиенте A : B от 30 до 90% в течение 80 мин при скорости 0.5 мл/мин (A — ацетонитрил, B — 0.2 н. перхлорат Li в 0.1%-ном водном растворе трифторуксусной кислоты, pH 4.0). Детектирование соединений проводили при 280 нм. Количественные расчеты производили по адсорбционным профилям по высоте пиков, с использованием калибровочных графиков, построенных для разных концентраций исследованных соединений. Величины достоверности аппроксимации (R^2) составляли 0.96 — для N-фенил-2-нафтиламина, 0.98 — для дибутилфталата, 0.99 — для пизатина.

Исследование состава фталатов в корневых экссудатах. Анализ состава фталатов в экстрактах проводили методом ГХ-МС-анализа с использованием хромато-масс-спектрометра “7000QQQTrip- leQuad/7890A MSD/DS” (“Agilent Technology”, США). Объем вводимой пробы — 0.2 мкл, температура испарителя — 250°C, источника ионов — 230°C, детектора — 150°C, линии, соединяющей хроматограф с масс-спектрометром, — 280°C. Диапазон сканирования — 50–600 а.е.м. Капиллярная колонка — 5MS (30 м $\times$ 0.250 мм $\times$ 0.50 мкм), неподвижная фаза — 5%-ный фенилметилполисилоксан. Градиент температуры: от 100 до 280°C со скоростью 5°C/мин, 2 мин при 280°C, затем от 280 до 340°C со скоростью 5°C/мин. Подвижная фаза — гелий, скорость потока газа 1 мл/мин. Режим разделения потоков — 5 : 1. Способ ионизации — электронный удар, энергия ионизации 70 эВ. Анализ проводили в режиме регистрации полного ионного тока (SCAN). Для идентификации анализируемых соединений использовали библиотеки масс-спектров NIST08 и WILEY7, а также проводили сравнение с аутентичными образцами дибутилфталата (“Реахим”, Россия), бис(2-этилгексил)фталата (синоним — диоктилфталат) и диэтилфталата (“Sigma-Aldrich”, Германия). Аналитическая работа выполнена на оборудовании ЦКП “Биоаналитика” СИФИБР СО РАН (г. Иркутск).

Статистическая обработка данных. Полученные данные статистически обработаны и на рис. 1 и в табл. 1 приведены средние величины и стандартные отклонения для них, которые получены в 3-х независимых экспериментах.

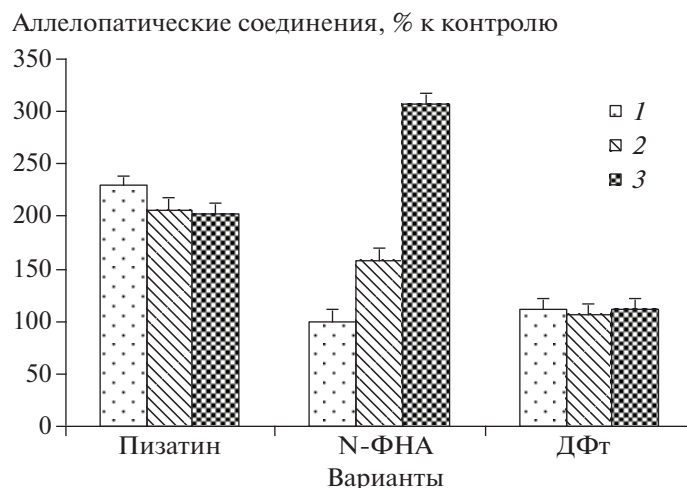


Рис. 1. Влияние инокуляции монокультурами *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* и *Pseudomonas syringae* bv. *pisi* и совместного действия данных бактерий на содержание негативных аллелопатических соединений в среде роста корней проростков гороха через 1 сут после инокуляции, варианты: 1 – инокуляция *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*, 2 – *Pseudomonas syringae* bv. *pisi*, 3 – обоими видами бактерий, контроль – неинокулированные проростки. N-ФНА – N-фенил-2-нафтиламин; ДФт – дибутилфталат.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе полученных методом ВЭЖХ данных показано, что общее количество негативных аллелопатических соединений в экссудатах контрольного варианта составило 13.2 нмоль/растение. Инокуляция монокультурами *R. leguminosarum* bv. *viciae* и *P. syringae* bv. *pisi* усиливала выделение корнями во внешнюю среду этих соединений почти в 1.5 раза, а совместное их действие на корни проростков – в 1.8 раза (рис. 1). Можно видеть, что содержание пизатина в экссудатах повышалось по сравнению с контролем практически одинаково во всех вариантах инокуляции – более чем в 2.0 раза. Хотя при инокуляции ризобиями оно было немного больше, чем при действии бактерий в 2-х других вариантах инокуляции. Существенными оказались различия эффекта влияния бактерий в 3-х вариантах инокуляции на содержание в экссудатах N-фенил-2-нафтиламина. Относительно контроля при инокуляции ризоби-

ями его содержание в экссудатах было неизменным, но возросло в 1.6 раза под влиянием псевдомонад и в 3.1 раза – при совместной инокуляции обоими видами бактерий.

При увеличении содержания N-фенил-2-нафтиламина в ризосфере возможно усиление его аккумуляции в бактериальных клетках и, вследствие этого, могут происходить негативные изменения в мембранных структурах этих организмов [24]. Этим явлениям способствуют хорошо известные физико-химические свойства N-фенил-2-нафтиламина, как его высокая липофильность, которая обуславливает легкость проникновения в мембраны, и высокая антиоксидантная активность, которая является свидетельством его значительной реактивности [24, 25]. Следовательно, его негативный эффект на ризосферную микробиоту должен прямо зависеть от количества N-фенил-2-нафтиламина в корневых экссудатах. Ухудшения условий для существования бактерий

Таблица 1. Состав и показатели времени удерживания ($t_{уд}$) и степени вероятности (Ver , %) для фталатов в экстрактах из водной среды роста корней проростков гороха

Соединение	$t_{уд}$, мин	Ver , %	Относительная площадь пика, %			
			контроль	<i>Rhizobium</i>	<i>Pseudomonas</i>	<i>Rhizobium</i> + <i>Pseudomonas</i>
Диэтилфталат	14.2	80.0	32.2 ± 9.7	23.0 ± 5.1	13.0 ± 0.9	4.6 ± 0.5
Бутил-тетрадецил фталат	19.7	16.6	3.6 ± 0.1	3.4 ± 0.4	2.7 ± 0.3	3.2 ± 0.1
Дибутилфталат	21.6	34.8	100	100	100	98.5 ± 1.7
Диоктилфталат	31.5	70.7	99.9 ± 0.8	92.6 ± 5.0	85.6 ± 9.0	90.6 ± 9.4

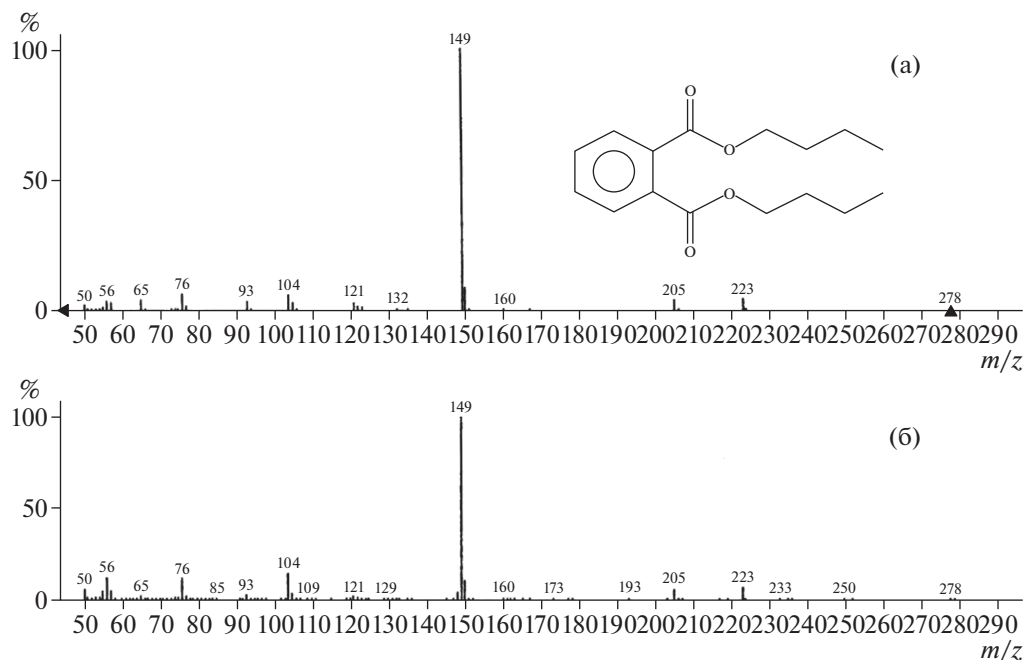


Рис. 2. Масс-спектры дибутилфталата, представленного в библиотеке масс-спектров “NIST” (а) и для выделенного из корневых экссудатов проростков гороха (б). По оси ординат — интенсивность сигнала, %.

в прикорневой зоне проростков гороха возможны при инокуляции псевдомонадами и при их совместной инокуляции с ризобиями. Основанием для данного предположения является повышение содержания обсуждаемого соединения в экссудатах этих растений вышеуказанных вариантов инокуляции (рис. 1).

В корневых экссудатах проростков гороха присутствовали фталаты 4-х видов (табл. 1). Для дибутил- и диоктилфталатов на рис. 2, 3 приведены ионные спектры, подтверждающие их структуру. Наличие в экссудатах диэтилфталата также установили методом ГХ-МС-анализа, сопоставив ионные спектры для аутентичного образца и для найденного в составе экссудатов, а также провели сравнение с данными из библиотеки масс-спектров. Бутил-тетрадецил фталат, соединение с разнотетрадецильными спиртами, образующими эфирные связи с *о*-фталевой кислотой, идентифицировано с невысокой степенью вероятности (табл. 1) по данным библиотеки масс-спектров NIST08.

Можно констатировать, что в экссудатах дибутилфталат доминировал относительно содержания других видов фталатов. По долевого содержания диоктилфталат приближался к дибутилфталату, а диэтилфталат при своем максимальном содержании составлял всего лишь 1/3 от содержания последнего. Под действием бактерий в экссудатах уменьшалось количество диоктил- и диэтилфталатов. Но при этом для диоктилфталата

снижение содержания относительно контроля было мало заметным, а более выраженным оно было для диэтилфталата. Менее всего количество диэтилфталата уменьшалось при инокуляции ризобиями, наиболее — при совместной инокуляции изученными видами бактерий. Содержание бутил-тетрадецил фталата, по сравнению с другими видами фталатов, было невелико и практически одинаковым в экссудатах контроля и во всех вариантах инокуляции проростков.

Ранее было показано, что оба использованных в наших экспериментах вида бактерий способны деградировать *N*-фенил-2-нафтиламин с образованием фталатов и преобразовывать одни виды фталатов в другие [19, 26]. Небольшое увеличение уровня дибутилфталата в ответ на инокуляцию бактериями (рис. 1) можно использовать как подтверждение деградации данными микроорганизмами *N*-фенил-2-нафтиламина до фталатов. Но при этом пока не представляется возможным объяснить причины понижения под влиянием бактерий долевого содержания диэтил- и диоктилфталатов (табл. 1). Не исключено, что в этом случае имеет место упомянутый выше процесс преобразования фталатов.

Вопрос о регуляторной роли фталатов в ризосфере растений, секретирующих их во внешнюю среду, может иметь ответ в результатах исследований, раскрывших действие фталатов в качестве ингибиторов роста бактерий [14, 27–29]. Было

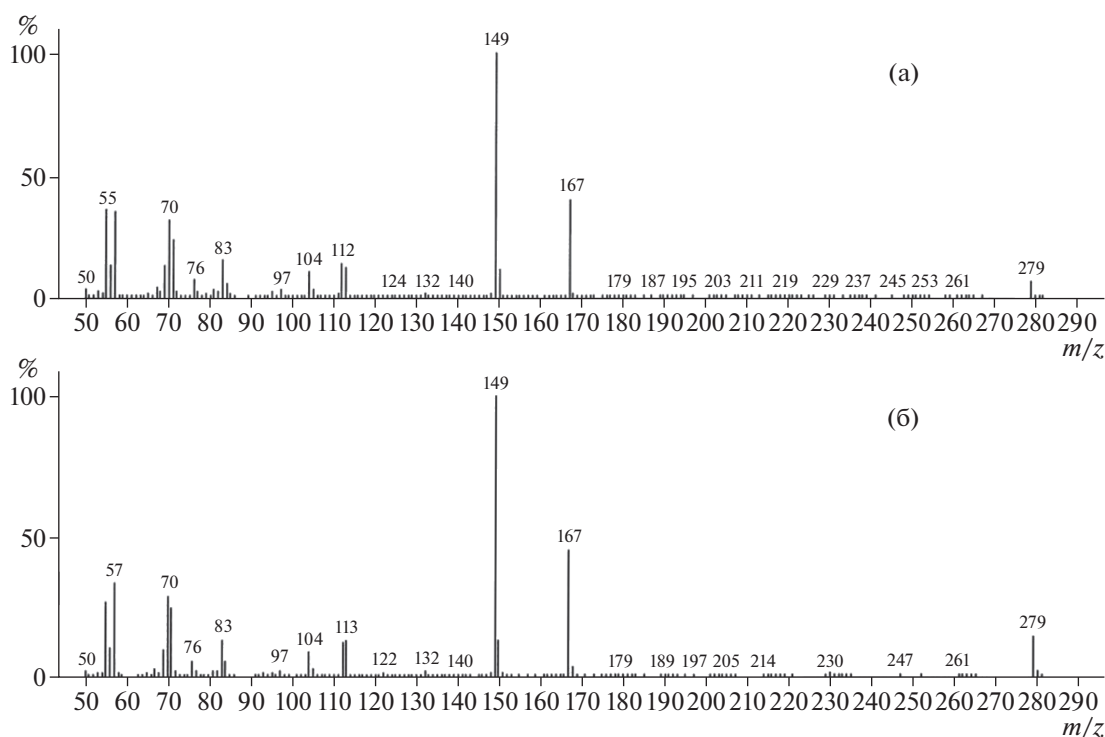


Рис. 3. Масс-спектры для бис(2-этилгексил)фталата (диоктилфталат), аутентичного образца (а) и для выделенного из корневых экссудатов проростков гороха (б). По оси ординат — интенсивность сигнала, %.

показано, что степень негативного эффекта фталатов определяется не только концентрацией их в среде, но и видом алкильных группировок в их молекулах, которые соединены эфирной связью с *о*-фталевой кислотой, а также зависит от вида бактерий, испытывающих их действие. Антибиотические свойства диоктилфталата по отношению к достаточно широкому ряду бактерий продемонстрированы в работе [27]. Роль высокотоксичного диэтилфталата в негативной регуляции растительно-микробных взаимодействий, по-видимому, может определяться его деструктурирующим действием на липопротеиновые системы живых клеток [30]. Тем не менее, многие микроорганизмы способны использовать различные эфиры *орто*-фталевой кислоты в качестве единственного источника углерода и энергии, что дает им определенные селективные преимущества [31].

В работе [29] отмечено неоднозначное действие представителей фталатов на рост бактерий в планктонной культуре и в биопленках. Следовательно, можно полагать, что возникающие под влиянием бактерий изменения в составе фталатов будут иметь неодинаковое значение для регуляции состава микробиоты в экторизосфере и в ризоплане растения, где различен образ существования бактерий (свободное существование в эк-

торизосфере и переход в состояние биопленки в ризоплане).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что различные по типу взаимодействия с растениями гороха бактерии (мутуалист и антагонист) неодинаково влияли на содержание в экссудатах некоторых из соединений, могущих подавлять рост микроорганизмов. Исследованные виды бактерий — *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* (мутуалист) и *Pseudomonas syringae* pv. *pisi* (антагонист), вызывали двукратное увеличение содержания пизатина в корневых экссудатах проростков гороха. Указанное выше повышение содержания пизатина практически не зависело от того, вносили в среду роста корней данные виды бактерий раздельно или одновременно. На содержание N-фенил-2-нафтиламина в экссудатах не повлияли ризобии, а инокуляция псевдомонадами и одновременное действие этих 2-х видов бактерий его увеличили соответственно в 1.6 и 3.1 раза. Во всех вариантах инокуляции содержание дибутилфталата в экссудатах возросло незначительно.

В составе фталатов после инокуляции произошли изменения в соотношениях между присутствовавшими среди них видами. В частности, обнаружено снижение, в сравнении с контролем,

содержания диоктил- и диэтилфталатов. При этом содержание диэтилфталата изменялось более заметно. Количество его в экссудатах уменьшалось минимально при инокуляции ризобиями, максимально — при совместном действии ризобий и псевдомонад на проростки.

Приведенные в работе данные позволили заключить, что вместе с фитоалексином пизатином перспектива участия в негативной регуляции роста бактериальных клеток в ризосфере проростков гороха у N-фенил-2-нафтиламина и фталатов, присутствующих в корневых экссудатах бобовых растений, вполне реальна. Роль в указанной регуляции N-фенил-2-нафтиламина вследствие повышения его содержания в корневых экссудатах может возрастать при инокуляции псевдомонадами и вероятно в наибольшей мере при совместном воздействии ризобий и псевдомонад на корни проростков гороха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kato K., Arima Y., Hirata H. Effect of exudate released from seeds and seedling roots of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on proliferation of *Rhizobium* sp. (*Paseolus*) // Soil Sci. Plant Nutr. 1997. V. 43(2). P. 275–283.
2. Dennis P.G., Miller A.J., Hirsh P.R. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? // FEMS Microbiol Ecol. 2010. V. 72. № 3. P. 313–327.
3. Li X., Zhang T., Wang X., Hua K., Zhao I., Han Z. The composition of root exudates from two different resistant peanut cultivars and their effects on the growth of soil-borne pathogen // Inter. J. Biol. Sci. 2013. V. 9(2). P. 164–173.
4. Шапошников А.И., Пухальский Я.В., Кравченко Л.В., Белимов А.А. Роль корневой экссудации в трофических взаимодействиях растений с ризосферными микроорганизмами / Под ред. Тихоновича И.А. СПб.: Информ-Навигатор, 2016. 104 с.
5. Vančura V., Hanžikova A. Root exudates of plants: IV. Differences in chemical composition of seed and seedlings exudates // Plant and Soil. 1972. V. 36. № 2. P. 271–282.
6. Azaizhe H.A., Marschner H., Römhelt V., Wittenmaier L. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and other soil microorganisms on growth, mineral nutrient acquisition and root exudation of soil-grown maize plants // Mycorrhiza. 1995. V. 5. № 5. P. 321–327.
7. Hirsch A.M., Lum M.R., Downie J.A. What Makes the rhizobia-legume symbiosis so special? // Plant Physiol. 2001. V. 127. № 4. P. 1484–1492.
8. Cooper J.E. Early interactions between legumes and rhizobia: disclosing complexity in a molecular dialogue // J. Appl. Microbiol. 2007. V. 108. № 5. P. 1355–1365.
9. Dacora F.D. Defining new roles for plant and rhizobial molecules in sole and mixed plant cultures involving symbiotic legumes // New Phytologist. 2003. V. 18. № 1. P. 39–49.
10. Mergaert P., Uchiumi T., Alunni B., Evanno G., Cheron A., Catrice O., Mausset A.-E., Barloy-Hubler F., Galibert F., Kondorosi A., Kondorosi E. Eukaryotic control on bacterial cell cycle and differentiation in the *Rhizobium*-legume symbiosis // PNAS. 2006. V. 103. № 13. P. 5230–5235.
11. Mira L., Fernandez M.T., Santos M., Rocha R., Florencio M.H., Jennings K.R. Interactions of flavonoids with iron and copper ions: a mechanism for their antioxidant activity // Free Radic. Res. 2002. V. 36. № 11. P. 1199–1208.
12. Psotová J., Lasovsky J., Vičar J. Metal-chelating properties, electrochemical behavior, scavenging and cytoprotective activities of six natural phenolics // Biomed. Paperts. 2003. V. 147. № 2. P. 147–153.
13. Makoi J.H.R., Ndakidemi P.A. Biological, ecological and agronomic significance of plant phenolic compounds in rhizosphere of the symbiotic legumes // Afric. J. Biotechnol. 2007. V. 6(12). P. 1358–1368.
14. Макарова Л.Е., Смирнов В.И., Клыба Л.В., Петрова И.Г., Дударева Л.В. Роль аллелопатических соединений в регуляции и формировании бобово-ризобиального симбиоза // Прикл. биохим. и микробиол. 2012. Т. 48. № 4. С. 394–403.
15. Макарова Л.Е., Дударева Л.В., Петрова И.Г., Васильева Г.Г. Выделение фенольных соединений в экссудаты корней проростков гороха при инокуляции *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* и *Pseudomonas syringae* pv. *pisi* // Прикл. биохим. и микробиол. 2016. Т. 52. № 2. С. 306–311.
16. Пастухова Е.С., Егорова Д.О., Ястребова О.В., Плотникова Е.Г. Бактерии-деструкторы орто-фталевой кислоты, выделенные из отходов калийного производства // Вестн. Перм. ун-та. Биология. 2010. Вып. 3. С. 24–28.
17. Makarova L.E., Dudareva L.V., Petrova I.G. The content of phenolic compounds in the pea seedling root exudates depends on size of their roots and inoculation of bacteria mutualistic and antagonistic type of interactions // J. Stress Physiol. Biochem. 2015. V. 11. № 3. P. 94–103.
18. Макарова Л.Е., Дударева Л.В. Регуляция бобово-ризобиального симбиоза при различных температурах и участии N-фенил-2-нафтиламина // Агрохимия. 2013. № 9. С. 59–64.
19. Макарова Л.Е., Мориц А.С., Соколова Н.А., Нестеркина И.С. Исследование состава фталатов в корневых экссудатах проростков гороха, инокулированных *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* и *Pseudomonas syringae* pv. *pisi* при разных температурах // Сб. мат-лов Годиного собрания ОФР, Всерос. научн. конф. В 2-х частях. Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 488–492. <https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-488-491>
20. Benito P., Alonso-Vega P., Aguado C., Luján R., Anzai Y., Hirsch A.M., Trujillo M.E. Monitoring the colonization and infection of legume nodules by *Micromonospora* in co-inoculation experiments with rhizobia // Sci. Reports. 2017. 7:11051. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11428-1>

21. Muresu R., Polone E., Sulas L., Baldan B., Tondello A., Delogu G., Cappuccinelli P., Alberghini S., Benhizja Y., Benhizja H., Benguedouar A., Mori B., Calamassi R., Dazzo F.B., Squartini A. Coexistence of predominantly nonculturable rhizobia with diverse, endophytic bacterial taxa within nodules of wild legumes // *FEMS Microbiol Ecol.* 2008. V. 6. № 3. P. 383–400.
22. Ломоватская Л.А., Кузакова О.В., Романенко А.С., Гончарова А.М. Активность аденилатциклаз и изменение концентрации цАМФ в клетках корня проростков гороха при инфицировании мутуалистами и фитопатогенами // *Физиология растений.* 2018. Т. 65. № 4. С. 310–320.
23. Берестецкий В.А. Методические рекомендации по получению новых штаммов *Rhizobium leguminosarum* и оценки их эффективности. Л.: ВНИИСХМ, 1976. 31 с.
24. Altenburger R., Brack W., Greco W.R., Groot M., Jung K., Ovari A., Riedl J., Schwab K., Kürster E. On the mode of action of N-phenyl-2-naphthylamine in plants // *Environ. Sci. Technol.* 2006. V. 40. № 19. P. 6163–6169.
25. Marek E.V., Koslitz S., Weiss T., Fartasch M., Schlüter G., Käßlerlein H.U., Brüning T. Quantification of N-phenyl-2-naphthylamine by gas chromatography and isotope-dilution mass spectrometry and its percutaneous absorption *ex vivo* under workplace conditions // *Arch. Toxicol.* 2017. V. 91. № 11. P. 3587–3596.
26. Макарова Л.Е., Мориц А.С. Деградация N-фенил-2-нафтиламина, присутствующего в корневых экссудатах бобовых растений, ризосферными бактериями разных видов // Сб. научн. ст. по мат-лам X Международ. симп. “Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты”. М.: PRESS-BOOK.RU, 2018. С. 258–262.
27. Kim S.-J., Kim S.-I., Han Y.-S. Isolation and identification of antimicrobial compound from green laver (*Enteromorpha linza*) // *Corean J. Gerontol.* 1997. V. 7. № 3. P. 70–76.
28. Alim Al-Bari M.A., Sayeed M.A., Rahman M.S., Mossadik M.A. Characterization and antimicrobial activities of a phthalic acid derivative produced by *Streptomyces bangladeshensis* a novel species collected in Bangladesh // *Res. J. Med. Sci.* 2006. V. 1. № 2. P. 77–81.
29. Шафикова Т.Н., Омеличкина Ю.В., Еникеев А.Г., Бояркина С.В., Гвильдис Д.Э., Семенов А.А. Эфиры орто-фталевой кислоты подавляют способность фитопатогенов образовывать биопленки // Докл. РАН. 2018. Т. 480. № 3. С. 381–383.
30. Kim S.M., Yoo J.A., Baek J.M., Cho K.H. Diethyl phthalate exposure is associated with embryonic toxicity, fatty liver changes, and hypolipidemia via impairment of lipoprotein functions // *Toxicol. in vitro.* 2015. V. 30. Is. 1. Part B. P. 383–393.
31. Liang D.-W., Zhang T., Fang H.H.P., He J. Phthalates biodegradation in the environment // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2008. V. 80. № 2. P. 183–198.

Influence of Bacteria *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* and *Pseudomonas syringae* bv. *pisi* on Contents of Negative Allelopathic Compounds in Root Exudates of Pea Seedlings (*Pisum sativum* L.)

L. E. Makarova^{a,*}, I. G. Petrova^a, N. A. Sokolova^a, and A. S. Moritz^a

^a Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of RAS
ul. Lermontova 130, Irkutsk 664033, Russia

^{*}E-mail: makarova@sifibr.irk.ru

The reaction to inoculation with bacteria *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* (mutualist) and *Pseudomonas syringae* bv. *pisi* (antagonist), introduced separately or together in the aquatic environment of the growth of the roots of pea seedlings (*Pisum sativum* L.) varieties Torsdag was compared. The reaction indicators were changes in the content of negative allelopathic compounds (pisatin, N-phenyl-2-naphthylamine, phthalates) in root exudates. After inoculation, the seedlings grew 1 day in a BINDER KBW-240 chamber at 21°C, illumination of 81 µM/m²/sec and a photoperiod of 16/8 h (day/night). In ethyl acetate extracts from the aqueous medium, where the roots of the seedlings were immersed, the content of the compounds was determined by HPLC, and changes in the composition of phthalates were determined by GC-MS. The same effect of mono- and mixed cultures of rhizobia and pseudomonads on the content of pisatin and dibutyl phthalate, but different on the level of N-phenyl-2-naphthylamine and the ratio of phthalate species in root exudates, was established.

Key words: symbiosis, root exudates, phenolic compounds, *Pisum sativum* L., *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*, *Pseudomonas syringae* bv. *pisi*.

УДК 631.465:631.445.11(571.121)

КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ НА ТАЗОВСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ¹

© 2020 г. В. Н. Башкин¹, Р. В. Галиулин^{2,*}

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

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

*E-mail: galiulin-rauf@rambler.ru

Поступила в редакцию 02.11.2019 г.

После доработки 19.11.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Рекультивацию нарушенных тундровых почв на Тазовском полуострове (Ямало-Ненецкий автономный округ) проводили путем внесения в них местного торфа, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав и использования гумата калия, как стимулятора роста и развития растений, полученного из того же торфа. Текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв осуществляли, анализируя активность почвенного фермента дегидрогеназы. При этом активность дегидрогеназы рекультивированной почвы сопоставляли с активностью фермента нарушенной почвы на момент начала рекультивации, взятой из базы данных, хранящейся в лаборатории, контролирующей процесс рекультивации. Это было основанием для выводов об эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв.

Ключевые слова: Тазовский полуостров, нарушенные тундровые почвы, рекультивация, текущий контроль эффективности рекультивации, активность фермента дегидрогеназы.

DOI: 10.31857/S0002188120030047

ВВЕДЕНИЕ

При проведении геологоразведочных работ, обустройстве и разработке газоконденсатных месторождений в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) (67°15' с.ш., 74°40' в.д.) происходит механическое воздействие на почвенно-растительный покров, связанное главным образом с проездом техники. В результате тундровые почвы частично или полностью лишаются растительности и органогенного слоя с выходом минеральных горизонтов на дневную поверхность. В различных природно-климатических условиях это обычно приводит к нарушению биогеохимических циклов химических элементов на 3-х различных уровнях: микроорганизмов (бактерии, актиномицеты, грибы, дрожжи), низших беспозвоночных организмов (простейшие, черви, моллюски, тихоходки, членистоногие) и травянистых и лесных фитоценозов [1, 2]. Известно, что роль микроорганизмов заключается в том, что

они производят минерализацию органических остатков в почве, а отмирая, высвобождают от своей массы различные химические элементы, которые вступают в новые биогеохимические циклы. Что касается низших беспозвоночных организмов, то они перерабатывают органические остатки в почве, аккумулируют гумус в ней и оказывают влияние на состав почвенного воздуха. И, наконец, травянистые фитоценозы в отличие от лесных фитоценозов характеризуются более быстрой оборачиваемостью химических элементов, т.е. значительно коротким их биогеохимическим циклом в системе почва–растение.

Между тем, в условиях тундры в результате нарушения почвенно-растительного покрова может начаться развитие термоэрозии, т.е. эрозии, характерной для многолетней (вечной) мерзлоты, приводящее к оврагообразованию и песчаным обнажениям, и, как следствие, к геологической нестабильности газопроводов и других технических сооружений, что создает опасность возникновения различных аварийных ситуаций. Хотя почва обладает самовосстановлением, приводящим к регенерации почвенно-растительного по-

¹ Работа выполнена в рамках темы Министерства науки и высшего образования РФ “Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно загрязненных почвах”, № 0191-2019-0049.



Рис. 1. Карта-схема территории функционирования объектов ООО «Газпром добыча Ямбург» (ЯНАО; 67°15' с.ш., 74°40' в.д.): 1 – п-ов Ямал, 2 – Тазовский п-ов, 3 – междуречье р. Пур и Таз, 4 – Гыданский п-ов, 5 – участок № 1, 6 – участок № 2; а – реки, б – озера, в – болота.

крова, однако этот процесс может занимать десятки лет. В этой связи становится чрезвычайно актуальной своевременная рекультивация (восстановление плодородия), связанная с возобновлением различных уровней биогеохимических циклов химических элементов нарушенных тундровых почв.

Анализ литературы свидетельствует об отсутствии достаточно эффективных способов рекультивации нарушенных тундровых почв, которые были бы, во-первых, адаптированными к природным условиям ЯНАО, во-вторых, приемлемость этих способов первоначально определяли бы по эффективности регенерации нарушенных биогеохимических циклов химических элементов на уровне микроорганизмов и в-третьих, были бы не сложными и экономически доступными для практической реализации.

Использованная в данной работе технология рекультивации нарушенных тундровых почв практически отвечает всем этим требованиям в сравнении с известными технологиями, предложенными или реализуемыми разными авторами на полуострове Ямал (71° с.ш., 70° в.д.; ЯНАО), в районе расположения Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения [3–8]. Эти технологии отличаются применением разнообразных, главным образом привозных искусственно созданных средств рекультивации для восстановления нарушенных тундровых почв. В числе таких средств, в частности, используют минеральные и органические удобрения, вносимые в почву как отдельно, так и в виде их комбинаций; гранулы в комплексе с минеральными и органически-

ми удобрениями и семенами многолетних злаковых трав; биоматы (специальные геотекстильные полотна), представляющие собой композиции, состоящие из 2-х и более слоев, с частично, из-за синтетической армирующей основы, или полностью биodeградируемой основой, с закрепленными в этих слоях минеральными и органическими удобрениями, семенами многолетних злаковых трав, стимуляторами роста и развития растений, штаммами почвенных микроорганизмов, влагоудерживающими и другими компонентами. При этом эффективность данных технологий оценивают на уровне травянистых фитоценозов методом проективного покрытия, путем учета количества и плотности растений, высоты и массы растений и степенью развитости их корневой системы.

Апробация одной из подобных технологий на полуострове Ямал [4, 5] показала, что, при использовании, например, биоматов растения испытывали затруднения при прорастании семян первого поколения сквозь полотно, а синтетическая армирующая основа этих композиций существенно препятствовала развитию корневой системы растений и прорастанию семян последующих поколений растений в почве. Однако полный отказ от синтетической армирующей основы биоматов снижал их противозерозионные свойства в отношении почвы. Кроме того, было отмечено, что аномально жаркое и сухое лето (>30°C), наблюдавшееся в 2016 г. в ЯНАО, весьма негативно отразилось на росте и развитии растений на рекультивируемых участках.

В настоящее время на Тазовском полуострове (68°09' с.ш., 76°02' в.д.; ЯНАО), в импактных зонах газовой промышленности реализуется созданная авторами так называемая инновационная биогеохимическая технология рекультивации нарушенных тундровых почв (рис. 1) [9]. Ее суть состоит во внесении местного торфа в нарушенные тундровые почвы с учетом их гранулометрического состава или полной влагоемкости в зависимости от рельефа местности, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав с использованием полученного из того же торфа гумата калия, как стимулятора роста и развития растений. Критерием оценки эффективности данной технологии является определение активности дегидрогеназы почвы – фермента, катализирующего реакцию дегидрирования, т.е. отщепления водорода органических веществ почвы (углеводов, спиртов, кислот и др.) [10]. При этом активность дегидрогеназы почвы является активностью дегидрогеназы микроорганизмов почвы [11].

Таблица 1. Активность фермента дегидрогеназы в почвах двух участков на территории Тазовского полуострова (68°09' с.ш., 76°02' в.д.)

Почва	Активность фермента дегидрогеназы, мкг $C_{19}H_{16}N_4$ /г/сут	Почва	Активность фермента дегидрогеназы, мкг $C_{19}H_{16}N_4$ /г/сут
Нарушенная почва участка № 1	5.6 ± 0	Нарушенная почва участка № 2	5.3 ± 0
Рекультивированная почва участка № 1	320 ± 31	Рекультивированная, но повторно нарушенная почва участка № 2	7.1 ± 2.7

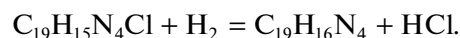
Цель работы — показать, как посредством анализа активности дегидрогеназы осуществлялся текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв на отдельных участках территории Тазовского полуострова, в районе функционирования объектов ООО “Газпром добыча Ямбург” — дочерней компании ПАО “Газпром”.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рекультивацию нарушенных тундровых почв, полностью лишенных растительности и органического слоя, проводили в 2016 г. на двух участках (№ 1 и № 2) территории Тазовского полуострова. Восстановление утраченного плодородия почв данных участков было выполнено путем внесения в них местного торфа в количествах, рассчитанных с учетом полной влагоемкости почв, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав (овсяницы красной, *Festuca rubra*; овсяницы луговой, *Festuca pratensis*; мятлика лугового, *Poa pratensis*; райграса пастбищного, *Lolium perenne*; тимофеевки луговой, *Phleum pratense*) и применения гумата калия, используемого для замачивания семян перед посевом, корневой подкормки и некорневой подкормки (опрыскивания), способами, подробно описанными в работе [9]. Спустя 2 года на этих участках отбирали репрезентативные усредненные образцы почвы методом конверта, т.е. путем смешивания 5-ти отдельных проб, взятых из 5-ти точек. Затем осуществляли предварительную подготовку образца почвы посредством ее воздушного высушивания до рассыпчатого состояния при комнатной температуре, очистки от твердых включений (камней и корней), измельчения и просеивания через сито диаметром ячеек 2 мм и отбора проб почвы в шестикратной повторности для биохимического анализа.

Текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв выполняли путем анализа активности дегидрогеназы в различных пробах почвы, используя один из спектро-

фотометрических методов, описанных в работе [10]. Результаты анализа активности дегидрогеназы выражали в мкг $C_{19}H_{16}N_4$ /г/сут, т.е. 2,3,5-трифенилформазана, образуемого из 2,3,5-трифенилтетразолийхлорида ($C_{19}H_{15}N_4Cl$) по реакции:



Статистическую обработку экспериментальных данных производили по методике [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование показало, что в почве участка № 1 активность фермента дегидрогеназы повысилась в среднем в 57 раз, что свидетельствовало о начале восстановления нарушенных биогеохимических циклов химических элементов на уровне микроорганизмов (табл. 1). В то время как на участке № 2 активность фермента дегидрогеназы практически не изменилась. Впоследствии выяснилось, что в год осуществления рекультивации нарушенной тундровой почвы участка № 2 произошло непредвиденное прохождение через него техники с целью оперативного устранения аварийной ситуации на одном из объектов добычи природного газа. Это вызвало повторное нарушение почвенно-растительного покрова, и поэтому на участке № 2 возникла необходимость повторной рекультивации почвы с применением изначальной технологии, т.е. путем внесения местного торфа, посева и выращивания многолетних злаковых трав и использования гумата калия, как стимулятора роста и развития растений [9].

Статистическая обработка результатов анализа активности дегидрогеназы почв 2-х участков путем оценки существенности разности выборочных средних по t -критерию, показала следующее. На участке № 1, при числе степеней свободы $v = n_1 + n_2 - 2 = 6 + 6 - 2 = 10$, где n_1 и n_2 — пробы почвы, взятые для анализа в 6-кратной повторности, $t_{теор}$ при t_{05} был равен 2.2, t_{01} — 3.2 и t_{001} — 4.6, в то время как $t_{факт}$ составил 10.1, т.е. был больше $t_{теор}$. Это доказало эффективность рекультивации

Таблица 2. Оценка существенности разности выборочных средних по t -критерию активности дегидрогеназы (мкг $C_{19}H_{16}N_4/g$ /сут) почв участков № 1 и № 2 на Тазовском полуострове

Вариант	$\bar{x}_n$ — средняя арифметическая; $s_{\bar{x}_n}$ — ошибка средней арифметической
1. Нарушенная почва на момент начала рекультивации участка № 1	$\bar{x}_1 \pm s_{\bar{x}_1} = 5.6 \pm 0$
2. Рекультивированная почва участка № 1	$\bar{x}_2 \pm s_{\bar{x}_2} = 320.4 \pm 31.3$
3. Нарушенная почва на момент начала рекультивации участка № 2	$\bar{x}_3 \pm s_{\bar{x}_3} = 5.3 \pm 0$
Рекультивированная, но повторно нарушенная почва участка № 2	$\bar{x}_4 \pm s_{\bar{x}_4} = 7.1 \pm 2.7$

Таблица 3. Содержание различных видов углерода в гуминовых кислотах торфа ЯНАО и ХМАО (62°15' с.ш., 70°10' в.д.)

Млн. доля	Вид углерода	ЯНАО [14], %	ХМАО [13], %
0–65	Алифатический	37.9–54.0	42.2–47.1
65–90	Полисахаридный	23.1–26.8	5.5–13.3
90–160	Ароматический	14.1–23.2	36.3–42.1
160–200	Карбоксильный	7.9–10.1	4.7–8.8

нарушенной почвы по фактической величине t -критерия и позволило считать участок № 1 как рекультивированный (табл. 2).

Для участка № 2 при числе степеней свободы $v = n_3 + n_4 - 2 = 6 + 6 - 2 = 10$, где n_3 и n_4 — пробы почвы, взятые для анализа в 6-кратной повторности, $t_{теор}$ при t_{05} был равен 2.2, $t_{01} = 3.2$ и $t_{001} = 4.6$, в то время как $t_{факт}$ составил 0.67, т.е. был меньше $t_{теор}$. Это не доказало эффективность рекультивации нарушенной почвы по фактической величине t -критерия и позволило считать участок № 2 как не рекультивированный.

Между тем факт положительного действия местного торфа при восстановлении плодородия нарушенной тундровой почвы участка № 1 можно объяснить специфическим для данного региона содержанием различных видов углерода в торфе, что ранее было установлено в сравнительных исследованиях методом ЯМР- ^{13}C -спектроскопии его образцов, взятых в 2-х регионах (табл. 3) [9, 13,

14]. Например, в торфе ЯНАО по сравнению с торфом из смежного Ханты-Мансийского автономного округа, (ХМАО) (62°15' с.ш., 70°10' в.д.) содержание алифатического углерода было больше (в 2.3–2.7 раза), чем ароматического. Однако содержание последнего в торфе ЯНАО было меньше (в 1.8–2.6 раза), чем в торфе из ХМАО, в то время как количество полисахаридного углерода было соответственно больше (в 2.0–4.2 раза). В целом это свидетельствовало об относительно низкой ароматичности гуминовых кислот в торфе ЯНАО и большей роли полисахаридов в их формировании. В результате были установлены отличительные признаки гуминовых кислот торфа ЯНАО, характеризующие их специфические региональные особенности, которые послужили основанием не только для использования местного торфа для рекультивации нарушенных тундровых почв, но и получения из него гумата калия, как стимулятора роста и развития многолетних злаковых трав [9]. Это подчеркнуло, с одной стороны, адаптированность использованной технологии рекультивации нарушенных тундровых почв к природным условиям ЯНАО, с другой стороны, несложность ее исполнения и экономическую доступность для практической реализации.

Как уже отмечали, для оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв была использована активность фермента дегидрогеназы, как показатель восстановления биогеохимических циклов на уровне микроорганизмов, что не случайно. Теоретические основы для применения этого показателя при оценке эффективности рекультивации нарушенных почв представлены в ряде работ различных авторов [15–19]. В частности, считается, что дегидрогеназа действует как внутриклеточный фермент, и ее активность служит мерой интенсивности микробного метаболизма в почве. Это подтверждает ранее высказанный тезис о том, что под выражением активность дегидрогеназы почвы следует понимать активность дегидрогеназы микроорганизмов почвы [11]. Кроме того, дегидрогеназа является не только одним из наиболее чувствительных биоиндикаторов, связанных с почвенным плодородием, а также одним из главных компонентов общего ферментативного пула микроорганизмов, участвующих в биогеохимических циклах.

Адекватность использования активности дегидрогеназы для доказательства восстановления биогеохимических циклов на уровне микроорганизмов была ранее экспериментально обоснована в работе [9]. Так, расчет коэффициента корреляции, указывающего на направление и степень сопряженности в изменчивости признаков, пока-

зал наличие сильной существенной корреляционной связи между активностью дегидрогеназы и капиллярной влагоемкостью ($r = 0.95$), а также активностью дегидрогеназы и полной влагоемкостью ($r = 0.95$) тундровых почв. Соответствующие формулы корреляционной зависимости, т.е. уравнения линейной зависимости, позволяющие судить о том, как количественно менялся результативный признак (y) при изменении факторального (x) на единицу измерения, имели следующий вид:

$$y = 2.74 + 0.28x; \quad y = 7.71 + 0.15x.$$

Как оказалось, чем больше величина капиллярной и полной влагоемкости, тем выше была активность дегидрогеназы. Ведущее значение влажности для активности дегидрогеназы почвы связано с тем, что влага определяет нормальное физиологическое состояние микроорганизмов в почве, а также поддерживает в реакционном состоянии данный фермент и его субстраты (углеводы, кислоты, спирты и др.).

ВЫВОДЫ

1. Рекультивацию нарушенных тундровых почв на территории функционирования объектов ООО «Газпром добыча Ямбург» (ЯНАО) проводили с использованием местного торфа, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав и использования полученного из того же торфа гумата калия как стимулятора роста и развития растений.

2. Текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв осуществляли путем сопоставления результатов анализа активности фермента дегидрогеназы рекультивированной почвы с результатами анализа активности дегидрогеназы нарушенной почвы на момент начала рекультивации, взятых из базы данных, хранящейся в лаборатории, контролирующей процесс рекультивации.

3. Об эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв судили путем оценки существенности разности выборочных средних по t -критерию, позволяющему установить достоверное различие между активностью дегидрогеназы рекультивированной и нарушенной почвы, как свидетельство восстановления биогеохимических циклов на уровне микроорганизмов. В случае если это различие оказывалось статистически не достоверным, в результате повторного нарушения целостности почвенно-растительного покрова, то на искомом участке возобновляли про-

цесс рекультивации до полного восстановления плодородия нарушенной почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком // Биогеохимические циклы в биосфере. Мат-лы VII пленума СКОПЕ. Москва, 15–22.11.1974 г. М.: Наука, 1976. С. 19–85.
2. Ивлев А.М. Биогеохимия. М.: Высш. шк., 1986. 127 с.
3. Галямов А.А., Гаевая Е.В., Захарова Е.В. Биологическая рекультивация сельскохозяйственных земель (оленьих пастбищ) на полуострове Ямал // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 10. С. 17–22.
4. Пыстина Н.Б., Баранов А.В., Листов Е.Л., Будников Б.О. Совершенствование технологий рекультивации нарушенных и загрязненных земель на месторождениях углеводородов Крайнего Севера // Научн. вестн. Ямало-Ненец. автоном. округа. 2016. № 2(91). С. 4–8.
5. Пыстина Н.Б., Унанян К.Л., Ильякова Е.Е., Хохлачев Н.С., Лужков В.А. Совершенствование технологий рекультивации ландшафтов на склонах в условиях Крайнего Севера // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 27–34.
6. Gaevaya E.V., Zakharova E.V., Skipin L.N., Galyamov A.A. Improvement of biological recultivation technology of disturbed soils of oil, gas and condensate field // Adv. Engin. Res. 2017. V. 133. P. 215–220.
7. Gagloeva A.E., Aistov I.P. Peculiarities of using biomass for oil-contaminated soils remediation in the Far North regions // J. Soil Water Sci. 2018. V. 1 (1). P. 26–28.
8. Iglovikov A.V., Motorin A.S. Emerging technologies for recultivation of disturbed sandy soil after anthropogenic disturbances in the industrial development of the Far North // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Science. 2018. № 194. P. 1–8.
9. Bashkin V.N., Galiulin R.V. Geoeological risk management in polar areas. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. 156 p.
10. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
11. Петерсон Н.В. Дегидрогеназная активность в почве как проявление активности ее микрофлоры // Микробиология. 1967. Т. XXXVI. Вып. 3. С. 518–525.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
13. Сартаков М.П. Спектроскопия ЯМР ^{13}C гуминовых кислот торфов Среднего Приобья // Химия раст. сырья. 2008. № 3. С. 135–139.
14. Alekseev A.O., Bashkin V.N. NMR ^{13}C measurements for assessing humates from tundra peats // Ecological and biogeochemical cycling in impacted polar ecosystems. N.Y.: Nova Science Publishers, 2017. P. 101–128.
15. Onet A. Relation between enzymatic activities and counts of soil microorganisms // Analele Universitatii din Oradea. Fascicula: Protectia Mediului, 2007. V. XII. P. 224–230.

16. *Wolinska A., Stepniewska Z.* Dehydrogenase activity in the soil environment // *Dehydrogenases*. INTECH Open Publisher, 2012. Chapter 8. P. 183–210.
17. *Kumar S., Chaudhuri S., Maiti S.K.* Soil dehydrogenase enzyme activity in natural and mine soil – A review // *Middle-East J. Sci. Res.* 2013. V. 13 (7). P. 896–906.
18. *Kujur M., Patel A.K.* Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality // *Chil. J. Agricult. Res.* 2014. V. 74 (1). P. 96–104.
19. *Navnage N.P., Patle P.N., Ramteke P.R.* Dehydrogenase activity (DHA): Measure of total microbial activity and as indicator of soil quality // *Inter. J. Chem. Studies.* 2018. V. 6 (1). P. 456–458.

Control of Efficiency of Disturbed Tundra Soil Recultivation in Taz Peninsula

V. N. Bashkin^a and R. V. Galiulin^{b,#}

^a *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b *Institute of Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

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

Recultivation of disturbed tundra soils in the Taz peninsula (Yamalo-Nenets autonomous district) was carried out by application of local peat, sowing and growing a mixture of perennial cereal grasses and using potassium humate, produced from the same peat, as a stimulating agent for growth and development of plants. Current control of recultivation efficiency of disturbed tundra soils was carried out by analysis of soil dehydrogenase enzyme activity. At the same time, results of analysis of dehydrogenase enzyme activity of recultivated soil were compared with results of analysis of dehydrogenase enzyme activity of disturbed soil on the moment of beginning of recultivation, taken from database stored in the laboratory, controlling recultivation process. This formed by the basis for conclusion about the efficiency of recultivation of disturbed tundra soils.

Key words: Taz peninsula, disturbed tundra soils, recultivation, current control of recultivation efficiency, dehydrogenase enzyme activity.

УДК 551.465.7(597)

КАЧЕСТВО ВОДЫ ПРИДОННОГО СЛОЯ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАЛИВА НЯЧАНГА (ВЬЕТНАМ)

© 2020 г. Нгуен Тхи Лан^{1,*}, Фан Чонг Хуан¹

¹ *Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр,
Приморское отделение, департамент экологии
57127 Нячанг, ул. Нгуен Тхьен Тхуат, 30, Вьетнам*

**E-mail: nguyentanst1805@gmail.com*

Поступила в редакцию 05.07.2019 г.

После доработки 09.10.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

В 2018 г. изучали компоненты прибрежной экосистемы с целью оценки экологической ситуации донных экосистем, особенно изменений структуры коралловых рифов залива Нячанг. Проведены измерения содержания загрязнителей в придонном горизонте и в донных отложениях залива. Основными группами загрязнителей были биогенные вещества (нитраты, нитриты, аммонийный азот, фосфат), тяжелые металлы и органические загрязняющие вещества (нефть и нефтепродукты). Результаты исследования показателей воды и отложений свидетельствовали, что концентрации загрязняющих веществ в воде и в отложениях залива Нячанг в сухой сезон немного больше чем в сезон дождей, кроме содержания тяжелых металлов (ТМ) в зоне порта Хонтам. В обоих сезонах их содержание было высоким, меньше ПДК стандарта Вьетнама и Юго-Восточной Азии. Концентрации загрязняющих веществ сильно менялись. Содержание биогенных веществ (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) в донных отложениях залива было намного больше, чем в воде.

Ключевые слова: загрязнение, биогенные вещества, тяжелые металлы, нефть и нефтепродукты, залив Нячанг, вода, донные отложения, Вьетнам.

DOI: 10.31857/S0002188120030114

ВВЕДЕНИЕ

В конце 20-го и начале 21-го века Нячанг был одним из немногих городов с большим потенциалом развития во Вьетнаме. Для города характерна высокая плотность населения, развитая промышленность и обширные сельскохозяйственные угодья по берегам рек, активная туристическая деятельность на море, производство бесконтрольных марикультур. Все это вызывает загрязнение воды и оказывает влияние на экологическую ситуацию в заливе Нячанг [1]. Основными группами загрязнителей являются биогенные вещества (нитраты, нитриты, аммонийный азот, фосфат), тяжелые металлы (ТМ) и органические загрязняющие вещества (нефть и нефтепродукты). Их источником являются бытовые и коммунальные стоки [2]. Они попадают в залив с 2-мя основными реками — Кай и Бе [3]. Кроме этого, морская промышленность также производит много токсичных отходов, вызывающих ухудшение состояния окружающей среды, туристы выносят на пляжи, на море пластмассовые предметы, которые загрязняют

акваторию много лет и почти не разлагаются микроорганизмами. В настоящее время микропластик является новым загрязнителем [4]. Он находится во всех средах, накапливается даже в живых организмах [5].

Эти загрязнители ежедневно попадают в залив Нячанг. Некоторые из них разлагаются под воздействием многих факторов окружающей среды, частично поглощаются водными организмами, частично растворяются в воде и с течениями уходят в океан. Частично вещества-загрязнители оседают на дно и сохраняются в донных отложениях залива [6]. Качество придонной воды и донных отложений напрямую влияет на жизнь донных организмов, которые через пищевую цепь затрагивают всю прибрежную экосистему [7].

Цель работы — сезонное изучение содержания биогенных веществ (нитратов, нитритов, аммонийного азота, фосфатов), ТМ, нефти и нефтепродуктов в разных районах акватории залива Нячанг.

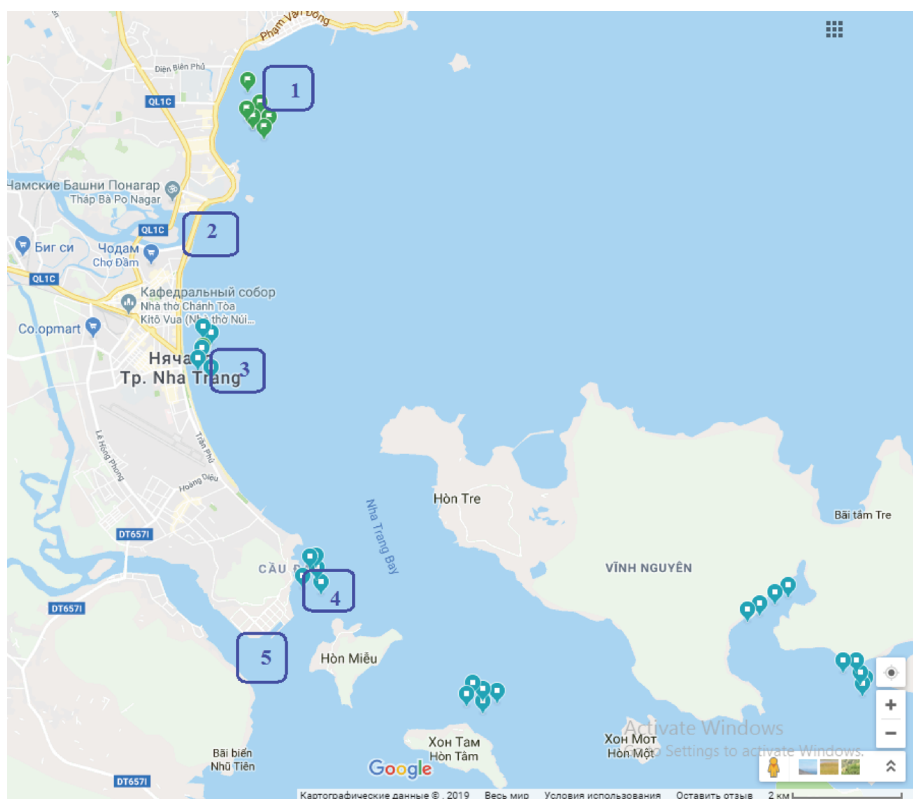


Рис. 1. Карта залива Нячанг: 1–5 – зоны отбора проб.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена в заливе Нячанг, который вытянут в меридиональном направлении с координатами $12^{\circ}08' - 12^{\circ}24'N$ и $109^{\circ}10' - 109^{\circ}23'E$. Его площадь вместе с островами составляет $\approx 300 \text{ км}^2$. Акватория залива разделяется на разные зоны (рис. 1): на севере и центре залива – пляж, где всегда собирается много туристов (зона 1 и 3), зона устья р. Кай (зона 2), в залив впадает еще одна р. Бе, ее устье расположено в зоне 5, зона 4 – порт Хон-там, который является самым большим и самым активным в Нячанге. Здесь имеются не только рыбацкие, но и туристические лодки, корабли.

Сбор материала проводили 2 раз в год в сухой сезон (06.2018 г.) и в сезон дождей (12.2018 г.). В каждой зоне отбирали пробы в 5-ти точках, в каждой точке 3 раза. Пробы воды собирали батометром, донные отложения – ковшом Ван Вина, весь полученный материал сохранен и доставлен в лабораторию для анализа по стандартным методам [8]. Содержание PO_4^{3-} определяли по [9], NO_3^- – по [10], NH_4^+ , Fe, Zn, Pb, нефть и нефтепродукты – методами, приведенными в [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание веществ в воде придонного слоя и в донных отложениях залива Нячанга в сухой сезон и сезон дождей показано в табл. 1. Приведены средние величины каждого показателя в каждой зоне отбора проб. Полученные результаты показали, что содержание веществ сильно менялось: в воде содержание PO_4^{3-} находилось в пределах от 1.5 до 27.5, NO_3^- – от 25 до 31, NH_4^+ – от 1.0 до 11.0 мкг/л; в донных отложениях содержание PO_4^{3-} менялось от 0.1 до 5.1, NO_3^- – от 0.7 до 18, NH_4^+ – от 0.1 до 4.2 мкг/г; содержание железа – от 2410 до 71200, цинка – от 20.5 до 111, свинца – от 9.9 до 38.2 мкг/г; содержание нефти и нефтепродуктов – от 55.1 до 153 мкг/г. Таким образом, содержание нитратов в воде придонного слоя менялось меньше всего.

Содержание биогенных веществ (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) в донных отложениях залива было намного больше, чем в воде. Это могло объясняться длительным осаждением, которое также доказывало, что разложение веществ в донных отложениях залива Нячанг происходит медленно. Также пока-

Таблица 1. Содержание веществ в воде придонного слоя и в донных отложениях залива Нячанг в сухой сезон и в сезон дождей

Точка отбора проб	Координаты точки	Глубина, м	Содержание веществ									
			в воде придонного слоя, мкг/л			в донных отложениях, мкг/г						
			PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Fe	Zn	Pb	нефть и НП*
Сухой сезон (06.2018 г.)												
T.1.1	N12°16'51.1" E109°12'17.1"	5.0	10.0	30	2.0	0.3	5.6	0.3	4260	25.4	18.5	118
T.1.2	N 12°16'52.4" E 109°12'35.9"	7.5	9.4	30	5.0	1.4	8.7	1.2	25800	52.7	20.8	137
T.1.3	N 12°16'42.4" E09°12'28.3"	7.5	9.7	30	8.0	0.8	5.6	3.9	14100	36.5	20.5	119
T.1.4	N2°16'34.1" E109°12'21.0"	4.5	11.0	29	6.0	0.3	3.2	1.3	12600	39.7	19.4	107
T.1.5	N2°16'32.0" E109°12'41.9"	7.5	9.3	29	7.0	0.8	1.9	1.0	9940	30.8	15.7	113
T.2.1	N2°15'45.9" E109°11'45.7"	4.0	10.4	31	5.0	1.2	1.9	1.4	11700	49.8	22.6	89.2
T.2.2	N12°15'33.6" E109°11'47.5"	2.0	27.5	31	10.1	2.2	7.1	1.0	67200	88.5	37.9	138
T.2.3	N12°15'40.2" E 109°11'59.3"	3.0	9.4	30	5.2	0.5	0.7	1.2	5900	32.7	18.4	99.7
T.2.4	N12°15'25.0" E 109°12'07.1"	5.0	9.7	30	4.0	0.3	1.1	2.7	7570	36.8	20.5	105
T.2.5	N12°15'21.4" E 109°12'24.8"	8.0	9.3	29	4.8	0.6	1.5	0.2	19000	47.3	16.7	127
T.3.1	N12°14'22.5" E 109°12'09.2"	6.0	1.5	30	4.0	0.6	8.7	0.3	7500	36.1	19.7	106
T.3.2	N12°14'22.9" E 109°12'16.8"	10.5	2.0	31	5.0	0.3	1.3	0.2	19900	48.6	26.4	129
T.3.3	N12°14'38.3" E 109°12'17.4"	11	1.7	30	8.5	2.0	2.4	0.1	8070	36.7	23.9	117
T.3.4	N12°14'39.6" E 109°12'05.6"	6	2.3	29	5.0	0.4	5.1	1.0	6920	27.5	16.4	107
T.3.5	N12°14'07.0" E 109°12'09.6"	6	2.2	29	6.0	0.8	2.3	0.4	9240	32.8	25.7	112
T.4.1	N12°11'58.9" E 109°13'15.6"	21	10.6	30	11.0	5.1	18.0	1.1	25700	59.4	26.4	126
T.4.2	N12°12'14.4" E 109°13'21.0"	22	11.9	29	6.0	3.0	8.3	0.4	2410	21.4	10.6	90.5
T.4.3	N12°12'23.0" E 109°13'06.3"	14	10.0	28	1.4	2.5	13.8	0.5	14800	49.1	21.1	98.7
T.4.4	N12°12'11.1" E 109°13'11.9"	12	12.6	27	5.0	4.6	15.4	0.2	44300	52.6	26.4	113
T.4.5	N12°12'07.0" E 109°12'59.6"	6	10.1	28	1.2	0.9	9.6	1.2	11000	40.7	18.5	109
T.5.1	N12°11'13.1" E 109°12'35.2"	6	5.7	31	2.0	0.4	1.2	2.2	18200	56.2	25.4	153

Таблица 1. Продолжение

Точка отбора проб	Координаты точки	Глубина, м	Содержание веществ									
			в воде придонного слоя, мкг/л			в донных отложениях, мкг/г						
			PO_4^{3-}	NO_3^-	NH_4^+	PO_4^{3-}	NO_3^-	NH_4^+	Fe	Zn	Pb	нефть и НП*
T.5.2	N12°10'54.9" E 109°12'44.3"	9.5	10.3	31	1.4	0.4	1.2	1.4	12700	50.1	21.6	137
T.5.3	N12°11'01.0" E 109°13'04.7"	11	12.9	30	1.5	1.2	1.1	2.7	14400	49.5	20.7	143
T.5.4	N12°11'08.8" E 109°12'50.9"	11.5	10.4	30	1.0	0.9	6.1	2.4	11900	44.8	19.5	130
T.5.5	N12°11'22.4" E 109°12'53.0"	12	9.7	31	2.0	3.0	12.3	4.2	23800	61.9	29.4	139
Min		2	1.5	27.0	1.0	0.3	0.7	0.1	2410	21.4	10.6	89.2
Max		22	27.5	31.0	11.0	5.1	18.0	4.2	67200	88.5	37.9	153
Сезон дождей (12.2018 г.)												
T.1.1	N12°16'51.1" E109°12'17.3"	6.0	16.0	27.0	3.5	0.6	4.3	0.1	15700	39.7	12.5	89.4
T.1.2	N 12°16'52.5" E109°12'35.9"	7.5	16.7	28.0	1.6	0.2	3.9	1.5	7200	20.5	10.7	85.2
T.1.3	N 12°16'42.4" E09°12'28.3"	8.0	9.7	25.0	2.0	1.7	4.1	1.3	18200	40.6	21.4	98.5
T.1.4	N2°16'34.3" E109°12'21.0"	5.0	15.5	30.0	1.5	0.8	3.1	0.8	16900	47.2	19.5	112
T.1.5	N2°16'32.5" E109°12'42.9"	8.0	8.4	27.0	2.1	0.7	3.5	1.8	19500	38.5	22.6	107
T.2.1	N2°15'46.3" E109°11'45.7"	4.5	9.8	26.0	3.8	0.7	1.2	1.4	14000	55.6	19.7	55.1
T.2.2	N12°15'34.0" E109°11'47.5"	2.5	22.5	28.0	8.6	1.2	6.6	0.9	71200	111.3	38.2	69.8
T.2.3	N12°15'40.2" E109°11'59.8"	4.0	9.1	26.0	6.0	0.3	1.1	0.8	6790	35.6	21.3	63.5
T.2.4	N12°15'25.5" E109°12'07.1"	5.0	9.0	27.0	3.0	0.1	1.0	1.3	5430	38.3	18.1	89.2
T.2.5	N12°15'21.9" E109°12'24.1"	8.0	8.7	28.0	2.3	0.3	1.7	0.4	15700	48.1	17.4	79.6
T.3.1	N12°14'22.5" E109°12'09.2"	6.5	7.1	29.0	2.5	0.7	10.4	0.3	24300	29.2	24.1	84.3
T.3.2	N12°14'22.9" E109°12'16.8"	11.0	8.7	30.0	1.7	1.4	2.7	0.2	12100	32.8	15.3	95.9
T.3.3	N12°14'38.3" E109°12'17.4"	10.0	9.6	28.0	1.5	0.7	3.2	0.2	10400	39.7	12.8	88.7
T.3.4	N12°14'39.6" E109°12'05.6"	7.0	7.2	29.0	1.0	0.6	9.5	0.2	12200	34.5	10.4	97.4
T.3.5	N12°14'07.0" E109°12'08.2"	6.5	7.4	30.0	2.1	0.7	6.9	1.3	13500	23.7	16.4	99.2
T.4.1	N12°11'56.5" E109°13'15.6"	22.0	6.1	27.0	1.7	2.0	14.5	3.1	33100	89.6	30.5	115

Таблица 1. Окончание

Точка отбора проб	Координаты точки	Глубина, м	Содержание веществ									
			в воде придонного слоя, мкг/л			в донных отложениях, мкг/г						
			PO_4^{3-}	NO_3^-	NH_4^+	PO_4^{3-}	NO_3^-	NH_4^+	Fe	Zn	Pb	нефть и НП*
T.4.2	N12°12'16.0" E109°13'21.0"	24.0	7.3	29.0	1.0	3.7	16.4	1.8	29300	55.4	22.9	98.1
T.4.3	N12°12'23.0" E09°13'07.1"	16.0	7.0	30.0	2.5	3.9	17.5	2.0	34900	62.8	29.7	110
T.4.4	N12°12'11.9" E109°13'12.3"	11.0	10.5	28.0	1.8	4.1	3.6	2.3	36600	66.1	21.9	115
T.4.5	N12°12'07.0" E109°12'59.6"	5.5	7.5	29.0	1.6	1.8	10.0	1.5	28100	58.2	23.1	99.4
T.5.1	N12°11'13.8" E109°12'35.5"	7.0	5.6	28.0	2.1	0.3	0.7	1.1	15300	33.1	17.6	138
T.5.2	N12°10'54.9" E109°12'44.3"	9.5	11.3	29.0	1.1	0.4	1.0	0.9	13900	34.5	15.3	136
T.5.3	N12°11'01.0" E109°13'04.7"	13.0	11.6	28.0	1.1	1.5	0.8	1.9	11100	30.9	11.2	122
T.5.4	N12°11'09.8" E109°12'51.3"	15.0	8.8	27.0	1.0	0.8	6.2	1.5	9100	25.7	9.9	115
T.5.5	N12°11'22.9" E109°12'53.3"	14.0	8.1	29.0	1.6	1.9	6.6	2.8	21100	31.3	17.6	109
Min		2.5	5.6	25.0	1.0	0.1	0.7	0.1	5430	20.5	9.9	55.1
Max		24.0	22.5	30.0	8.6	4.1	17.5	3.1	71200	111	38.2	138

Примечание. В обозначении точки (Т) отбора проб: первая цифра – зона отбора ($n = 5$), вторая – точка отбора ($n = 5$).

*НП – нефтепродукты. То же в табл. 2.

зано, что содержание загрязняющих веществ несколько уменьшалось в сезон дождей и только в нескольких точках отбора проб незначительно увеличивалось.

Показано (табл. 2), что в воде придонного слоя только средние величины содержания PO_4^{3-} в зоне 1 и 3 увеличивались, в остальных зонах отбора проб были меньше в сезон дождей. В донных отложениях залива в сезон дождей в зоне 4 содержание NH_4^+ и ТМ (железа, цинка, свинца) сильно увеличивалось при сравнении с их содержанием в сухой сезон: содержание NH_4^+ – от 0.7 до 2.1, Fe – от 19600 до 32400, Zn – от 44.6 до 66.4, Pb – от 20.6 до 25.6 мкг/г.

При сравнении полученных результатов с национальными техническими стандартами качества прибрежной воды во Вьетнаме от 2015 г. (QCVN 10-МТ: 2015/ВТНМТ) и с национальными техническими стандартами качества донных отложений во Вьетнаме от 2017 г. (QCVN 43:

2017/ВТНМТ) показано, что содержание изученных веществ в воде придонного слоя и в донных отложениях залива Нячанга находились в пределах ПДК вредных веществ. Также эти показатели не превышали ПДК вредных веществ для Юго-Восточной Азии [13].

При сравнении содержания изученных веществ в воде придонного слоя и в донных отложениях залива Нячанга с ПДК вредных веществ для Юго-Восточной Азии выяснили, что содержание фосфатов в зонах 1, 3, 4, 5 были довольно высокими и находились на грани ПДК. В течение года содержание фосфатов несколько увеличивалось в сезон дождей (от 9.2 до 10.0 мкг/л) и его средняя годовая величина повысилась почти в 1.5 раза при сравнении с данными, полученными 20 лет назад [14].

Содержание фосфатов и нитратов в воде придонного слоя в 1998 г. и в 2018 г. представлено в табл. 3. Показано, что содержание фосфатов через 20 лет увеличилось, наоборот, содержание нитратов было значительно меньше, их самое вы-

Таблица 2. Средние показатели содержания загрязняющих веществ в воде придонного слоя и в донных отложениях залива Нячанг (2018 г.)

Сезон	Зона отбора проб, №	Содержание веществ									
		в воде придонного слоя, мкг/л			в донных отложениях, мкг/г						
		PO_4^{3-}	NO_3^-	NH_4^+	PO_4^{3-}	NO_3^-	NH_4^+	Fe	Zn	Pb	Нефть и НП*
Сухой	1	9.9	29.6	5.6	0.7	5.0	1.5	13400	37.0	19.0	119
	2	13.3	30.2	5.8	1.0	2.5	1.3	22300	51.0	23.2	112
	3	1.9	29.8	5.7	0.8	4.0	0.4	10300	36.3	22.4	114
	4	11.0	28.4	4.9	3.2	13.0	0.7	19600	44.6	20.6	108
	5	9.8	30.6	1.6	1.2	4.4	2.6	16200	52.5	23.3	140.0
Средние сухого сезона		9.2	29.7	4.7	1.4	5.8	1.3	16400	44.3	21.7	118.4
Дождевой	1	13.3	27.4	2.1	0.8	3.8	1.1	15500	37.3	17.3	98.4
	2	11.8	27.0	4.7	0.5	2.3	1.0	22600	57.8	22.9	71.4
	3	8.0	29.2	1.8	0.8	6.5	0.4	14500	32.0	15.8	93.1
	4	7.7	28.6	1.7	3.1	12.4	2.1	32400	66.4	25.6	108
	5	9.1	28.2	1.4	1.0	3.1	1.6	12400	31.1	14.3	124
Средние сезона дождей		10.0	28.1	2.3	1.2	5.6	1.2	19500	44.9	19.2	98.9
Средние за год		9.6	28.9	3.5	1.3	5.7	1.3	17900	44.6	20.5	109

сокое содержание в 2018 г. (31 мкг/л) было в 2 раза меньше, чем в 1998 г. (62 мкг/л). Высокое содержание фосфатов в воде придонного слоя залива может служить показателем загрязненности коммунально-бытовыми сточными водами, а уменьшение содержания нитратов, видимо, свидетельствовало об уменьшении стока азотных удобрений с сельскохозяйственных полей.

Исследование донных отложений 20 лет назад [15] показало, что содержание железа достигало 26000 мкг/г и было больше, чем в 2018 г. (17500 мкг/г): т.е. через 20 лет содержание железа в донных отложениях залива Нячанг уменьшилось почти в 1.5 раза. При этом содержание свинца резко увеличилось от 1.3 в 1997 г. до 20.5 мкг/г в 2018 г. Ясно, что основным источником свинца

был транспорт, использующий этилированный бензин. Поэтому можно сделать вывод, что основной причиной ухудшения экологической ситуации донных экосистем залива Нячанг является развитие промышленности в данном регионе.

ВЫВОДЫ

1. Содержание изученных загрязняющих веществ в придонных водах и в донных отложениях залива Нячанга сильно менялось: в донных отложениях уменьшалось количество PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ и увеличивалось содержание железа, цинка и свинца, а также нефти и нефтепродуктов по сравнению с придонными водами.

2. За 20-летний период наблюдений содержание фосфатов, железа несколько изменилось, содержание нитратов значительно снизилось, содержание свинца резко увеличилось.

3. Содержание загрязняющих веществ в придонных водах и в донных отложениях немного уменьшалось в сезон дождей, за исключением содержания фосфатов и тяжелых металлов в некоторых зонах исследования. Содержание всех изученных веществ находилось в пределах ПДК вредных веществ, и они не представляют серьезной опасности для донной экосистемы залива Нячанга.

Таблица 3. Содержание фосфатов и нитратов в воде придонного слоя в 1998 и 2018 гг.

Загрязнитель	Содержание, мкг/л	Год	
		1998	2018
PO_4^{3-}	Min	0.5	1.5
	Max	11.1	27.5
	Среднее	6.8	9.6
NO_3^-	Min	62	25
	Max	225	31
	Среднее	107	28.9

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlov D.S., Novikov G.G., Levenko V.A. The feature of structure and functionality of South China sea coastal plankton communities. Moscow: GEOS, 2006. 280 p.
2. Павлов Д.С., Зворыкин Д.Д. Экология внутренних вод Вьетнама. М.: Товарищ-во научн. изданий КМК, 2014. 437 с.
3. Хуан Ф.Ч., Лан Н.Т. Видовое разнообразие диатомовых водорослей р. Кай провинции Кханьхоа, Вьетнам // Научн. жизнь. 2018. № 7. С. 89–96.
4. Kershaw P.J., Rochma C.M. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part 2 of a global assessment // Reports and Studies. GESAMP – FAO, 2015. 96 p.
5. Law K.L., Morét-Ferguson S.E., Goodwin D.S., Zettler E.R., De Force E., Kukulka T., Proskurowski G. Distribution of surface plastic debris in the eastern Pacific Ocean from an 11-year data set // Environ. Sci. Technol. 2014. № 48. P. 4732–4738.
6. Gupta S.K., Singh J. Evaluation of mollusk as sensitive indicator of heavy metal pollution in aquatic system: a review // ИОАВ J. 2011. № 2. P. 49–57.
7. Rainbow P.S. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what? // Environ. Pollut. 2002. № 120. P. 497–507.
8. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington: Amer. Publ. Health Association. 2012. 1360 p.
9. Grashoff, K., Kremling K., Ehrhardt M. Methods of sea-water analysis. WILEY-VCH Publisher, 1999. 600 p.
10. Wood E.D., Armstrong F.A.J., Richards F.A. Determination of nitrate in sea water by cadmium-copper reduction to nitrite // J. Mar. Biol. Associat. United Kingdom. 1967. V. 47. P. 23–31.
11. Руководство по методам химического анализа морских вод. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 265 с.
12. Полянский Н.Г. Аналитическая химия брома. М.: Наука, 1980. 244 с.
13. McPherson C.A., Chapman P.M., Vigers G.A., Ong K.S. ASEAN marine water quality criteria: Contextual framework, principles, methodology and criteria for 18 parameters. ASEAN Marine Environmental Quality Criteria – Working Group (AMEQC-WG), ASEAN-Canada Cooperative Programme on Marine Science - Phase II (CPMS-II). EVS Environment Consultants, North Vancouver and Department of Fisheries, Malaysia, 568 p.
14. Dương Trọng Kiểm, Nguyễn Hồng Thu. Biến động hàm lượng của các yếu tố dinh dưỡng và kim loại nặng trong nước tại trạm giám sát môi trường vịnh Nha Trang (1997–1998) // Tuyển tập nghiên cứu biển, 1999. Tập IX. Tr. 118–122.
15. Pham Van Tom. Environmental quality of Nhatrang bay // Workshop on SIDA, SAREC, CMC, IMO, MOST project Pollution Prevention and Management in Coastal Waters of Vietnam, 31 March–1 April. Nha-trang, 1998. P. 1–19.

Quality of Bottom Water and Sediment of Nha Trang Bay (Vietnam)

Nguyen Thi Lan^{a,*} and Phan Trong Huan^a^a Russian-Vietnamese Tropical Research and Technological Center, Coastal Branch, Department of Ecology, st. Nguyen Thien Thuat 30, Nha Trang, Khanh Hoa Province 57127, Vietnam^{*}E-mail: nguyentlanst1805@gmail.com

In 2018, in order to assess the ecological status of benthic ecosystems, especially these changes in the structure of the coral reef of Nhatrang bay, it was measured contaminants in the bottom water and in the sediments of the bay. The main groups of pollutants are nutrients (nitrates, nitrites, ammonia, phosphate), heavy metals and organic pollutants (oil and grease). Results of chemical parameters of water and sediments showed that the concentration of substances in dry season was slightly higher than in the rainy season, except for heavy metal in the Hontam port. In both season, these concentrations were not high. They were lower than the limit of permissible concentrations of harmful substances of standard of Vietnam and ASEAN. Concentrations of substances fluctuate strongly between sampling points. The concentration of biogenic substances (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) in sediments of the bay was much higher than in bottom water.

Key words: pollution, nutrients, heavy metals, oil and grease, Nha Trang Bay, Vietnam.

УДК 631.466:632.122

ПОЧВЕННЫЕ ФЕРМЕНТЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ: БИОДЕГРАДАЦИЯ, БИОРЕМЕДИАЦИЯ, БИОИНДИКАЦИЯ

© 2020 г. Ю. М. Поляк^{1,2,*}, В. И. Сухаревич¹

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

² Санкт-Петербургский государственный университет
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*E-mail: yuliapolyak@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2019 г.

После доработки 13.06.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

Рассмотрена роль почвенных ферментов в очищении почв от самых разнообразных по химическому составу и свойствам ксенобиотиков. Почвенные ферменты не только играют ведущую роль в биодеградации загрязняющих почву веществ, но могут быть надежным и чувствительным индикатором загрязнения, что позволяет оценить уровень загрязнения и состояние почвенной экосистемы до, после и в процессе ее восстановления, и способствует разработке мер по реабилитации загрязненных экосистем.

Ключевые слова: почвенные ферменты, загрязнение почв, биодеградация, биоремедиация, биоиндикация.

DOI: 10.31857/S0002188120010123

ВВЕДЕНИЕ

Определение биологической активности почвы наряду с изучением физико-химических свойств является важнейшим диагностическим признаком ее состояния [1–3]. Почвенные экосистемы загрязнены многими химическими соединениями с различной структурой, свойствами и уровнем токсичности, попадающими в почву в результате антропогенного воздействия. Основные источники загрязнения – это промышленные предприятия, теплоэнергетический комплекс, коммунальные стоки, сельское хозяйство, включая животноводство и растениеводство [4–6]. Многие из загрязнителей накапливаются в почве, оказывая негативное действие на окружающую среду [7].

На загрязнение почвы первой реагирует микробиота, при этом уже на начальных стадиях загрязнения могут изменяться состав, численность микроорганизмов, их метаболизм, активность почвенных ферментов [8–12]. Почвенная среда обладает уникальной природной способностью к очищению от загрязнений. Очищение происходит в результате многих физико-химических процессов, таких, как дисперсия, сорбция, испарение, гидролиз, окислительно-восстановительные

реакции и др., но наиболее важную роль в разложении поллютантов играет биодеградация.

Ключевым звеном в процессах биодеградации поллютантов являются почвенные ферменты. Роль ферментов различного происхождения в осуществлении биогеохимических циклов широко исследуют и обсуждают в последние десятилетия [13–16]. Почвенные ферменты катализируют специфические реакции, необходимые для восстановления загрязненных почв, причем скорость ферментативных процессов часто превышает скорость процессов с участием химических катализаторов [17].

Основная функция ферментов в загрязненных почвах заключается в трансформации поллютантов до простых и менее токсичных продуктов [18]. Высокую практическую значимость почвенных ферментов определяют техногенез, урбанизация, изменения климата, которые постоянно негативно воздействуют на почву, и окружающую среду в целом [19].

ПОЧВЕННЫЕ ВНЕКЛЕТОЧНЫЕ ФЕРМЕНТЫ

Важная роль ферментов в процессах очищения почв от загрязнителей достаточно хорошо из-

вестна [4]. Почвенные внеклеточные ферменты являются важнейшим и необходимым компонентом почвы, принимающим непосредственное участие в трансформации или полной деградации загрязнителей. В почве содержится значительное количество самых разнообразных ферментов. В настоящее время известно более 1000 ферментов, в том числе участвующих в биodeградации загрязняющих веществ и во всех типах обмена веществ живых организмов [17, 20].

Большинство внеклеточных ферментов находится в иммобилизованном состоянии на глинистых минералах, гумусе, органо-минеральных коллоидах, что позволяет им сохранять свою активность в течение длительного времени [13]. Активность связанных ферментов обычно ниже, чем свободных, т.к. иммобилизация ограничивает доступность субстрата, вызывает конформационные и другие изменения [21]. Тем не менее, иммобилизованные ферменты намного дольше сохраняются в почве, являются значительным резервом ферментативной активности и могут чутко реагировать на изменение свойств загрязненной почвы [22].

Ферментативная активность почв — интегральный показатель функциональной активности почвенной биоты и ее способности к разнообразным биохимическим превращениям. Этот показатель биологической активности почв относительно стабилен, характеризуется малой ошибкой, простотой определения, высокой чувствительностью к внешним воздействиям [23–26].

По мнению многих исследователей [27–29], почвенные ферменты могут быть использованы, как биосенсоры, позволяющие с высокой точностью определить начало загрязнения почв, оценить характер их восстановления. В ряде обзоров освещается множество методов, используемых в почвенной энзимологии для этих целей [30].

Основными источниками почвенных ферментов являются микроорганизмы, корневые системы растений, комплексы растений и микроорганизмов. Растения выделяют в почву пероксидазу, лакказу, монооксигеназу, протеазу, липазу, эстеразу [31]. Ферменты различных видов растений трансформируют полихлорированные бифенолы, полициклические ароматические углеводороды [32]. Пероксидазы могут обладать полифункциональностью, которая зависит от pH среды и природы донора электронов.

Микробные ферменты весьма разнообразны, и включают широкий ряд оксидоредуктаз и гидролаз [20]. Основным источником оксидоредуктаз являются грибы, такие как дереворазрушаю-

щие грибы, микоризные грибы, базидиомицеты, микромицеты [4]. Особый интерес представляют грибы — возбудители белой гнили, обладающие высокой ферментативной активностью, широкой субстратной специфичностью и способностью окислять многие загрязнители [33, 34]. Значительная часть публикаций посвящена базидиомицету *Phanerochaete chrysosporium*, обладающему способностью к биodeградации многих токсичных соединений [35].

Биоразлагаемость поллютантов зависит от их структуры, свойств, концентрации, степени устойчивости [4]. Синтетические вещества будут разлагаться лишь в том случае, если в почве найдется фермент (или комплекс ферментов), способный катализировать реакцию их разложения до промежуточных продуктов, которые могут быть использованы микроорганизмами [36]. Теоретически можно предсказать степень биоразлагаемости вещества, зная его структуру, наличие разветвленности, тип связи между атомами и т.п. [37].

Степень биоразлагаемости загрязняющих веществ может быть положена в основу их классификации [4]. Загрязнители типа алифатических углеводородов C_1 – C_{15} , спирты, фенолы, кислоты легко подвергаются деструкции. Полихлорированные бифенилы, полициклические ароматические углеводороды, как и пестициды, разлагаются с трудом. Поллютанты, представляющие собой продукты биосинтеза — остатки растений и микроорганизмов, богаты такими веществами, как целлюлоза, гемицеллюлоза, пектин, хитин, танин. Их разложение в почве происходит под действием целого комплекса ферментов, который объединяет многие ферменты различных микроорганизмов [38].

Особого внимания заслуживают ферменты термофильных и психрофильных микроорганизмов, адаптированных к жизнедеятельности в экстремальных условиях среды. Ферментные белки этих микроорганизмов устойчивы к различным денатурирующим агентам и проявляют повышенную каталитическую активность [39].

ПОЧВЕННЫЕ ФЕРМЕНТЫ, УЧАСТВУЮЩИЕ В БИОДЕГРАДАЦИИ ПОЛЛЮТАНТОВ

Биodeградация поллютантов в почве происходит под действием многих гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов. Некоторые ферменты, принимающие участие в разложении загрязняющих веществ, и их продуценты, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Загрязняющие вещества и ферменты, участвующие в их разложении

Поллютант	Фермент	Продуцент	Источ-ник
ПАУ, антрацен, пирен, асфальтены, фенолы	Лигнин-пероксидаза, Mn-пероксидаза, лакказа, хлорпероксидаза	<i>Nematoloma forwardii</i> , <i>Cerrena unicolor</i> и др. грибы белой гнили	[4, 30, 40, 41]
Карбофуран, карбарил	Карбамат-гидролаза	<i>Micrococcus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Achromobacter</i> sp.	[4, 42]
Цианиды	Цианидаза, цианид-гидратаза	<i>Alcaligenes denitrificans</i> , <i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> , некоторые грибы	[43–45]
Нитрилы	Нитрилаза, нитрил-гидролаза, амидаза	<i>Nocardia</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Rhodococcus</i> sp., <i>Fusarium solani</i>	[46–48]
Нейлон, полиуретаны, полиакрилаты	Mn-пероксидаза, целлюлоза-дегидрогеназа, эстераза	Грибы белой гнили, <i>Comamonas acidovorans</i> , <i>Corynebacterium</i>	[50, 51]
ПХФ, ДДТ, ПХБ, линдан	Дегалогеназа, лакказа	Грибы белой гнили и др. грибы и бактерии	[52, 53]
Пиретроиды, паратион, кумафос, диазинон	Карбоксилаза, перитроид-гидролаза, эстераза	<i>Agrobacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Flavobacterium</i> sp., <i>Nocardia</i> sp., <i>Bacillus cereus</i> , некоторые грибы	[54–56]
Целлюлозо-содержащие материалы	Ксиланаза, β-ксилозидаза	<i>Bacillus pumilus</i> ; <i>Trichoderma reesei</i>	[57, 58]
Кератин	Кератиназа	<i>Chrysosporium keratinophilum</i> ; <i>Alcaligenes</i> sp.	[59, 60]
Крахмал-содержащие соединения	Амилаза	<i>Bacillus licheniformis</i>	[61, 62]

Примечание. ПАУ — полиароматические углеводороды, ПХБ — полихлорированные бифенилы, ПХФ — пентахлорфенол.

Полиароматические углеводороды и фенольные соединения. Наиболее универсальным ферментом, участвующим в процессах биodeградации полиароматических углеводородов, фосфорорганических пестицидов и фенольных соединений, в т.ч. хлорфенолов, бисфенола А, алкилфенолов и их производных, является лакказа [53]. Вместе с лигнин-пероксидазой (**LiP**) и Mn-зависимой пероксидазой (**MnP**), лакказа образует комплекс лигнолитических ферментов грибов, который представляет собой мощную окислительную систему внеклеточных ферментов, обладающую широкой субстратной специфичностью и способную окислять многие загрязнители окружающей среды [40].

Лакказа катализирует окисление фенолов, анилинов и ароматических тиолов до соответствующих радикалов, которое сопровождается восстановлением молекулярного кислорода до воды. Молекулярный кислород необходим для проявления активности лакказы, в то время как активность пероксидаз — **LiP**, **MnP**, хлорпероксидазы, зависит от наличия пероксида водорода [17].

Активность ферментов в значительной степени зависит от природы поллютанта. Например, снижение концентрации пирена, антрацена и фенантрена в зависимости от продуцента и условий культивирования, под действием Mn-пероксида-

зы может составлять от 30 до 100% [17, 63]. Под действием лакказы концентрация антрацена снижается на 80, 2,4-дихлорфенола — на 96%.

Активность ферментов возрастает в присутствии модификаторов — синтетических и природных соединений, таких как 1-гидроксибензотриазол, ванилин, 2,4,6-триметилфенол или *n*-кумаровая кислота, которые выполняют функцию промежуточных субстратов для ферментов [4]. Например, при внесении в реакционную смесь 1-гидроксибензотриазола значительно возрастает активность лакказы гриба белой гнили *Marasmius quercophilus*, что позволяет сократить время, необходимое для биodeградации антрацена, до 6 ч [63].

Гормоноподобные соединения. В последние годы все более актуальной становится проблема загрязнения природной среды гормоноподобными соединениями группы нонилфенолов (**НФ**) [64–66]. Гормоноподобные соединения называют также эндокринными деструкторами, т.к. блокируя или модифицируя действие эндогенных гормонов, они могут влиять на механизмы регуляции репродуктивной функции. В разложении нонилфенолов активно участвуют ферменты Mn-пероксидаза и лакказа [17].

Гриб белой гнили — *Coriopsis polyzona* — образует лакказу, активность которой возрастает в

присутствии модификатора 2,2'-азино-бис-(3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты), что способствует увеличению скорости разложения нонилфенолов [65]. В результате эстрогенная активность НФ снижается, следовательно, уменьшается и их способность оказывать негативное действие на регуляцию репродуктивного процесса живых организмов.

Цианистые соединения. Большой интерес представляют ферменты, способные к деструкции цианистых соединений — нитрилов и цианидов. Нитрилы — органические соединения с общей формулой $R-C\equiv N$, не только широко распространены в природе, но и интенсивно используются в химической промышленности, фармакологии и других отраслях [46]. Большинство нитрилов высоко токсичны, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами [4].

Среди микроорганизмов выявлены представители, как бактерий, так и грибов, способные к деструкции природных и синтетических нитрилов (табл. 1). Нитрилазы, образуемые микроорганизмами, обладают широкой субстратной специфичностью и способностью катализировать процессы биodeградации различных нитрилов, в т.ч. ароматических, алифатических и арилацетонитрилов [48]. Общим свойством участвующих в биodeградации нитрилов ферментов является стабильность в широком диапазоне температур и оптимум активности в щелочном диапазоне pH. Нитрилазы могут быть как конститутивными, так и индуцибельными [4].

Еще одна группа цианистых соединений, широко распространенных в окружающей среде, это цианиды — соли цианистоводородной (синильной) кислоты. Ферментативные реакции с участием ферментов цианидазы и цианид-гидратазы приводят к биodeградации HCN с образованием кислых продуктов. По сравнению с нитрилазами, цианидазы и цианид-гидратазы обладают более высокой субстратной специфичностью [67]. Все они активны преимущественно по отношению к HCN, но некоторые ферменты этой группы могут участвовать и в деградации нитрилов. Например, цианид-гидратаза микромицета *Fusarium lateritium* проявляет активность по отношению к бензонитрилу, пропионитрилу и ацетонитрилу [68].

Синтетические полимеры. Большую проблему представляют синтетические полимеры, широко используемые с самыми различными целями. К их числу относятся полиуретаны, полиакрилаты, полиактиды, нейлон, полимеры крахмала, смешанные композиции различных материалов, высоко устойчивые к действию ферментов.

В некоторых случаях деградация пластиков осуществляется внеклеточными ферментами типа эстераз и деполимераз. Например, твердый полиэстер — полиуретан разлагается внеклеточной эстеразой, которую образует грамотрицательная бактерия *Comamonas acidovorans* ТВ-35 [49]; синтетический полиамид — нейлон 6, разлагается грибами *Phanaerochaete chrysosporium*, *Trametes vesicolor*, *Bjerkandera adusta* под действием образуемых ими лигнолитических ферментов [50, 51].

Несмотря на ведущую роль ферментов в биodeградации загрязняющих веществ различной природы, их применение для биоремедиации загрязненных почв пока ограничено. Широкому использованию ферментов для очистки почв препятствует как одновременное присутствие в почве нескольких поллютантов, оказывающих синергетическое негативное действие на активность ферментов, так и высокая стоимость выделения и очистки ферментов и их низкая стабильность в природных условиях [4]. Для повышения стабильности ферментов в почве проводят их иммобилизацию на различных носителях, в т.ч. органического (целлюлоза, декстран, хитозан, агароза) и неорганического (цеолит, антрацит, глина) происхождения [69].

ФЕРМЕНТЫ — БИОИНДИКАТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ

Высокая эффективность мониторинга и диагностики состояния загрязненных почв с помощью показателей ферментативной активности доказана многолетними исследованиями многих авторов [17, 70, 71].

Нефть и нефтепродукты. Одним из самых распространенных загрязнителей почв является нефть, нефтяные углеводороды, многие нефтепродукты и содержащиеся в них тяжелые металлы. Токсичность нефти определяется главным образом наличием в ней летучих углеводородов (толуола, бензола, ксилола), нафталинов и других фракций, растворимых в воде [72]. Особую опасность представляют полиароматические углеводороды (ПАУ), многие из которых являются канцерогенами [73]. Такие соединения, как бенз[а]антрацен, бензпирен, овален обладают ярко выраженными мутагенными, канцерогенными и тератогенными свойствами.

Ингибирующему действию нефти и нефтепродуктов подвергаются многие почвенные гидролитические и окислительно-восстановительные ферменты, в т.ч. протеаза, целлюлаза, инвертаза, амилаза, ксиланаза, уреазы, каталаза, дегидрогеназа [74–76]. Органические вещества нефти на

длительный период подавляют активность ферментов фосфатазы, фитазы и др., участвующих в деградации органических фосфорсодержащих соединений [72, 77].

Важным диагностическим показателем интенсивности процессов мобилизации почвенного азота является активность ферментов азотного обмена [72]. Активность такого широко распространенного в почве фермента, как уреазы, зависит от степени загрязнения [78]. При загрязнении нефтью она возрастает, что коррелирует с ростом численности аммонифицирующих микроорганизмов.

Высокий уровень уреазной активности в нефтезагрязненной почве свидетельствует о высокой устойчивости этого фермента к нефти и нефтепродуктам [79, 80]. После завершения основных процессов деструкции нефти активность уреазы снижается, а активность каталазы возрастает [72]. По мнению авторов, эти ферменты могут быть использованы для диагностики нефтезагрязненных почв.

В биодеструкции нефти и нефтяных углеводородов участвуют окислительно-восстановительные ферменты — каталаза, фенолоксидаза, пероксидаза, полифенолоксидаза, дегидрогеназа [77]. Дегидрогеназная активность наиболее чувствительна к нефтяному загрязнению и может служить биоиндикатором загрязнения экосистем [15, 81–83]. Основной вклад в ингибирование дегидрогеназы вносят накапливающиеся в почве продукты деградации нефти. Высокий уровень ингибирования дегидрогеназной активности (до 90%) может сохраняться в нефтезагрязненных почвах на протяжении многих лет [3].

Степень подавления дегидрогеназ и других почвенных ферментов зависит от концентрации загрязнителя. Например, низкие дозы нефти (0.5–1.0%) оказывают стимулирующее действие на активность сульфитоксидазы и сульфитредуктазы, в то время как более высокие дозы снижают активность ферментов [84].

Негативное действие нефти на почвенные ферменты обусловлено и присутствием в ее составе металлов — Pb, Zn, Ni, Cr, Cu, Ti, Sr, Sn [15, 71]. Очевидно, что многообразие компонентов нефти, оказывающих негативное действие на ферменты и образующие их микроорганизмы, способствует длительному сохранению поллютантов в почве.

Металлы. Характер действия металлов на ферменты зависит как от концентрации металла, так и от свойств фермента. Например, с увеличением в почве концентрации никеля, меди, марганца

больше фоновых показателей, но не превышающих 3-кратной величины ПДК, наблюдали стимуляцию активности уреазы и каталазы [85]. Цинк негативно влияет на инвертазу и фосфатазу, а медь снижает активность уреазы и инвертазы, но не оказывает влияния на фосфатазу [86]. Хром в концентрации, превышающей фоновые показатели, но в пределах ПДК, негативно влияет на каталазу [87].

Многие металлы, в том числе медь, никель, ртуть, кадмий, свинец подавляют активность дегидрогеназ, однако при этом наблюдается увеличение активности ферриредуктаз [72, 88]. Металлы могут оказывать негативное действие и на отдельные этапы микробного метаболизма, и на численность микроорганизмов, их видовой состав, следовательно, и на разнообразие образуемых ими ферментов [86].

Влияние металлов на активность ферментов в значительной степени зависит от их биодоступности. В почве металлы присутствуют в подвижном и связанном виде, и подвижные формы оказывают наибольшее воздействие как на почвенные микроорганизмы, так и на ферментативную активность почв [17]. В свою очередь, подвижность металлов зависит от многих факторов, в т.ч. гранулометрического состава, содержания органического вещества, pH и окислительно-восстановительных условий [89].

Антибиотики. В последние десятилетия усиливается интерес к такому типу загрязнителей почвы как антибиотики, к их действию на ферменты и микроорганизмы [90, 91]. Антибиотики — большой класс противомикробных соединений, обладающих высокой биологической активностью и специфичностью действия. По химическому составу они могут быть как простыми ациклическими, так и чрезвычайно сложными соединениями, типа полипептидов, актиномицинов и др. [92].

Основным источником антибиотиков в почве является сельское хозяйство, главным образом животноводство и растениеводство [93, 94]. В растениеводстве антибиотики используют в качестве гербицидов, инсектицидов, стимуляторов роста растений, в животноводстве — для борьбы с заболеваниями животных и улучшения их роста [6, 95]. Кроме того, источником загрязнения почвенных экосистем антибиотиками являются сточные воды фармацевтических предприятий и медицинских учреждений.

Антибиотики не только попадают в почву извне, но образуются и почвенными микроорганизмами. Однако по типу и количеству микроб-

ные антибиотики отличаются от привнесенных в почву [96]. Негативное действие антибиотиков связано с тем, что они могут накапливаться в корневой системе растений, замедляя их рост, и подавляют развитие многих микроорганизмов, в том числе и продуцентов полезных ферментов [97, 98].

В работе [91] в модельных экспериментах изучали влияние антибиотиков (бензилпенициллина, фармацина, нистатина) на изменение численности микроорганизмов в почве и активность ферментов класса гидролаз (фосфатазы, инвертазы) и оксидоредуктаз (каталазы, дегидрогеназы). В исследованных дозах (100 и 600 мг/кг) антибиотики подавляли как численность микроорганизмов, так и активность ферментов, на 30–70 и 20–70% соответственно. Скорость восстановления ферментативной активности зависела от концентрации антибиотика. По степени чувствительности к антибиотикам ферменты распределялись в ряд: фосфатаза < инвертаза < дегидрогеназа < каталаза.

Высокую чувствительность фосфатазы к действию антибиотиков отмечали и другие авторы. Антибиотики группы тетрациклинов в концентрации 300 мг/кг подавляли активность почвенных фосфатаз на 35–55% [99]. Тетрациклины и сульфаниламиды оказывали ингибирующее действие на активность фосфатазы и в значительно меньшей концентрации — 1–10 мг/кг почвы [100].

Пестициды. Изменение ферментативной активности почвы происходит под действием многих биоцидов. Анализ результатов, представленных в 186 публикациях, позволил суммировать данные о влиянии 120 пестицидов, в т.ч. производных мочевины, фосфорорганических соединений, триазолов, карбаматов и др., на активность 17 окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов почв разных типов [70]. Общие закономерности выявить не удалось, т.к. результаты, полученные разными авторами, изучавшими особенности действия одних и тех же пестицидов, противоречили друг другу. Изменения ферментативной активности проявлялись как в виде ингибирования, так и в виде стимуляции, а также отсутствия эффекта.

Позднее сложный характер действия пестицидов, зависящий не только от свойств фермента и пестицида, но и типа почвы, и многих других факторов, был подтвержден другими исследователями [53]. Отсутствие стандартных, унифицированных методов определения активности почвенных ферментов затрудняет их использование в

целях биоиндикации и сравнение данных, полученных разными авторами [17].

Интегральные показатели ферментативной активности почвы. Проблемы, связанные с отсутствием стандартизации, могут быть преодолены при применении интегральных показателей, учитывающих активность не одного, а нескольких почвенных ферментов. Для оценки здоровья почв используют индексы, включающие комплекс биологических показателей почвы, и прежде всего, активность ферментов [101, 102].

Индекс, рассчитанный на основании активности 3-х ферментов — глюкозидазы, фосфатазы и уреазы, достаточно точно отражал изменения, произошедшие в различных почвах в условиях антропогенного воздействия, в т.ч. при загрязнении тяжелыми металлами и нефтепродуктами [17]. Формула для расчета интегрального индекса (А) была получена с использованием канонического дискриминантного анализа:

$$A = 7.87GLU - 8.22PHO - 0.49UR,$$

где GLU — активность глюкозидазы, PHO — фосфатазы и UR — уреазы.

Для оценки эколого-биологического состояния почвы может быть использован интегральный показатель (ИПБС) [103]. Формула для расчета ИПБС имеет следующий вид:

$$\text{ИПБС} = (B_{\text{ср}}/B_{\text{срmax}}) \times 100,$$

где $B_{\text{ср}}$ — средний оценочный балл всех показателей ($B_{\text{ср}} = (B_1 + B_2 + \dots + B_n)/N$), $B_{\text{срmax}}$ — максимальный оценочный балл всех показателей ($B_{\text{срmax}} = (B_{1\text{max}} + B_{2\text{max}} + \dots + B_{n\text{max}})/N$); $B_1, B_2 \dots$ — относительный балл каждого показателя (%), N — число показателей.

При расчете ИПБС и других индексов используют не любые, а наиболее информативные показатели биологической активности почвы, каждый из которых отражает определенное направление биологических и биохимических процессов. Снижение показателя ИПБС, как правило, находится в прямой зависимости от степени воздействия антропогенного фактора [103].

Наиболее широко в почвенной энзимологии используют показатель среднего геометрического ферментативной активности (GMea) [104], который рассчитывают по формуле:

$$GMea = \sqrt[n]{X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n},$$

где $X_1, X_2 \dots X_n$ — относительные баллы для каждого из показателей ферментативной активности в %.

Для расчета относительных баллов используют формулу:

$$X_1 = (X_{\text{факт}}/X_{\text{незагр}}) \times 100\%,$$

где $X_{\text{факт}}$ — фактическая величина показателя ферментативной активности, $X_{\text{незагр}}$ — величина показателя ферментативной активности в незагрязненной почве.

Комплексный характер показателя GMea сглаживает разноплановость отклика отдельных ферментов и более точно отражает совокупность происходящих в почве процессов, что позволяет использовать его для биоиндикации и оценки состояния загрязненных почв [105]. Величина интегральных индексов и показателей загрязненных почв, как правило, снижается даже в тех случаях, когда активность отдельных почвенных ферментов возрастает [17].

Высокая чувствительность, точность и простота методов ферментативного анализа, возможность получить ценную информацию об интенсивности и направленности биохимических процессов, столь важных для здоровья почвы, свидетельствуют о перспективности использования показателей ферментативной активности в целях биодиагностики почвенного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работах многих авторов убедительно показана важная, необходимая роль почвенных внеклеточных ферментов в очищении почв, загрязненных самыми разнообразными по химическому составу и свойствам ксенобиотиками. Почвенные ферменты обладают высокой активностью, способностью катализировать специфические реакции, которые были бы невозможны без их участия, в результате чего происходит разложение, как природных, так и неприродных соединений до простых и нетоксичных веществ.

Кроме этого, почвенные ферменты могут быть надежным и чувствительным индикатором загрязнения почв, что позволяет оценить уровень загрязнения и состояние почвенной экосистемы до, после и в процессе ее восстановления, и способствует разработке мер по реабилитации антропогенно-нарушенных экосистем. Использование активности почвенных ферментов в целях биодиагностики основано на их высокой чувствительности к внешним воздействиям, простоте определения, низкой ошибке экспериментов.

На образование и характер действия ферментов оказывают влияние не только загрязнители, но и сама почва. Почва — сложная динамическая система как с биологической, так и с физико-хи-

мической точки зрения, что существенно затрудняет оценку проходящих в ней микробиологических процессов. В связи с этим определить с достаточной точностью, какой фактор будет влиять на биохимические процессы в разных почвах и различных климатических условиях, в настоящее время не представляется возможным [106]. Решение этой и многих других задач зависит от эффективности теоретических и технологических работ при взаимодействии специалистов различных дисциплин [107, 108].

В условиях усиливающегося антропогенного воздействия на почвенные экосистемы, особенно важно представлять, каким образом уровень загрязнения почв, их химические и биологические свойства влияют на синтез, активность и устойчивость ферментов, их выделение в окружающую среду и распределение в почве. Такая информация важна не только для почвенной энзимологии и экологии микроорганизмов, но и для оценки эффективности методов ремедиации антропогенно-нарушенных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Killham K., Staddon W.J. Bioindicators and sensors of soil health and the application of geostatistics // *Enzymes in the Environment*. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 2002. P. 391–405.
2. Напрасникова Е.В. Биологические свойства почв на угольных отвалах // *Почвоведение*. 2008. № 12. С. 1487–1493.
3. Polyak Y.M., Bakina L.G., Chugunova M.V., Mayachkina N.V., Gerasimov A.O., Bure V.M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil — A field study // *Int. Biodeter. Biodegrad.* 2018. V. 126. P. 57–68.
4. Gianfreda L., Rao M.A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: a review // *Enz. Microb. Technol.* 2004. V. 35. P. 339–354.
5. Smukler S.M., Jackson L.E., Murphree L., Yokota R., Koike S.T., Smith R.F. Transition to largescale organic vegetable production in the Salinas Valley, California // *Ecosyst. Environ.* 2008. V. 126. P. 168–188.
6. Kuppusamy S., Kakarl D., Venkateswarlu K., Megharaj M., Yoon Y.-E., Lee Y.B. Veterinary antibiotics (VAs) contamination as a global agro-ecological issue: A critical view // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2018. V. 257. P. 47–59.
7. Alexander M. Biodegradation and bioremediation. San Diego: Academic Press, 1999. 453 p.
8. Медведева Н.Г., Поляк Ю.М., Зиновьева С.В., Зайцева Т.Б. Влияние иприта и продуктов его гидролиза на почвенную микробиоту // *Почвоведение*. 2000. № 8. С. 1023–1028.
9. Медведева Н.Г., Поляк Ю.М., Зиновьева С.В., Зайцева Т.Б., Сухаревич В.И. Ферментативная активность почв при загрязнении ипритом и продукта-

- ми его гидролиза // Почвоведение. 2001. № 5. С. 628–631.
10. *Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., LeirIs V.C.* Different approaches to evaluate soil quality using biochemical properties // *Soil Biol. Biochem.* 2005. V. 37. P. 877–887.
 11. *Степанов А.Л., Манучарова Н.А., Смагин А.В.* Характеристика биологической активности микробного комплекса городских почв // *Почвоведение.* 2005. № 8. С. 978–983.
 12. *Lehmann A., Stahr K.* Nature and significance of anthropogenic urban soils // *J. Soils Sediments.* 2007. V. 7. № 4. P. 247–260.
 13. *Tabatabai M.A., Dick W.A.* Enzymes in soil: research and developments in measuring activities // *Enzymes in the environment: Activity, ecology, and applications.* N.Y.: Marcel Dekker, 2002. P. 567–596.
 14. *Thavamani P., Malik S., Beer M., Megharaj M., Naidu R.* Microbial activity and diversity in long-term mixed contaminated soils with respect to polyaromatic hydrocarbons and heavy metals // *J. Environ. Manag.* 2012. V. 99. P. 10–17.
 15. *Поляк Ю.М., Губелит Ю.И., Шигаева Т.Д., Бакина Л.Г., Кудрявцева В.А., Дембска Г., Пазиковска-Сапота Г.* Мониторинг Финского залива Балтийского моря: влияние антропогенных факторов на биохимические процессы в прибрежной зоне // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* 2018. Т. XXIX. № 2. С. 99–117.
 16. *Steinweg J.M., Dukes J.S., Paul E.A., Wallenstein M.D.* Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes // *Front. Microbiol.* 2013. V. 4. P. 1–11.
 17. *Rao M.A., Scelza R., Acevedo F., Diez M.C., Gianfreda L.* Enzymes as useful tools for environmental purposes // *Chemosphere.* 2014. 107. P. 145–162.
 18. *Demarche P., Junghanns C., Nair R.R., Agathos S.N.* Harnessing the power of enzymes for environmental stewardship // *Biotechnol. Adv.* 2012. V. 30. P. 933–953.
 19. *Zak D.R., Pregitzer K.S., Burton A.J., Edwards I.P., Kellner H.* Microbial responses to a changing environment: implications for the future functioning of terrestrial ecosystems // *Fungal Ecol.* 2011. V. 4. P. 386–395.
 20. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
 21. *Quiquampoix H., Burns R.G.* Interactions between proteins and soil mineral surfaces: environmental and health consequences // *Elements.* 2007. V. 3. P. 401–406.
 22. *Burns R.G., Deforest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D.* Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions // *Soil Biol. Biochem.* 2013. V. 58. P. 216–234.
 23. *Звягинцев Д.Г.* Проблемы и методы биологической диагностики и индикации почв. М.: Наука, 1976. С. 176–190.
 24. *Галстян А.Ш.* Об устойчивости ферментов почв // *Почвоведение.* 1982. № 4. С. 108–110.
 25. *Даденко Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф.* Изменение ферментативной активности почвенных образцов при их хранении // *Почвоведение.* 2009. № 12. С. 1481–1486.
 26. *Акименко Ю.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* Изменение биохимических свойств чернозема обыкновенного при загрязнении биоцидами // *Агрохимия.* 2015. № 3. С. 81–87.
 27. *Zhao Z., Jiang H.* Enzyme-based electrochemical biosensors // *Biosensors.* Croatia: Intech, 2010. 302 p.
 28. *Liu J., Niu J., Yin L., Jiang F.* In situ encapsulation of laccase in nanofibers by electrospinning for development of enzyme biosensors for chlorophenol monitoring // *Analyst.* 2011. V. 136. P. 4802–4808.
 29. *Soldatkin O.O., Kucherenko I.S., Pyeshkova V.M., Kukla A.L., Jaffrezic-Renault N., Elskaya A.V., Dzjadevych S.V., Soldatkin A.P.* Novel conductometric biosensor based on three-enzyme system for selective determination of heavy metal ions // *Bioelectrochem.* 2012. V. 83. P. 25–30.
 30. *Burns R.G., Dick R.P.* Enzymes in the environment: Activity, ecology and applications. N.Y.: Marcel Dekker, 2002. 640 p.
 31. *Gramms G., Voigt K.D., Kirsche B.* Oxidoreductase enzymes liberated by plant roots and their effects on soil humic material // *Chemosphere.* 1999. V. 38. P. 1481–1494.
 32. *Chroma L., Mackova M., Kucerova P., Der Wiesche C., Burkhard J., Macek T.* Enzymes in plant metabolism of PCBs and PAHs // *Acta Biotechnol.* 2002. V. 22. P. 35–41.
 33. *Reddy C.A.* The potential for white-rot fungi in the treatment of pollutants // *Curr. Opin. Biotechnol.* 1995. V. 6. P. 320–328.
 34. *Pointing S.B.* Feasibility of bioremediation by white-rot fungi // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2001. V. 57. P. 20–32.
 35. *Cameron M.D., Timofeevski S., Aust S.D.* Enzymology of *Phanerochaete chrysosporium* with respect to the degradation of recalcitrant compounds and xenobiotics // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2000. V. 54. P. 751–758.
 36. *Safinowski M., Griebler C., Meckenstock R.U.* Anaerobic cometabolic transformation of polycyclic and heterocyclic aromatic hydrocarbons: evidence from laboratory and field studies // *Environ. Sci. Technol.* 2006. V. 40. P. 4165–4173.
 37. *Abhilash P.C., Jamil S., Singh N.* Transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation of organic xenobiotics // *Biotechnol. Adv.* 2009. V. 27. P. 474–488.
 38. *Gessner M.O., Swan C.M., Dang C.K., McKie B.G., Bardgett R.D., Wall D.H., Haettenschwiler S.* Diversity meets decomposition // *Trend. Ecol. Evolut.* 2010. V. 25. P. 372–380.
 39. *Rothschild L.J., Mancinelli R.L.* Life in extreme environments // *Nature.* 2001. V. 409. P. 1092–1101.
 40. *Cerniglia C.E., Sutherland J.B.* Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fungi // *Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology* / Ed. Timmis K.N. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 2079–2110.
 41. *Eichlerová I., Šnajdr J., Baldrian P.* Laccase activity in soils: Considerations for the measurement of enzyme activity // *Chemosphere.* 2012. V. 88. № 10. P. 1154–1160.

42. Ufarté L., Laville E., Duquesne S., Morgavi D., Robe P., Klopp C., Rizzo A., Pizzut-Serin S., Potocki-Veronese G. Discovery of carbamate degrading enzymes by functional metagenomics. *PLoS One*. 2017. V. 12. № 12:e0189201.
43. Barclay M., Hart A., Knowles C.J., Meenssen J.C.L., Tett V.A. Biodegradation of metal cyanides by mixed and pure cultures of fungi // *Enzyme Microb. Technol.* 1998. V. 22: 22.
44. Lynch J.M. Resilience of the rhizosphere to anthropogenic disturbance // *Biodegradation*. 2002. V. 13. P. 21–27.
45. Cabello P., Luque-Almagro V.M., Olaya-Abril A., Sáez L.P., Moreno-Viván C., Roldán M.D. Assimilation of cyanide and cyano-derivatives by *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344: from omic approaches to biotechnological applications // *FEMS Microbiol. Lett.* 2018. V. 365. № 6. <https://doi.org/10.1093/femsle/fny032>
46. Banerjee A., Sharma R., Banerjee U.C. The nitrile-degrading enzymes: current status and future prospects // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2002. V. 60. P. 33–44.
47. Chen J., Zheng R.C., Zheng Y.G., Shen Y.C. Microbial transformation of nitriles to high-value acids or amides // *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 2009. V. 113. P. 33–77.
48. Duca D., Rose D.R., Glick B.R. Characterization of a nitrilase and a nitrile hydratase from *Pseudomonas* sp. strain UW4 that converts indole-3-acetonitrile to indole-3-acetic acid // *Appl. Environ. Microbiol.* 2014. V. 80. № 15. P. 4640–4649.
49. Whiteley C.G., Heron P., Pletschke B., Rose P.D., Tshivhunge S., Van Jaarsveld F.P. The enzymology of sludge solubilisation utilising sulphate reducing systems. Properties of proteases and phosphatases // *Enzyme Microb. Technol.* 2002. V. 31. P. 419–424.
50. Deguchi T., Kakezawa M., Nishida T. Nylon degradation by lignin-degrading fungi // *Appl. Environ. Microbiol.* 1997. V. 63. P. 329–331.
51. Friedrich J., Zalar P., Mohorcic M., Klun U., Krzan A. Ability of fungi to degrade synthetic polymer nylon-6 // *Chemosphere*. 2007. V. 67. P. 2089–2095.
52. Beaudette L.A., Ward O.P., Pickard M.A., Fedorak P.M. Low surfactant concentration increases fungal mineralization of a polychlorinated biphenyl congener but has no effect on overall metabolism // *Lett. Appl. Microbiol.* 2000. V. 30. P. 155–160.
53. Gianfreda L., Rao M.A. Interactions between xenobiotics and microbial and enzymatic soil activity // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2008. V. 38. № 4. P. 269–310.
54. Mulbry W.W. Selective deletions involving the organophosphorus hydrolase gene adpB from *Nocardia* strain B-1 // *Microbiol Res.* 1998. V. 153. P. 213–217.
55. Sutherland T., Russel R., Selleck M. Using enzymes to clean pesticide residues // *Pest. Outlook*. 2002. V. 13. P. 149–151.
56. Cycoń M., Piotrowska-Seget Z. Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential for the bioremediation of contaminated soils: a review // *Front. Microbiol.* 2016. V. 7: 1463.
57. Duarte M.C.T., Silva E.C., Gomes I.M.B., Ponezi A.N., Portugal E.P., Vicente J.R., Davanzo E. Xylan-hydrolysing enzyme system from *Bacillus pumilus* CBMAI 0008 and its effects on *Eucalyptus grandis* kraft pulp for bleaching improvement // *Bioresour. Technol.* 2003. V. 88. P. 9–15.
58. Polizeli M.L.T.M., Rizzatti A.C.S., Monti R., Terenzi H.F., Jorge J.A., Amorim D.S. Xylanases from fungi: properties and industrial applications // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2005. V. 67. P. 577–591.
59. Singh C.J. Optimization of an extra cellular protease of *Chrysosporium keratinophilum* and its potential in bioremediation of keratinic wastes // *Mycopathologia*. 2002. V. 156. P. 151–156.
60. Yusuf I., Ahmad S.A., Phang L.Y., Syed M.A., Shamaan N.A., Khalil K.A., Dahalan F.A., Shukor M.Y. Keratinase production and biodegradation of polluted secondary chicken feather wastes by a newly isolated multi heavy metal tolerant bacterium – *Alcaligenes* sp. AQ05-001 // *J. Environ. Manag.* 2016. V. 183. Part 1. P. 182–195.
61. Vidyalakshmi R., Paranthaman R., Indhumathi J. Amylase production on submerged fermentation by *Bacillus* spp. // *World J. Chem.* 2009. V. 4. P. 89–91.
62. Singh P., Sharma R., Singh R. Maximum α -amylase production by molecular and biochemical characterized soil microorganism // *J. Biotechnol. Biomater.* 2017. V. 7:3. <https://doi.org/10.4172/2155–952X.1000266>
63. Farnet A.M., Gil G., Ruaudel F., Chevremont A.C., Ferre E. Polycyclic aromatic hydrocarbon transformation with laccases of a white-rot fungus isolated from a Mediterranean sclerophyllous litter // *Geoderma*. 2009. V. 149. P. 267–271.
64. Polyak Y. Changes in microbiota of Baltic Sea coastal sediments caused by nonylphenol contamination // *CLEAN – Soil Air Water*. 2019. <http://doi.wiley.com/10.1002/clen.201900190>
65. Cabana H., Jiwan J.L., Rozenberg R., Elisashvili V., Peninckx M., Agathos S.N., Jones J.P. Elimination of endocrine disrupting chemicals nonylphenol and bisphenol A and personal care product ingredient triclosan using enzyme preparation from the white rot fungus *Coriolopsis polyzona* // *Chemosphere*. 2007. V. 67. P. 770–778.
66. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Влияние нонилфенола на цианобактерию *Microcystis aeruginosa* в различных окислительно-восстановительных условиях среды // *Вестн. ин-та биотехнол. и физико-хим. биол. им. Ю.А. Овчинникова*. 2016. № 12(3). С. 23–28.
67. O'Reilly C., Turner P.D. The nitrilase family of CN hydrolysing enzymes – a comparative study // *J. Appl. Microbiol.* 2003. P. 95. P. 1161–1174.
68. Nolan L.M., Harnedy P.A., Turner P., Hearne A.B., O'Reilly C. The cyanide hydratase enzyme of *Fusarium lateritium* also has nitrilase activity // *FEMS Microbiol. Lett.* 2003. V. 221. P. 161–165.
69. Bayat Z., Hassanshahian M., Cappello S. Immobilization of microbes for bioremediation of crude oil polluted environments: A mini review // *Open Microbiol. J.* 2015. V. 9. P. 48–54.
70. Schaffer A. Pesticide effects on enzyme activities in the soil ecosystem // *Soil Biochemistry*. N.Y.: Marcel Dekker, 1993. P. 273–340.
71. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Ферментативная индикация загрязнения почв тяжелыми металлами // *Агрохимия*. 2006. № 11. С. 84–95.

72. Новоселова Е.И., Киреева Н.А. Ферментативная активность почв в условиях нефтяного загрязнения и ее биодиагностическое значение // Теор. и прикл. экол. 2009. № 2. С. 4–12.
73. Park I.S., Park J.W. Determination of a risk management primer at petroleum-contaminated sites: developing new human health risk assessment strategy // J. Hazard. Mater. 2011. V. 185. № 2–3. P. 1374–1380.
74. Хабиров И.К., Габбасова И.М., Хазиев Ф.Х. Устойчивость почвенных процессов. Уфа: БГАУ, 2001. 327 с.
75. Maila M.P., Cloete T.E. The use of biological activities to monitor the removal of fuel contaminants – perspectives to monitoring hydrocarbon contamination: a review // Inter. Biodeterior. Biodegrad. 2005. V. 55. P. 1–8.
76. Wu M., Dick W.A., Li W., Wang X., Yang Q., Wang T., Xu L., Zhang M., Chen L. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil // Inter. Biodeterior. Biodegrad. 2016. V. 107. P. 158–164.
77. Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахова А.М. Биологическая активность нефтезагрязненных почв. Уфа: Гилем, 2016. 376 с.
78. Guo H., Yao J., Cai M., Qian Y., Guo Y., Richnow H.H., Blake R.E., Doni S., Ciccanti B. Effects of petroleum contamination on soil microbial numbers, metabolic activity and urease activity // Chemosphere. 2012. V. 87. № 11. P. 1273–1280.
79. Трифонова Т.А., Сахно О.Н., Забелина О.Н., Феоктистова И.Д. Сравнительная оценка состояния городских почв по их биологической активности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3. С. 23–27.
80. Напрасникова Е.В. Уреазная активность и pH как показатели экологического состояния почв в условиях Восточной Сибири // Почвоведение. 2005. № 11. С. 1345–1352.
81. Wyszowska J., Wyszowski M. Activity of soil dehydrogenases, urease, and acid and alkaline phosphatases in soil polluted with petroleum // J. Toxicol. Environ. Health 2010. V. 73. P. 1202–1204.
82. Поляк Ю.М., Бакина Л.Г. Ферментативная диагностика нефтезагрязненных почв северо-западного региона РФ // Сб. материалов Междунар. научн. конф. “Роль почв в биосфере и жизни человека”, Москва, 5–7 октября 2015 г. М.: МАКС Пресс, 2016. С. 223–224.
83. Polyak Y., Shigaeva T., Gubelit Y., Bakina L., Kudryavtseva V., Polyak M. Sediment microbial activity and its relation to environmental variables along the eastern Gulf of Finland coastline // J. Mar. Sys. 2017. V. 171. P. 101–110.
84. Киреева Н.А., Ямалетдинова Г.Ф., Новоселова Е.И., Хазиев Ф.Х. Ферменты серного обмена в нефтезагрязненных почвах // Почвоведение. 2002. № 4. С. 474–480.
85. Трифонова Т.А., Забелина О.Н. Изменение биологической активности почвы городских рекреационных территорий в условиях загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами // Почвоведение. 2017. № 4. С. 497–505.
86. Минеев В.Г., Лебедева Л.А., Арзамазова А.В. Последствие различных систем удобрения на ферментативную активность дерново-подзолистой почвы при загрязнении тяжелыми металлами // Агрохимия. 2008. № 10. С. 48–54.
87. Киреева Н.А., Новоселова Е.И., Хазиев Ф.Х. Фосфогидролазная активность нефтезагрязненных почв // Почвоведение. 1997. № 6. С. 723–725.
88. Поляк Ю.М., Бакина Л.Г., Маячкина Н.В., Дроздова И.В., Каплан А.В., Голод Д.Л. Биодиагностика состояния окультуренной городской почвы, загрязненной тяжелыми металлами, методами биоиндикации и биотестирования // Почва и окружающая среда. 2018. № 1(4). С. 231–242.
89. Поляк Ю.М., Шигаева Т.Д., Кудрявцева В.А., Конаков В.Г. Влияние гранулометрического состава донных отложений на подвижность и токсичность тяжелых металлов в прибрежной зоне Финского залива Балтийского моря // Вода: химия и экология. 2017. № 1. С. 11–18.
90. Jechalke S., Heuer H., Siemens J., Amelung W., Smalla K. Fate and effects of veterinary antibiotics in soil // Trends Microbiol. 2014. V. 22. P. 536–545.
91. Акименко Ю.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние антибиотиков (бензилпенициллина, фаразина, нистатина) на биологические свойства чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1095–1101.
92. Егоров Н.С. Основы учения об антибиотиках. М.: Изд-во МГУ, Наука, 2004. 524 с.
93. Lee L.S., Carmosini N., Sassman S.A., Dion H.M., Sepúlveda M.S. Agricultural contributions of antimicrobials and hormones on soil and water quality // Adv. Agron. 2007. V. 93. P. 1–68.
94. Bártíková H., Podlupná R., Skálová L. Veterinary drugs in the environment and their toxicity to plants // Chemosphere. 2016. V. 144. P. 2290–2301.
95. Prado N., Ochoa J., Amrane A. Biodegradation and biosorption of tetracycline and tylosin antibiotics in activated sludge system // Proc. Biochem. 2009. V. 44. P. 1302–1306.
96. Ананьева Н.Д., Стольников Е.В., Сусьян Е.А., Ходжаева А.К. Грибная и бактериальная микробная биомасса (селективное ингибирование) и продуцирование CO₂ и N₂O дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1387–1393.
97. Colinas C., Ingham E., Molina R. Population responses of target and non-target forest soil organisms to selected biocides // Soil. Biol. Biochem. 1994. V. 26. P. 41–47.
98. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Аллелопатические взаимоотношения растений и микроорганизмов в почвенных экосистемах // Усп. совр. биол. 2019. Т. 2. С. 147–160.
99. Cernohorska L., Votava M. Antibiotic synergy against biofilm-forming *Pseudomonas aeruginosa* // Folia Microbiol. 2008. V. 53. P. 57–60.
100. Liu F., Ying G.G., Tao R., Jian-Liang Z., Yang J.F., Zhao L.F. Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities // Environ. Pollut. 2009. V. 157. P. 1636–1642.

101. Dawson J.J.C., Godsiff E.J., Thompson I.P., Ralebitso-Senior T.K., Killham K.S., Paton G.I. Application of biological indicators to assess recovery of hydrocarbon impacted soils // *Soil Biol. Biochem.* 2007. V. 39. P. 164–177.
102. Bastida F., Zsolnay A., Hernández T., García C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective // *Geoderma*. 2008. V. 147. 159–171.
103. Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Колесников С.И. Использование интегрального показателя для оценки пространственной дифференциации биологических свойств юга России в градиенте аридности климата // *Почвоведение*. 2015. Т. 22. № 1. С. 112–120.
104. Garcia-Ruiz R., Ochoa V., Hinojosa M.B., Carreira J.A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems // *Soil Biol. Biochem.* 2008. V. 40. P. 2137–2145.
105. Gao Y., Wang J., Xu J., Kong X., Zhao L., Zeng D.H. Assessing the quality of oil contaminated saline soil using two composite indices // *Ecol. Indic.* 2013. V. 24. P. 105–112.
106. Karaca A., Cetin S.C., Turgay O.C., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality // *Soil Enzymol.* Berlin: Springer Verlag, 2011. V. 22. P. 119–148.
107. Allison S.D., Weintraub M.N., Gartner T.B., Waldrop M.P. Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function // *Soil Enzymol.* Berlin: Springer Verlag, 2011. V. 22. P. 229–243.
108. Strong P.J., Claus H. Laccase: a review of its past and its future in bioremediation // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 41. P. 373–434.

Soil Enzymes and Soil Pollution: Biodegradation, Bioremediation, Bioindication

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

^a *Institution of Russian Academy of Sciences Saint-Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS
ul. Korpusnaya 18, Saint-Petersburg 197110 Russia*

^b *Saint-Petersburg State University
Universitetskaya nab. 7–9, Saint-Petersburg 199034 Russia*

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

This review focuses on the role of soil enzymes in remediation of soils contaminated with a wide range of xenobiotics. Soil enzymes not only play a leading role in the biodegradation of pollutants, but can be a reliable and sensitive indicator of pollution. The use of soil enzyme activities as bioindicators allows assessing the level of pollution and the state of the soil ecosystem before, after and during its restoration. These functions of soil enzymes contribute to the development of methods for remediation of contaminated ecosystems.

Key words: soil enzymes, soil pollution, biodegradation, bioremediation, bioindication.

УДК 63:54

*Он любил русскую землю, и она, отвечая ему взаимностью,
не скрывала перед ним своих тайн...*
А.Ф. Рудзкий

К 175-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П.А. КОСТЫЧЕВА (1845–1895)

© 2020 г. М. А. Помелова

*Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН
125315 Москва, ул. Балтийская, 14, Россия
E-mail: mpom@ihst.ru*

Поступила в редакцию 01.12.2019 г.

После доработки 07.12.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

В работе рассмотрена научная деятельность П.А. Костычева в контексте развития агрономической химии в середине XIX в.

Ключевые слова: П.А. Костычев, агрономическая химия, середина XIX в.

DOI: 10.31857/S0002188120030126



Павел Андреевич Костычев (1845–1895) принадлежит к плеяде русских ученых, чьи работы являются неотъемлемой частью того фундамента, благодаря которому отечественная агрономическая химия получила развитие в XIX в. и достигла новых успехов в первой половине XX в. Одновременно он вошел в историю русской науки как ученый-агроном и почвовед: “Одним словом, П.А. Костычев — яркий пример богатства России талантливыми, одаренными от природы исследователями с масштабным, пытливым умом” [1, с. 164].

О разносторонней деятельности П.А. Костычева можно судить как по его трудам, так и по посвященным ему публикациям [2–4]. В данном сообщении рассмотрим его отношение к агрономической химии и содействие развитию этой области знания. Свой путь в науке П.А. Костычев начал, когда в отечественном земледелии возникла проблема повышения продуктивности пахотных земель, решение которой было связано с организацией опытного дела, изучением эффективности применения различных видов удобрений и развитием экспериментальных методов исследований.

Павел Андреевич родился в Москве 12 (24) февраля 1845 г. в семье дворовых крепостных. Детство будущего ученого прошло в деревне Карнауново (ныне село в Шацком р-не Рязанской обл.) Шацкого уезда. Юный Павел с отличием закончил обучение в Шацком уездном училище и продолжил образование в Московской земледельческой школе, имевшей в то время репутацию одной из лучших среди средних сельскохозяйственных учебных заведений [3]. Большое влияние на становление научного мировоззрения юного выпускника оказали работы И.М. Комова, А.Т. Болотова, М.В. Ломоносова, М.Г. Ливанова, а также А.В. Советова и И.А. Стебута. Продолжил образование П.А. Костычев в Санкт-Петербургском земледельческом институте, куда сначала он был зачислен вольнослушателем, а в 1868 г. — лаборантом в химическую лабораторию, созданную А.Н. Энгельгардтом. Александр Николаевич стал наставником юного исследователя, повлияв на круг его научных интересов, связанных с изучением удобрений, прежде всего, фосфорных [5]. Еще в студенческие годы была опубликована первая научная статья, в которой П.А. Костычев написал об исследовании действия основных питательных веществ на рост растений и о проведении на почвах вегетационных опытов [6]. Проанализировав результаты исследований Д.И. Менделеева, А.Н. Энгельгардта, И.А. Стебута, в 1869 г. молодой исследователь публикует новые статьи, посвященные улучшению пищевого и водного режимов растений, исследованию баланса вносимых в почву веществ и выноса их урожаями (так называемая статика почвы) [7].

После недолгой работы лаборантом, прерванной арестом из-за студенческих волнений, в 1869 г. П.А. Костычев окончил институт. Демократических взглядов Павел Андреевич будет придерживаться и дальше: он дружит с Н.А. Некрасовым, М.Е. Салтыковым-Щедринным, художниками-передвижниками, особенно с Н.Н. Ге, написавшим портрет ученого (1891 г.) [8].

Снова в стены института П.А. Костычев возвращается после трехлетнего перерыва и занимает должность преподавателя растениеводства. Продолжая традиции исследований, заложенные А.Н. Энгельгардтом, П.А. Костычев проводит серию экспериментов по изучению форм фосфора в почве и почвенного перегноя. В 1878 г. Санкт-Петербургский земледельческий институт был реорганизован в Санкт-Петербургский лесной институт, где ученый организовал кабинет растениеводства и почвенную лабораторию с химическим уклоном. Современное оборудование, которым при непосредственном участии П.А. Костычева была оснащена лаборатория, позволяло выполнять не только работы в рамках учебной программы, но и анализы, поступающие на заказ от местных хозяев. Это воодушевило Павла Андреевича на преобразование лаборатории в сельскохозяйственную химическую станцию. Он заявлял, что для устройства станции не будет необходимости в государственных средствах, она будет существовать на доходы от анализов сельскохозяйственных продуктов и почв, поступивших от организаций и частных лиц. Результаты такой деятельности П.А. Костычев рассматривал как возможный источник новых научных данных, а часть полученных средств он предлагал направлять на новые научные проекты. Проект станции был одобрен Советом института и в 1878 г. утвержден Министерством государственных имуществ (МГИ) [8]. Ожидания П.А. Костычева оправдались: на станцию поступали многочисленные заказы, а вырученные от их выполнения средства составили значительную часть ее бюджета.

Помимо заказных анализов, П.А. Костычев провел в лаборатории (станции) серию новых работ по изучению обмена в почве фосфорных соединений и усвоения их растениями. Вопреки общему мнению о доминировании в почвах соединений фосфора с окислами алюминия и железа, Павел Андреевич показал, что в почвах фосфор присутствует в форме слаборастворимых фосфорно-кальциевых солей, находящихся в динамическом равновесии, а его поведение предопределено химическим составом почвы. Полученные результаты способствовали разработке практических методов перевода недоступного фосфора в

форму, усваиваемую растениями [8, 9]. На базе этой станции в 1897 г. была открыта Сельскохозяйственная химическая лаборатория МЗиГИ (Министерство земледелия и государственных имуществ), которой руководил преемник П.А. Костычева П.С. Коссович. Территориально лаборатория находилась в здании института и во многих трудах именуется лабораторией Лесного института [8].

В 1879 г. на VI Съезде русских естествоиспытателей и врачей в Санкт-Петербурге, в работе которого принимали участие крупнейшие русские ученые, П.А. Костычев сделал свой первый доклад, получивший одобрение Д.И. Менделеева, об изменении пропорций окислов железа и полезных карбонатов в почве путем ее известкования [10]. Эти исследования по агрохимии и химии почв позволили ему читать приват-доцентский курс почвоведения в Императорском Санкт-Петербургском университете, также он вел курс почвоведения в Лесном институте и впоследствии возглавил в нем кафедру почвоведения с основами земледелия [11].

В 1882–1884 гг. Павел Андреевич публикует серию научных статей, посвященных характеристике и применению фосфорных удобрений [9, 12].

Важными для развития отечественной агрохимической школы были публикации, посвященные генезису и проблемам обработки и удобрения чернозема [12, 13]. В этих работах ученый рассмотрел вопросы особенностей черноземных почв, их удобрения известью и мергелем и подчеркнул, что наиболее важными являются такие приемы обработки, которые способствуют сохранению в почве влаги в течение долгого времени.

Кроме того, благодаря П.А. Костычеву, стало развиваться биологическое направление в агрономической химии, которое стало основой такого направления в почвоведении и агрохимии, как биология почв. В 1882 г. ученый был командирован во Францию и Германию, где освоил микробиологические методы исследования. Впоследствии он применил их в своих исследованиях и показал влияние микробиоты почвы на процесс разложения ее органического вещества [15]. Как отметил В.Г. Минеев, П.А. Костычева можно считать первым русским агромикробиологом [5].

Много внимания П.А. Костычев уделял и системе культурной обработки почвы [16]. Результаты исследований, посвященных удобрениям, он обобщил в книге “Учение об удобрении почв” [17]. Отличительными особенностями этой работы были содержательность и доступность изложения для читателя, что и определило ее роль первого в то время отечественного учебника по удобрению почв.

На протяжении нескольких лет Павел Андреевич совмещал научную, преподавательскую дея-

тельность и государственную службу. С 1893 г. статский советник П.А. Костычев был переведен на должность инспектора сельского хозяйства при Департаменте земледелия и сельской промышленности, в 1894 г. он занимал должность директора Департамента земледелия при МЗиГИ [1, 3, 8]. Сын крестьянина, Павел Андреевич был редким исключением среди дворянского высшего руководства министерства. Благодаря эрудиции, профессионализму и трудолюбию ученый достиг как научного, так и общественного признания. Именно с именем Павла Андреевича связывают начало реализации плана организации и развития сельскохозяйственных опытных станций в разных зонах России. Также благодаря его усилиям в ряде губерний России для подготовки агрономов были открыты агрономические школы, в которых практические занятия дополняли теоретическое обучение. Институционализацию агрономического образования ученый считал одной из основ развития отечественного сельского хозяйства. В память об ученом его имя носит Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева.

Таким образом, основные работы П.А. Костычева как агрохимика были посвящены вопросам обработки и удобрения почв. Характерной особенностью его трудов по разным вопросам агрономии, в том числе и по агрономической химии, была тесная связь теории с практикой, расширение научно-опытной работы, направленной на популяризацию знаний, увеличение продуктивности сельского хозяйства и поднятие урожайности в земледелии. Благодаря многостороннему характеру его исследований были заложены основы комплексного подхода к изучению почв. Также П.А. Костычев является одним из основоположников генетического и агрономического почвоведения, на результатах его исследований химических и физических свойств почвы основаны и современные подходы изучения почвенного плодородия и обработки почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Минеев В.Г.* Агрохимия в Московском университете М.: Изд-во "КДУ", 2013. 795 с.
2. *Шилова Е.И.* Павел Андреевич Костычев: биографический очерк // П.А. Костычев. Избр. тр. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1951. С. 597–615.
3. *Крупенников И.А., Крупенников П.А.* Павел Андреевич Костычев (1845–1895). М.: Молодая гвардия, 1955. 382 с.
4. *Крупенников И.А.* Павел Андреевич Костычев / Отв. ред. С.В. Зонн. М.: Наука, 1987. 224 с.
5. *Минеев В.Г.* История и состояние агрохимии на рубеже XXI века. Кн. 1: Развитие учения о питании растений и удобрении земель от Древнего мира до XX столетия. М.: Изд-во МГУ, 2002. 616 с.
6. *Костычев П.А.* Исследования Гельригеля над произрастанием хлебных растений // Земледельческая газета. 1868. № 24. С. 371–375.
7. *Костычев П.А.* Современное состояние учения о статике земледелия // Сел. хоз-во и лесоводство. 1869. Вып. 1. С. 1.
8. *Елина О.Ю.* От царских садов до советских полей. История сельскохозяйственных опытных учреждений XVIII–20-е годы XX в.: В 2 т. Т. II. М., 2008. 488 с.
9. *Костычев П.А.* Нерастворимые фосфорнокислые соединения почв. СПб.: Изд-е А.Ф. Девриена, 1881. С. 74 с.
10. *Костычев П.А.* О соединениях фосфорной кислоты, в виде которых она сохраняется в почве // Речи и протоколы VI съезда русских естествоиспытателей и врачей в Санкт-Петербурге. Отд. 1. СПб.: ИАН, 1880. С. 278.
11. *Кузнецов Н.П.* Вклад П.А. Костычева в развитие русской агрономической науки и сельскохозяйственного образования в России (посвящается 150-летию со дня рождения). М.: ИК "Родник", 1995. 92 с.
12. *Костычев П.А.* Фосфорнокислые удобрения // Сел. хоз-во и лесоводство. 1883. № 11. С. 113–126.
13. *Костычев П.А.* К вопросу о происхождении чернозема // Сел. хоз-во и лесоводство. 1884. № 12. С. 259–282.
14. *Костычев П.А.* Обработка и удобрение чернозема. СПб.: Изд-е А.Ф. Девриена, 1892. 304 с.
15. *Костычев П.А.* Состав органического вещества почвы в связи с низшими организмами // Тр. СПб. об-ва естествоисп. Отд. ботан. 1890. Т. 21. С. 6–9.
16. *Костычев П.А.* Учение о механической обработке почв: Руководство для практических хозяев. СПб.: Изд-е А.Ф. Девриена, 1885. 172 с.
17. *Костычев П.А.* Учение об удобрении почв. СПб.: Изд-е А.Ф. Девриена, 1893. 228 с.

To the 175th Anniversary of the Birth of P.A. Kostychev (1845–1895)

M. A. Pomelova

*S.I. Vavilov Institute of history of natural science and technology, RAS
ul. Baltiyskaya 14, Moscow 125315, Russia
E-mail: mpom@ihst.ru*

The paper considers the scientific activity of P.A. Kostychev in the context of the development of agronomic chemistry in the middle of the XIX century.

Key words: P.A. Kostychev, agronomic chemistry, middle of XIX century.