

Номер 12

ISSN 0002-1881

Декабрь 2024



АГРОХИМИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 12, 2024

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Динамика содержания минеральных элементов и эффективное плодородие аллювиальной луговой почвы в овощном севообороте
И. Ю. Васючков, О. Н. Успенская, А. А. Коломиец 5
- Изменение агрохимических свойств луговой черноземовидной почвы при длительном воздействии агрогенных факторов в зерно-соевом севообороте
В. Т. Синеговская, Е. Т. Наумченко, Е. В. Банецкая 16

Удобрения

- Усиление действия фосфорных удобрений с учетом известкования при выращивании озимой пшеницы на дерново-подзолистой почве
С. П. Бижан 22

Пестициды

- Влияние стимулирующей рост бактерии *Pseudomonas protegens* DA1.2 и ее метаболитов на повреждение рапса почвенными остатками метсульфурон-метила
М. Д. Бакаева, А. А. Кенджиева, С. Н. Стариков, С. П. Четвериков, Д. В. Четверикова 30
- Оценка эффективности биологических фунгицидов в различных системах защиты подсолнечника
А. К. Лысов, Н. И. Наумова, Д. О. Морозов, В. В. Букреев 36
- Инсектицидные композиции природных пиретринов и замещенных бензодиоксоланов из растительных масел
П. П. Муковоз, Р. И. Александров, В. Л. Семенов, С. А. Пешков, А. Н. Сизенцов, Л. Р. Валиуллин, В. П. Муковоз, Н. В. Птицына, Ю. И. Мешков 43

Агроэкология

- Секвестрация углерода экосистемами холодных территорий Забайкалья
Г. Д. Чимитдоржиева, Э. О. Чимитдоржиева, Е. Ю. Мильхеев, Ю. Б. Цыбенков, Ц. Д.-Ц. Корсунова 48
- Оценка ферментативной и микробиологической активности почвы ризосферы *Solanum tuberosum* L. под влиянием обработки клубней эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* в условиях Предуралья
С. Р. Гарипова, Л. И. Пусенкова, Л. В. Сидорова, В. А. Валиева, А. В. Чистоедова, В. Д. Матюнина, А. С. Григориади 54
- Влияние бактерий, метаболизирующих абсцизовую кислоту, на рост и содержание АБК в растениях пшеницы и почве при высокой плотности их посадки
Е. В. Мартыненко, Л. Ю. Кузьмина, Э. Р. Гаффарова, А. С. Рябова, Г. Р. Кудоярова, Л. Б. Высоцкая 64

Экотоксикология

- Ферментативная активность черноземовидной почвы при загрязнении нефтью и дизельным топливом
О. А. Пилецкая 72

Перспективные штаммы фосфатмобилизирующих ризобактерий, устойчивых к глифосату и никелю

Л. Р. Хакимова, О. В. Чубукова, Е. С. Акимова, З. Р. Вершинина

81

ОБЗОРЫ

Эффективность фосфорных удобрений: результаты исследований в длительных полевых опытах России, Великобритании и Китае

А. Н. Налиухин, Н. А. Кирпичников, С. П. Бижан, Ю. Е. Гусева

89

Предметный указатель к журналу «Агрохимия» за 2024 г.

101

Contents

No. 12, 2024

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Dynamics of the Content of Mineral Elements and Effective Fertility of Alluvial Meadow Soil in Vegetable Crop Rotation

I. Y. Vasyuchkov, O. N. Uspenskaya, A. A. Kolomiets 5

Changes in Agrochemical Properties of Meadow Chernozem-Like Soil under Prolonged Exposure to Agrogenic Factors in Grain-Soybean Crop Rotation

V. T. Sinegovskaya, E. T. Naumchenko, E. V. Banetskaya 16

Fertilizers

Enhancing the Effect of Phosphorus Fertilizers, Taking into Account Liming in Winter Wheat Cultivation on Sod-Podzolic Soil

S. P. Bizhan 22

Pesticides

Effect of the Growth-Stimulating Bacterium *Pseudomonas protegens* DA1.2 and Its Metabolites on Damage to Rapeseed by Soil Residues of Metsulfuron-Methyl

M. D. Bakaeva, A. A. Kendzhieva, S. N. Starikov, S. P. Chetverikov, D. A. Chetverikova 30

Evaluation of the Effectiveness of Biological Fungicides in Various Sunflower Protection Systems

A. K. Lysov, N. I. Naumova, D. O. Morozov, V. V. Bukreev 36

Insecticidal Compositions of Natural Pyrethrins and Substituted Benzodioxolanes from Vegetable Oils

P. P. Mukovoz, R. I. Alexandrov, V. L. Semenov, S. A. Peshkov, A. N. Sizentsov, L. R. Valiullin, V. P. Mukovoz, N. V. Ptitsyna, Yu. I. Meshkov 43

Agroecology

Carbon Sequestration by Ecosystems of Cold Territories of Transbaikalia

G. D. Chimitdorzhieva, E. O. Chimitdorzhieva, E. Yu. Milkheev, Yu. B. Tsybenov, Ts. D.-Ts. Korsunova 48

Assessment of Enzymative and Microbiological Activity of Soil Rhizosphere *Solanum tuberosum* L. under the Influence of Treatment of Tubers with Endophyte Bacteria *Bacillus subtilis* the Conditions of the Cis-Ural Region

S. R. Garipova, L. I. Pusenkova, L. V. Sidorova, V. A. Valieva, A. V. Chistoedova, V. D. Matyunina, A. S. Grigoriadi 54

Influence of ABA-Metabolizing Bacteria on the Growth and ABA Content in Wheat Plants and Soil in Dense Planting

E. V. Martynenko, L. Yu. Kuzmina, E. R. Gaffarova, A.S. Ryabova, G. R. Kudoyarova, L. B. Vysotskaya 64

Ecotoxicology

Effect of Oil and Diesel Fuel Pollution on Enzymatic Activity of Meadow Chernozem-like Soil

O. A. Piletskaya 72

Promising Strains of Phosphate-Mobilizing Rhizobacteria Resistant to Glyphosate and Nickel

L. R. Khakimova, O. V. Chubukova, E. S. Akimova, Z. R. Vershinina 81

REVIEWS

Efficiency of Phosphorus Fertilizers: Research Results in Long-Term Field Experiments in Russia, Great Britain and China

A. N. Naliukhin, N. A. Kirpichnikov, S. P. Bizhan, Yu. E. Guseva

89

Subject Index the journal 'Agrokhimiya' 2024

101

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

УДК 631.416:631.452:631.445.155:631.582:633.4

**ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
И ЭФФЕКТИВНОЕ ПЛОДОРОДИЕ АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ЛУГОВОЙ
ПОЧВЫ В ОВОЩНОМ СЕВООБОРОТЕ**© 2024 г. И. Ю. Васючков¹, О. Н. Успенская^{1,*}, А. А. Коломиец¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального
научного центра овощеводства

140153 Московская обл., Раменский р-н, д. Верей, стр. 500, Россия

*E-mail: usp-olga@yandex.ru

В овощном севообороте при разных системах удобрения овощных культур определили динамику содержания минеральных элементов питания растений, оценили эффективное плодородие почвы в сравнении с потенциальным в условиях опыта, выявили наиболее эффективную систему удобрения не только для получения наивысших урожаев, но и для сохранения, воспроизводства потенциального плодородия аллювиальной луговой почвы. Исследование проведено в 2015–2019 гг. в Раменском р-не Московской обл. на аллювиальной луговой среднесуглинистой почве центральной поймы р. Москвы. Изучена сезонная динамика содержания 3-х элементов минерального питания растений (нитратного азота, подвижных фосфора и калия) в севообороте морковь – свекла столовая – капуста поздняя за 2015–2019 гг. при применении 3-х основных систем удобрения овощных культур (минеральной, органической, органо-минеральной). Установлено, что максимум содержания нитратного азота (в среднем в севообороте 47.4 мг/кг) и подвижного калия (в среднем 156 мг/кг) приходился на 3-ю декаду июня. Содержание подвижного фосфора в почве было высоким (>200 мг/кг) во все сроки учета. Определена тесная корреляционная связь урожайности корнеплодов и капусты со средним за вегетацию содержанием нитратного азота в почве ($r = 0.735–0.934$), подвижных фосфора ($r = 0.539–0.972$) и калия ($r = 0.532–0.976$). Эффективное плодородие почвы участка под 3-мя культурами за севооборот имело следующие характеристики: при применении минеральной системы удобрения содержание нитратного азота было равно 21.3, органической – 10.1, органо-минеральной – 22.1 мг/кг, содержание подвижного фосфора при применении минеральной системы – 40.4, органической – 34.1, органо-минеральной – 47.9 мг/кг, содержание подвижного калия – 44.4, 20.6, 50.8 мг/кг соответственно. Установлено, что под посевами моркови и свеклы столовой потенциальное плодородие почвы за севооборот воспроизводилось при применении минеральной (рекомендованная доза NPK) и органо-минеральной систем удобрения этих культур, причем урожайность моркови (67–69 т/га) и свеклы (67–68 т/га) при этих системах была высокой: больше, чем ожидаемая расчетная 60 т/га. Под капустой поздней истощения почвы также не происходило при применении рекомендованной минеральной и органо-минеральной систем удобрения, урожайность 78 и 81 т/га была близкой к ожидаемой расчетной урожайности 80 т/га. При этом преимущество имела органо-минеральная система: за севооборот она сохраняла в почве на 13% больше нитратного азота, на 8% больше подвижного фосфора и на 40% больше подвижного калия, чем минеральная. Полуторная и двойная дозы минеральных удобрений под капусту позднюю привели к существенному увеличению ее урожайности (85–90 т/га), но при этом значительная часть азота (в среднем за сезон 33–41 мг/кг) в почве безвозвратно терялась.

Ключевые слова: столовые корнеплоды, капуста белокочанная поздняя, овощной севооборот, динамика содержания минеральных питательных элементов, системы удобрения, аллювиальная луговая почва, потенциальное плодородие, эффективное плодородие.

DOI: 10.31857/S0002188124120016, **EDN:** VWNZNE**ВВЕДЕНИЕ**

Морковь, свекла столовая и капуста поздняя являются важными овощными культурами, имеющими

большую питательную и пищевую ценность. В условиях центральных районов Нечерноземной зоны России, на орошаемых пойменных и торфяных почвах

имеются наиболее благоприятные условия для получения высоких урожаев данных культур.

Продовольственная безопасность и экологическая устойчивость сельскохозяйственных систем требует комплексного подхода к управлению плодородием почв. При увеличении объемов производства сельскохозяйственной продукции необходимо сводить к минимуму извлечение запасов питательных веществ из почвы, не допускать ухудшения ее физических и химических свойств, деградации земель и в том числе эрозии почв.

Плодородие почвы — это ее базовая способность обеспечивать для растений «среду обитания», удовлетворять их потребности в воде, воздухе, тепле, питательных веществах в нужных количествах в течение длительного периода времени и в конечном счете определять получение устойчивых и стабильных урожаев высокого качества.

Различают естественное, потенциальное и эффективное плодородие почвы. Естественное плодородие присуще каждой почве, оно обусловлено процессами почвообразования, минерализации и иммобилизации питательных элементов в ней и определяется мощностью гумусового горизонта, содержанием гумуса, запасами питательных веществ, интенсивностью микробиологических процессов, а также естественным водным, воздушным и тепловым режимами. Потенциальное плодородие определяется суммой свойств, приобретенных почвой в процессе почвообразования и свойств, созданных человеком в процессе ее окультуривания. Эффективное плодородие почвы, использование элементов плодородия растениями в данном году, зависит от способа использования почвы (обработки, применения удобрений, мелиорации, возделываемых растений и др.) и оценивается получаемой продуктивностью сельскохозяйственных культур. При большом потенциальном плодородии почвы эффективное может быть небольшим и, наоборот, при соответствующем уровне агротехники можно обеспечить высокое эффективное плодородие — высокий урожай на почвах с невысоким естественным плодородием. В то же время, чем выше естественное плодородие почв, тем меньше риск снижения урожая при экстремальных погодных условиях и неблагоприятном антропогенном воздействии и больше эффективность всех систем земледелия.

Урожайность сельскохозяйственных культур зависит от свойств почвы примерно на 1/3. Другими определяющими урожай факторами являются климатические условия и системы земледелия, главным образом внесение минеральных и органических удобрений. Антропогенное воздействие на почвы должно быть сбалансированным по агроэкологическим параметрам и способствовать не истощению их, а, как минимум, воспроизводству плодородия [1, 2]. При

сложившейся системе землепользования длительное воздействие комплекса агротехнических мероприятий (определенной системы удобрения, обработки почвы, орошения и т.п.) может оказывать стабильное (устойчивое) влияние на агрохимический статус почв (т.е. на ее потенциальные свойства поддерживать определенный уровень и соотношение питательных веществ).

Цель работы — определение динамики содержания минеральных элементов питания растений (азота, фосфора и калия) в течение вегетационного периода в овощном севообороте морковь — свекла столовая — капуста белокочанная при разных системах удобрения культур (минеральной, органической, органо-минеральной) и оценить эффективное плодородие почвы в сравнении с потенциальным в условиях опыта, а также определить наиболее эффективную систему удобрения не только для получения наивысших урожаев, но и для сохранения и приумножения потенциального плодородия аллювиальной луговой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2015–2019 гг. в Раменском р-не Московской обл. на аллювиальной луговой почве центральной поймы р. Москвы. Среднесуглинистая почва участка благоприятна для выращивания столовых корнеплодов и белокочанной капусты по агрохимическим показателям: pH_{KCl} 6.2–6.5, содержание гумуса — 2.9–3.1%, гидролизуемого азота — 80–110 (по Корнфилду), подвижного фосфора — 220–280 (по Чирикову), подвижного калия — 100–140 мг/кг (по Чирикову).

Погодные условия вегетационного периода (май–сентябрь) ряда лет исследования характеризовались значительными различиями в количестве осадков и температуры воздуха (табл. 1).

2015 и 2018 гг. можно охарактеризовать как сухие ($ГТК = 0.73–0.81$), 2016, 2017 и 2019 гг. — как влажные ($ГТК = 1.17–1.91$). В среднем за годы исследования сумма температур вегетационного периода (май–сентябрь) превышала среднемноголетнюю норму при выращивании столовых корнеплодов и капусты поздней на 339–404 °С (с изменениями по годам от 97.8 до 609.4 °С), а количество осадков было на уровне среднемноголетней нормы (97.6 – 108%).

Агротехника — общепринятая. Посев столовых корнеплодов осуществляли в 3-й декаде мая в гребни высотой 15 см с нормой 900 тыс. шт./га для моркови и 450 тыс. шт./га для свеклы. Высадку 40-суточной рассады капусты поздней проводили в 1-й декаде июня по схеме 70 × 40 см с расчетной густотой 35–36 тыс. шт./га. В течение вегетации проводили 2–3 междурядные обработки культиватором и 3–4 ручные прополки. Полив дождеванием применяли только при выращивании капусты (7–10 раз в сезон нормой 200–300 м³/га). Учет урожая осуществляли в 3-й

Таблица 1. Погодные условия вегетационных периодов при выращивании столовых корнеплодов и капусты поздней (2015–2019 гг.)

Месяц	Среднего- летняя норма	Годы					Среднее за годы выращивания		
		2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	моркови	свеклы столовой	капусты поздней
		Осадки, мм							
Май	50.0	57.5	76.3	84.2	52.0	56.0	72.7	70.8	64.1
Июнь	65.0	50.5	55.3	139.5	26.0	56.0	81.8	73.6	73.8
Июль	80.0	54.5	67.8	105.3	66.0	91.0	75.9	79.7	87.4
Август	70.0	3.0	145.0	67.9	29.0	51.0	72.0	80.6	49.3
Сентябрь	55.0	45.0	45.5	38.0	31.0	44.0	42.8	38.2	37.7
В сумме за сезон	320.0	210.5	389.9	434.9	204.0	298.0	345.1	342.9	312.3
% от средней многолетней	100.0	65.8	121.8	135.9	63.8	93.1	107.8	107.2	97.6
Среднесуточная температура воздуха, °С									
Май	11.7	14.5	15.0	10.6	16.6	16.5	13.4	14.1	14.6
Июнь	15.4	18.5	18.6	14.5	18.4	20.4	17.2	17.2	17.8
Июль	17.6	18.9	21.6	17.6	20.9	17.2	19.4	20.0	18.6
Август	15.8	18.6	20.3	18.7	20.0	16.7	19.2	19.7	18.5
Сентябрь	10.5	14.1	11.9	12.8	15.0	12.7	12.9	13.2	13.5
В среднем за сезон	14.2	16.9	17.5	14.8	18.2	16.7	16.4	16.8	16.6
Сумма температур	2175.1	2590.0	2678.9	2272.9	2784.5	2555.4	2513.9	2578.8	2537.6
Отклоне- ние от средней многолетней	0.0	414.9	503.8	97.8	609.4	380.3	338.8	403.7	362.5
ГТК	1.47	0.81	1.46	1.91	0.73	1.17	—	—	—

декаде сентября, с разделением продукции на стандартную и нестандартную фракции.

Исследования вели в овощном севообороте с чередованием культур: морковь (2015–2017 гг.) – свекла столовая (2016–2018 гг.) – капуста поздняя (2017–2019 гг.) с применением минеральной, органической и органо-минеральной систем удобрения.

В качестве факторов почвенного плодородия изучали следующие элементы минерального питания: содержание нитратного азота, подвижных фосфора и калия. Контролем служили варианты без внесения удобрений, характеризующие потенциальное плодородие почвы в опыте.

Минеральная система удобрения включала в себя следующие варианты:

1 – рекомендованная доза NPK на получение урожая корнеплодов 60 т/га (N90P60K180 для моркови и N150P60K210 для свеклы) и 80 т/га для капусты поздней (N140P60K220). В основное внесение

использовали азофоску – 16% д.в., аммиачную селитру – 34% N, хлористый калий – 60% K₂O; 2–1/2 рекомендованной дозы (½ NPK); 3–1/2 рекомендованной дозы (½ NPK) + корневая подкормка растений в зависимости от анализа почвы в фазе начала образования корнеплодов и кочанов капусты; 4–1/2 рекомендованной дозы (½ NPK) + корневая подкормка растений в зависимости от анализа черешка листа; 5–1½ рекомендованной дозы (1½ NPK) для капусты поздней; 6 – двойная рекомендованная доза (2 NPK) для капусты поздней.

Органическая система удобрения была представлена вариантами с внесением биокомпоста дозой 3 т/га под морковь и 5 т/га под свеклу и капусту; доза его была выровнена по азоту, внесенному в почву на делянках с рекомендованной дозой NPK. Учитывая среднее содержание в биокомпосте N – 3, P₂O₅ – 2, K₂O – 2%, было внесено: под морковь – 90 кг азота, по 60 кг/га фосфора и калия; под свеклу и капусту – по 150 кг азота и по 100 кг фосфора и калия.

Органо-минеральная система была представлена вариантами с внесением рекомендованных доз NPK совместно с биокомпостом. Биокомпост должен был обогатить почву органическим веществом (содержал $\approx 30\%$ органического углерода) и полезной микрофлорой, а NPK – компенсировать нехватку питательных веществ для роста и развития растений.

Основное внесение минеральных и органических удобрений осуществляли весной (2-я декада мая) под фрезерование с одновременной нарезкой гребней культиватором-гребнеобразователем. Корневые подкормки проводили в период начала образования корнеплодов и кочанов (1–2-я декады июля) в междурядья. Суммарная в севообороте доза подкормки в зависимости от анализа черешка листа составила N65K20, анализа почвы – N135K125. Исследования, анализы и обработка результатов опытов проведены в соответствии с общепринятыми методиками [3–5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы Нечерноземной зоны существенно отличаются между собой по содержанию и динамике питательных элементов [6]. Многочисленные исследования показали, что аллювиальные луговые среднесуглинистые почвы обладают хорошим потенциальным плодородием, а системы удобрения по-разному воздействуют на их питательный режим [7–9].

В течение вегетационного периода, ежемесячно в пахотном горизонте почвы (0–25 см) опытного участка определяли содержание нитратного азота, подвижных фосфора и калия (табл. 2–4).

Наличие различий питательного режима почвы в различных вариантах опыта были обусловлены величиной доз удобрений в основное внесение и в подкормки, а также особенностями поглощения элементов культурой, однако общие тренды прослежены для всех культур. После внесения удобрений их количество значительно возрастало, достигая максимума в 3-й декаде июня, а затем от месяца к месяцу снижалось до минимума к окончанию вегетации. Например, в среднем в севообороте, если принять исходное содержание элемента (до внесения удобрений) за 100%, то в 3-й декаде июня содержание N-NO₃ составляло 314% к контролю, подвижного P₂O₅ – 105%, подвижного K₂O – 134%; во 2-й декаде июля – 173, 103 и 101%, во 2-й декаде августа – 91, 101 и 88% и в 3-й декаде сентября – 40, 99 и 76% соответственно. В целом за вегетационный период, в среднем в севообороте содержание нитратного азота в зависимости от системы удобрения составляло 152–993% к контролю, подвижного фосфора – 105–125, подвижного калия – 108–172%. Естественно, чем больше была доза внесения элемента в составе удобрения, тем было больше определяемое содержание его в почве и тем выше продуктивность культуры (табл. 5).

Таблица 2. Потенциальное и эффективное плодородие почвы (слой 0–25 см) в зависимости от содержания нитратного азота при применении систем удобрения в овощном севообороте (2015–2019 гг.)

Система удобрения	Внесено азота, кг д. в./га	Потенциальное плодородие, мг/кг (май, 2-я декада)	Эффективное плодородие по содержанию N-NO ₃						
			июнь, 3-я декада	июль, 2-я декада	август, 2-я декада	сентябрь, 3-я декада	среднее за сезон		
							мг/кг	% от контроля	± к потенциальному, мг/кг
Морковь, 2015–2017 гг.									
Контроль без удобрений	0	11.1	21.2	6.6	5.0	3.1	9.4	100	–1.7
½ NPK	45	12.7	31.3	21.2	11.0	6.2	16.5	175	3.8
½ NPK + подкормка (анализ листа)	65	13.4	33.3	30.8	18.2	9.2	21.0	223	7.6
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	55	14.7	48.4	28.7	12.3	6.3	22.1	235	7.4
Среднее с подкормками	60	14.1	40.9	29.8	15.3	7.8	21.5	229	7.5

Таблица 2. Окончание

Система удобрения	Внесено азота, кг д.в./га	Потенциальное плодородие, мг/кг (май, 2-я декада)	Эффективное плодородие по содержанию N-NO ₃						
			июнь, 3-я декада	июль, 2-я декада	август, 2-я декада	сентябрь, 3-я декада	среднее за сезон		
							мг/кг	% от контроля	± к потенциальному, мг/кг
Морковь, 2015–2017 гг.									
Полная минеральная	90	17.6	67.3	32.2	19.3	8.9	29.1	309	11.5
Органическая	90	16.8	25.6	14.5	11.0	5.0	14.6	155	–2.2
Органо-минеральная	180	17.0	63.2	34.4	15.6	8.8	27.8	296	10.8
Среднее на дату	–	14.7	41.4	24.8	13.5	6.9			
Свекла столовая, 2016–2018 гг.									
Контроль без удобрений	0	12.7	18	6.6	3.2	1.6	8.4	100	–4.3
½ NPK	75	16.7	42.9	22.7	9.5	3.6	19.1	227	2.4
½ NPK + подкормка (анализ листа)	80	16.1	44.6	25.4	10.3	4.3	20.1	239	4.0
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	125	17.3	46.0	26.6	21.3	9.2	24.1	286	6.8
Среднее с подкормками	103	16.7	45.3	26.0	15.8	6.8	22.1	263	5.4
Полная минеральная	150	19.9	81.1	38.2	22.8	10.9	34.6	411	14.7
Органическая	150	17.0	42.3	32.1	22.7	5.3	23.9	284	6.9
Органо-минеральная	300	18.6	99.3	39.5	18.7	9.1	37.0	440	18.4
Среднее на дату	–	16.9	52.4	27.1	15.5	6.3			
Капуста поздняя, 2017–2019 гг.									
Контроль без удобрений	0	11.4	7.6	3.3	2.3	2.8	5.5	100	–5.9
½ NPK	70	13.1	18.4	4.2	2.6	3.4	8.3	152	–4.8
½ NPK + подкормка (анализ листа)	110	15.1	17.8	4.7	3.8	4.4	9.2	167	–5.9
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	145	12.8	27.4	11.1	5.9	4.5	12.3	225	–0.5
Среднее с подкормками	128	14.0	22.6	7.9	4.9	4.5	10.8	196	–3.2
Полная минеральная	140	15.2	73.3	20.8	4.7	4.2	23.6	431	8.4
1½ NPK	210	13.7	101	74.7	36.5	8.7	47.0	857	33.3
2 NPK	280	13.3	117	82.6	47.5	11.9	54.4	993	41.1
Органическая	150	13.9	30.7	25.8	3.3	2.4	15.2	278	1.3
Органо-минеральная	290	15.0	68.4	27.8	9.1	3.6	24.8	452	9.8
Среднее на дату	–	13.7	48.4	26.3	12.1	5.0	–	–	–
Среднее на дату в севообороте	–	15.1	47.4	26.1	13.7	6.1	–	–	–

Таблица 3. Потенциальное и эффективное плодородие почвы (слой 0–25 см) в зависимости от содержания подвижного фосфора (по методу Чирикова) при применении систем удобрения в овощном севообороте (2015–2019 гг.)

Система удобрения	Внесено фосфора, кг д.в./га	Потенциальное плодородие, мг/кг (май, 2-я декада)	Эффективное плодородие по содержанию P ₂ O ₅						
			июнь, 3-я декада	июль, 2-я декада	август, 2-я декада	сентябрь, 3-я декада	среднее за сезон		
							мг/кг	% контроля	± к потенци- альному, мг/кг
Морковь, 2015–2017 гг.									
Контроль без удобрений	0	238	236	225	220	218	227	100	–10.6
½ NPK	30	245	260	257	243	238	249	109	3.6
½ NPK + подкормка (анализ листа)	30	247	265	259	243	236	250	110	3.0
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	30	251	269	255	248	240	253	111	1.6
Среднее с подкормками	30	249	267	257	246	238	251	111	2.3
Полная минеральная	60	256	280	280	276	269	272	120	16.2
Органическая	60	249	260	262	284	277	266	117	17.4
Органо-минеральная	120	265	282	294	297	288	285	125	20.2
Среднее на дату	–	250	265	261	257	251			
Свекла столовая, 2016–2018 гг.									
Контроль без удобрений	0	225	220	226	217	210	220	100	–5.4
½ NPK	30	231	240	238	231	228	234	106	2.6
½ NPK + подкормка (анализ листа)	30	234	244	236	230	226	234	107	0.0
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	30	235	247	236	232	230	236	108	1.0
Среднее с подкормками	30	235	246	236	231	228	235	107	0.5
Полная минеральная	60	241	262	250	248	250	250	114	9.2
Органическая	100	251	273	263	256	261	261	119	9.8
Органо-минеральная	160	256	280	275	260	268	267	122	11.8
Среднее на дату	–	238	251	245	238	238			
Капуста поздняя, 2017–2019 гг.									
Контроль без удобрений	0	229	236	232	220	207	225	100	–4.2
½ NPK	30	240	247	243	235	224	238	106	–2.2
½ NPK + подкормка (анализ листа)	30	238	241	245	236	226	237	106	–0.8
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	30	237	240	248	243	235	241	107	3.6
Среднее с подкормками	30	238	241	247	240	231	239	106	1.4
Полная минеральная	60	261	277	279	271	264	270	120	9.4
1½ NPK	90	273	288	277	276	267	276	123	3.2
2 NPK	120	275	289	278	283	271	279	124	4.2
Органическая	100	242	250	252	250	240	247	110	4.8
Органо-минеральная	160	257	265	269	263	258	262	117	5.4
Среднее на дату	–	249	257	257	252	242			
Среднее на дату в севообороте	–	246	258	254	249	244			

Таблица 4. Потенциальное и эффективное плодородие почвы (слой 0–25 см) в зависимости от содержания подвижного калия (по методу Чирикова) при применении систем удобрения в овощном севообороте (2015–2019 гг.)

Система удобрения	Внесено калия, кг д.в./га	Потенциальное плодородие, мг/кг (май, 2-я декада)	Эффективное плодородие по содержанию K ₂ O						
			июнь, 3-я декада	июль, 2-я декада	август, 2-я декада	сентябрь, 3-я декада	среднее за сезон		
							мг/кг	% контроля	± к потенци- альному, мг/кг
Морковь, 2015–2017 гг.									
Контроль без удобрений	0	109	119	111	82.0	79.0	100	100	–9.0
½ NPK	90	123	160	124	106	86.0	120	120	–3.2
½ NPK + подкормка (анализ листа)	100	125	160	124	101	83.0	119	119	–6.4
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	130	122	168	133	112	91.0	125	125	3.2
Среднее с подкормками	115	124	164	129	107	87.0	122	122	–1.6
Полная минеральная	180	136	195	146	133	118	146	146	9.6
Органическая	60	127	142	128	101	93.0	118	118	–8.8
Органо-минеральная	240	140	205	167	156	137	161	161	21.0
Среднее на дату	–	126	164	133	112	96.8			
Свекла столовая, 2016–2018 гг.									
Контроль без удобрений	0	107	121	97.0	71.0	66.0	92.4	100	–14.6
½ NPK	105	112	151	94.0	79.0	72.0	102	110	–10.4
½ NPK + подкормка (анализ листа)	115	112	147	93.0	78.0	68.0	99.6	108	–12.4
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	130	110	152	98.0	86.0	77.0	105	113	–5.4
Среднее с подкормками	123	111	150	95.5	82.0	72.5	102	111	–8.9
Полная минеральная	210	125	186	156	135	111	143	154	17.6
Органическая	100	120	168	100	92.0	80.0	112	121	–8.0
Органо-минеральная	310	132	195	159	135	99.0	144	156	12.0
Среднее на дату	–	116	159	112	94.8	80.7			
Капуста поздняя, 2017–2019 гг.									
Контроль без удобрений	0	96.0	87.0	85.0	76.0	69.0	82.6	100	–13.4
½ NPK	110	103	123	91.0	77.0	77.0	94.2	114	–8.8
½ NPK + подкормка (анализ листа)	110	100	119	84.0	85.0	81.0	93.8	114	–6.2
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	170	102	119	90.0	88.0	85.0	96.8	117	–5.2
Среднее с подкормками	140	101	119	87.0	86.5	83.0	95.3	115	–5.7
Полная минеральная	220	118	176	114	105	88.0	120	146	2.2
1½ NPK	330	110	192	147	130	104	137	165	26.6
2 NPK	440	111	206	150	139	105	142	172	31.2
Органическая	100	109	134	119	93.0	78.0	107	129	–2.4
Органо-минеральная	320	114	169	120	112	97.0	122	148	8.4
Среднее на дату	–	106	144	109	99.2	86.7			
Среднее на дату в севообороте	–	116	156	118	102	88.1			

Таблица 5. Урожайность культур овощного севооборота в зависимости от систем удобрения (2015–2019 гг.)

Система удобрения	Внесено NPK, кг д.в./га	Урожайность			Окупае- мость 1 кг д.в. урожаем, кг
		общая		стандарт- ная, % от общей	
		т/га	% от конт- роля		
Морковь, 2015–2017 гг.					
Контроль без удобрений	0	56.9	100	81.0	—
½ NPK	165	64.8	114	81.9	47.9
½ NPK + подкормка (анализ листа)	195	70.4	124	78.0	69.2
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	215	70.3	124	80.9	62.3
Среднее с подкормками	205	70.4	124	79.5	65.6
Полная минеральная	330	67.1	118	77.9	30.9
Органическая	210	65.5	115	77.6	41.0
Органо-минеральная	540	69.0	121	75.5	22.4
HCP ₀₅		3.8			
Корреляция со средним за сезон содержанием питательных веществ в почве					
N-NO ₃	—	0.735*	*Существенна на 5%-ном уровне $t_{r \text{ факт}} \geq t_{r \text{ теор}}$		
P ₂ O ₅ (по Чирикову)	—	0.539			
K ₂ O (по Чирикову)	—	0.532			
Свекла столовая, 2016–2018 гг.					
Контроль без удобрений	0	52.0	100	93.0	—
½ NPK	210	57.3	110	95.8	25.2
½ NPK + подкормка (анализ листа)	225	62.7	121	93.1	47.6
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	285	62.0	119	92.7	35.1
Среднее с подкормками	255	62.4	120	92.9	40.6
Полная минеральная	420	67.9	131	93.7	37.9
Органическая	350	63.4	122	92.6	32.6
Органо-минеральная	770	66.5	128	95.2	18.8
HCP ₀₅		4.1			
Корреляция со средним за сезон содержанием питательных веществ в почве					
N-NO ₃	—	0.928*	*Существенна на 5%-ном уровне $t_{r \text{ факт}} \geq t_{r \text{ теор}}$		
P ₂ O ₅ (по Чирикову)	—	0.784*			
K ₂ O (по Чирикову)	—	0.793*			
Капуста поздняя, 2017–2019 гг.					
Контроль без удобрений	0	54.8	100	91.0	—
½ NPK	210	60.5	110	93.0	27.1
½ NPK + подкормка (анализ листа)	250	64.1	117	93.7	37.2
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	345	65.4	119	94.3	30.7
Среднее с подкормками	298	64.8	118	94.0	33.4
Полная минеральная	420	78.3	143	95.7	56.0
1½ NPK	630	85.1	155	95.9	48.1
2 NPK	840	90.2	165	95.6	42.1
Органическая	350	63.5	116	93.6	24.9
Органо-минеральная	770	81.2	148	96.2	34.3
HCP ₀₅		4.0			
Корреляция со средним за сезон содержанием питательных веществ в почве					
N-NO ₃	—	0.934*	*Существенна на 5%-ном уровне $t_{r \text{ факт}} \geq t_{r \text{ теор}}$		
P ₂ O ₅ (по Чирикову)	—	0.972*			
K ₂ O (по Чирикову)	—	0.976*			

В табл. 2–4 приведены данные эффективного плодородия почвы опытного участка при применении разных систем удобрения для моркови, свеклы

столовой и капусты поздней в сравнении с исходным, потенциальным плодородием. Анализы почвы для определения потенциального плодородия

проводили во 2-й декаде мая, до посева семян столовых корнеплодов, высадки рассады капусты и внесения удобрений.

В среднем в севообороте (за 5 лет) содержание нитратного азота в почве опытного участка под 3-мя культурами составило 29.1 мг/кг при применении минеральной системы удобрения (полная рекомендованная доза NPK), 17.9 мг/кг – при использовании органической системы удобрения, 29.9 мг/кг – при использовании органо-минеральной системы. Содержание подвижного фосфора было равно соответственно 264, 258, 272 мг/кг, содержание подвижного калия – 136, 112, 143 мг/кг.

Потенциальное плодородие опытного участка за тот же срок в зависимости от изученного фактора характеризовалось следующими содержаниями элементов минерального питания: азота нитратного – 7.8, подвижного фосфора – 224, подвижного калия – 91.7 мг/кг.

Таким образом, эффективное плодородие почвы участка под 3-мя культурами за севооборот имело следующие характеристики: при применении минеральной системы удобрения содержание нитратного азота было равно 21.3, органической – 10.1, органо-минеральной – 22.1 мг/кг, подвижного фосфора при применении минеральной системы – 40.4, органической – 34.1, органо-минеральной – 47.9 мг/кг, подвижного калия – 44.4, 20.6, 50.8 мг/кг соответственно.

В табл. 2–4 приведены итоговые средние за сезон величины содержания элементов эффективного плодородия по отношению к потенциальному для всех 3-х культур севооборота. Число со знаком «минус» означает, что к концу вегетации произошло истощение почвы по содержанию данного элемента. Анализ этих данных показал, что в контрольных вариантах под всеми 3-мя культурами происходило истощение

почвы по содержанию всех 3-х исследованных элементов плодородия, что было вполне естественно. Под морковь (за 3 года) при применении половинной рекомендованной дозы NPK и половинной дозы NPK с подкормкой в зависимости от анализа черешка листа происходило истощение почвы по содержанию калия, а при применении органической системы – по содержанию калия и нитратного азота. В почве под свеклой столовой (за 3 года) отмечена та же закономерность, только по содержанию калия почва истощалась еще и в варианте с половинной дозой NPK и корневой подкормкой в зависимости от анализа почвы, а при применении органической системы почва сохраняла положительный баланс содержания нитратного азота. В почве под капустой (за 3 года) отмечен отрицательный баланс содержания нитратного азота во всех 3-х вариантах с половинной дозой NPK, содержания фосфора подвижного в 2-х вариантах с половинной дозой NPK, содержания калия подвижного в 3-х вариантах с половинной дозой NPK и при применении органической системы удобрения. При применении полной рекомендованной дозы NPK и органо-минеральной систем удобрения истощения почвы по содержанию всех изученных элементов минерального питания не происходило под всеми 3-мя овощными культурами.

Если суммировать эти данные при применении разных систем удобрения, то в целом в севообороте выявлена следующая закономерность (табл. 6).

В почве под морковью и свеклой столовой потенциальное плодородие почвы воспроизводилось при применении минеральной (рекомендованной дозой NPK) и органо-минеральной систем удобрения этих культур, причем урожайность моркови (67–69 т/га) и свеклы (67–68 т/га) при этих системах была высокая: больше, чем ожидаемая расчетная 60 т/га. Под капустой поздней истощения почвы

Таблица 6. Содержание элементов эффективного плодородия в сравнении с потенциальным (среднее в севообороте при применении разных системах удобрения)

Система удобрения	Элементы минерального питания, мг/кг		
	Нитратный азот, N-NO ₃	Фосфор подвижный, P ₂ O ₅	Калий подвижный, K ₂ O
Контроль	– 7.3	– 6.7	– 12.3
Минеральная:			
NPK (расчетная)	+11.5	+11.6	+ 9.8
½ NPK	+ 0.5	+ 1.3	– 7.5
½ NPK + подкормка (анализ почвы)	+4.6	+ 2.1	+ 2.5
½ NPK + подкормка (анализ листа)	+ 1.9	+ 2.7	– 8.3
1 ½ NPK (для капусты)	+33.3	+ 3.2	+26.6
2 NPK (для капусты)	+46.1	+ 4.2	+31.2
Органическая	+ 2.0	+10.7	– 6.4
Органо-минеральная	+13.0	+12.5	+13.8

также не происходило при применении рекомендованной минеральной и органо-минеральной систем удобрения, урожайность 78 и 81 т/га были близки к ожидаемой расчетной урожайности 80 т/га. Применение полуторной и двойной доз минеральных удобрений под капусту позднюю привело к существенному увеличению ее урожайности (85–90 т/га), но при этом значительная часть азота (в среднем за сезон 33–41 мг/кг) в почве оказалась «лишней» (табл. 2) и могла быть безвозвратно утеряна.

Половинная доза минеральных удобрений приводила к истощению почвы по содержанию калия под всеми 3-мя культурами, а под капустой поздней – еще и по содержанию азота. Корневые подкормки растений в середине вегетации (фаза начала образования корнеплодов или формирования кочана) на основании данных анализа почвы и черешков листьев в некоторой степени «смягчали» истощение почвы по содержанию калия и азота. Урожайность моркови и свеклы столовой при этом была достаточно высокой (62–70 т/га), капусты поздней – низкой (\approx 65 т/га).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, как фактор почвенного плодородия изучена сезонная динамика содержания 3-х элементов минерального питания растений (азота нитратного, фосфора и калия подвижных) в овощном севообороте морковь – свекла столовая – капуста поздняя в 2015–2019 гг. на аллювиальной луговой почве при применении 3-х основных систем удобрения (минеральной, органической, органо-минеральной).

Максимум содержания нитратного азота (в среднем в севообороте 47.4 мг/кг) и подвижного калия (в среднем 156 мг/кг) приходился на 3-ю декаду июня. Содержание подвижного фосфора в почве было высоким (>200 мг/кг) во все сроки учета. Определена тесная корреляционная связь урожайности корнеплодов и капусты со средним за вегетацию содержанием нитратов в почве ($r = 0.735–0.934$), подвижного фосфора ($r = 0.539–0.972$) и подвижного калия ($r = 0.532–0.976$).

В среднем в севообороте (за 5 лет) содержание нитратного азота в почвах опытного участка под 3-мя культурами составило 29.1 мг/кг при применении минеральной системы удобрения (полной рекомендованной дозы NPK), 17.9 мг/кг – при использовании органической системы удобрения, 29.9 мг/кг – при использовании органо-минеральной системы, содержание подвижного фосфора – соответственно 264, 258, 272 мг/кг, содержание подвижного калия – соответственно 136, 112, 143 мг/кг. Потенциальное плодородие почвы опытного участка за тот же срок характеризовалось следующими содержаниями элементов минерального питания: нитратного

азота – 7.8, фосфора подвижного – 224, калия подвижного – 91.7 мг/кг.

Эффективное плодородие почвы опытного участка под 3-мя культурами за севооборот, таким образом, составило: при применении минеральной системы удобрения содержание нитратного азота было равно 21.3 мг/кг, органической – 10.1 мг/кг, органо-минеральной – 22.1 мг/кг, содержание подвижного фосфора – 40.4, 34.1, 47.9 мг/кг соответственно, содержание подвижного калия – 44.4, 20.6, 50.8 мг/кг соответственно.

Установлено, что под морковью и свеклой столовой потенциальное плодородие почвы воспроизводилось при применении минеральной (рекомендованной дозы NPK) и органо-минеральной систем удобрения этих культур, причем урожайность моркови (67–69 т/га), и свеклы (67–68 т/га) при применении этих систем была высокой больше, чем ожидаемая расчетная 60 т/га. Под капустой поздней истощения почвы также не происходило при применении рекомендованной минеральной и органо-минеральной систем удобрения, при этом урожайность 78 и 81 т/га была близкой к ожидаемой расчетной урожайности 80 т/га.

Применение полуторной и двойной дозы минеральных удобрений под капусту позднюю привело к существенному увеличению ее урожайности (85–90 т/га), но при этом значительная часть азота (в среднем за сезон 33–41 мг/кг) в почве оказывалась «лишней» и могла быть безвозвратно утеряна.

Применение половинной дозы минеральных удобрений приводило к истощению почвы по содержанию калия под всеми 3-мя культурами, под капустой поздней – еще и по содержанию азота. Корневые подкормки растений в середине вегетации на основе почвенной и листовой диагностики питания в некоторой степени «смягчали» истощение почвы по содержанию калия и азота. Урожайность моркови и свеклы столовой при этом была достаточно высокой (62–70 т/га), капусты поздней – низкой (\approx 65 т/га).

Таким образом, наиболее эффективными системами удобрения почвы для получения наивысших урожаев овощных корнеплодов и капусты поздней при одновременном воспроизводстве почвенного плодородия были рекомендованная минеральная и органо-минеральная системы. При этом значительное преимущество имела органо-минеральная система, при ее применении за севооборот в почве сохранялось на 13% больше (в сравнении с минеральной) нитратного азота, на 8% – подвижного фосфора и на 40% – подвижного калия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журбицкий З.И. Физиологические и агрохимические основы применения удобрений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 294 с.
2. Ковылин В.М., Борисов В.А., Борисова Л.М., Масловский С.А. Влияние систем удобрения в овоще-кормовом севообороте на агрохимические показатели плодородия аллювиальной луговой почвы //Агрохимия. 2004. № 10. С. 14–21.
3. Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. М.: РАСХН, ВНИИО, 2011. 648 с.
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
5. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
6. Кораблева Л.И. Плодородие, агрохимические свойства и удобрение пойменных почв Нечерноземной зоны. М.: Наука, 1969. 278 с.
7. Борисов В.А. Удобрение овощных культур. М.: Колос, 1978. 207 с.
8. Борисов В.А., Ваняев С.С., Егоров С.С., Ермаков Н.Ф. Пойменное овощеводство. М.: Росагропромиздат, 1991. 223 с.
9. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

Dynamics of the Content of Mineral Elements and Effective Fertility of Alluvial Meadow Soil in Vegetable Crop Rotation

I. Y. Vasyuchkov^a, O. N. Uspenskaya^{a, #}, A. A. Kolomiets^a

^aThe All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing, the Branch branch of the Federal Scientific Center of Vegetable Growing, village Vereya, building 500, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia

[#]E-mail: usp-olga@yandex.ru

In vegetable crop rotation with different fertilization systems of vegetable crops, the dynamics of the content of mineral elements of plant nutrition was determined, effective soil fertility was evaluated in comparison with potential under experimental conditions, and the most effective fertilizer system was identified not only to obtain the highest yields, but also to preserve and reproduce the potential fertility of alluvial meadow soil. The study was conducted in 2015–2019 in the Ramensky district of the Moscow region on the alluvial meadow medium loamy soil of the central floodplain of the Moscow River. The seasonal dynamics of the content of 3 elements of plant mineral nutrition (nitrate nitrogen, mobile phosphorus and potassium) in the carrot – beet – cabbage crop rotation was studied, using 3 main fertilization systems for vegetable crops (mineral, organic, organo-mineral). It was found that the maximum content of nitrate nitrogen (on average in crop rotation 47.4 mg/kg) and mobile potassium (on average 156 mg/kg) occurred in the third decade of June. The content of mobile phosphorus in the soil was high (>200 mg/kg) at all accounting periods. A close correlation was determined between the yield of root crops and cabbage with the average content of nitrate nitrogen in the soil during the growing season ($r = 0.735–0.934$), mobile phosphorus ($r = 0.539–0.972$) and potassium ($r = 0.532–0.976$). The effective soil fertility of the site under 3 crops per crop rotation had the following characteristics: when using a mineral fertilizer system, the content of nitrate nitrogen was 21.3, organic – 10.1, organo-mineral – 22.1 mg/kg, the content of mobile phosphorus when using a mineral system – 40.4, organic – 34.1, organo-mineral – 47.9 mg/kg, the content of mobile potassium is 44.4, 20.6, 50.8 mg/kg, respectively. It was found that under crops of carrots and beets, the potential fertility of the soil during crop rotation was reproduced with the use of mineral (recommended dose of NPK) and organo-mineral fertilization systems of these crops, and the yield of carrots (67–69 t/ha) and beets (67–68 t/ha) under these systems was high, more than expected estimated 60 t/ha. Under cabbage, late soil depletion also did not occur when using the recommended mineral and organo-mineral fertilizer systems, yields of 78 and 81 t/ha were close to the expected estimated yield of 80 t/ha. At the same time, the organo-mineral system had an advantage: during crop rotation, it retained 13% more nitrate nitrogen in the soil, 8% more mobile phosphorus and 40% more mobile potassium than the mineral one. One and a half and double doses of mineral fertilizers for late cabbage led to a significant increase in its yield (85–90 t/ha), but at the same time a significant part of nitrogen (on average for the season 33–41 mg/kg) was irretrievably lost in the soil.

Keywords: table root crops, late cabbage, vegetable crop rotation, dynamics of the content of mineral nutrients, fertilizer systems, alluvial meadow soil, potential fertility, effective fertility.

УДК 631.41:631.445.4:631.582

ИЗМЕНЕНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛУГОВОЙ ЧЕРНОЗЕМОВИДНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ АГРОГЕННЫХ ФАКТОРОВ В ЗЕРНО-СОЕВОМ СЕВООБОРОТЕ

© 2024 г. В. Т. Синеговская^{1,*}, Е. Т. Наумченко¹, Е. В. Банецкая¹¹Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт сои»
675000 Амурская обл., Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 19, Россия

*E-mail: valsino9@gmail.com

В длительном стационарном опыте по изучению системы удобрений в севообороте, заложенном в 1962–1964 гг. на луговой черноземовидной почве в южной природно-климатической зоне Амурской области, изучили влияние длительного использования минеральной и органо-минеральной систем удобрения на агрохимические свойства луговой черноземовидной почвы во взаимосвязи с уровнем урожайности культур в севообороте. Применение одних минеральных удобрений и совместно с органическими обеспечило увеличение содержания в почве подвижного фосфора в 2.0–2.5 раза, его подвижность – в 2.9–3.5 раза относительно контроля. Длительное применение органо-минеральной системы удобрения привело к увеличению содержания гумуса на 0.69% и сохранению показателей кислотности на уровне исходного, в то время как внесение только минеральных удобрений повысило гидролитическую и обменную кислотности. Урожайность пшеницы при внесении N30 на фоне длительного применения удобрений к 12-й ротации севооборота повышалась на 0.58 т/га относительно контроля, при его последствии – на 0.30 т/га. При этом урожайность сои составляла 2.42–2.62 т/га. Установлено, что продуктивность севооборота на 73% определялась изменением показателей содержания гумуса, почвенной кислотности и содержания подвижного P_2O_5 в слое 0–20 см почвы. Связь продуктивности севооборота с содержанием гумуса была слабой ($\beta = 0.26$), гидролитической кислотностью – средней обратной ($\beta = -0.57$), обменной кислотностью – сильной обратной ($\beta = -0.81$) и содержанием фосфора – сильной ($\beta = 0.84$). Величины r -уровней и коэффициентов Стьюдента свидетельствовали о том, что гидролитическая и обменная кислотности, содержание подвижного фосфора были статистически значимыми переменными.

Ключевые слова: удобрения, агрохимические свойства почвы, подвижный фосфор, длительный стационарный опыт, луговая черноземовидная почва, севооборот, урожайность, соя, пшеница.

DOI: 10.31857/S0002188124120027, **EDN:** VWLSXZ

ВВЕДЕНИЕ

Уровень плодородия почвы определяется в первую очередь запасами органического вещества и питательных веществ. Общеизвестно, что при вовлечении почвы в сельскохозяйственный оборот происходят существенные изменения ее минеральной и органической составляющей за счет размыкания биологического круговорота, связанного с отчуждением растительной продукции с урожаем. Нарушение баланса питательных веществ, в свою очередь, приводит к снижению плодородия почвы и урожайности сельскохозяйственных культур [1–3]. Повышение плодородия пахотных почв связано с использованием комплекса мероприятий по оптимизации их агрохимических, физико-химических и биологических свойств [4, 5]. К числу важнейших из них принадлежит разработка научно обоснованных систем

применения удобрений. Длительное изучение свойств пахотных почв с выявлением изменения агрохимических показателей необходимо для определения их влияния на уровень урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от размещения посевов в системе севооборота с учетом биологических особенностей каждой культуры и воспроизводства плодородия почвы [6, 7]. В этой связи объективно оценить изменение агрохимического состояния почвы в зависимости от уровня продуктивности культур в севообороте под действием применения сравнительно невысоких доз минеральных и органических удобрений возможно только в длительных стационарных полевых опытах [8–10].

В течение 62-х лет в 5-польном зерно-соевом севообороте ФНЦ ВНИИ сои проводят мониторинг плодородия луговой черноземовидной почвы на фоне

применения различных систем удобрения. В конце каждой ротации определяют показатели агрохимической характеристики и их влияние на продуктивность культур севооборота.

Цель работы — изучить влияние длительного использования минеральной и органо-минеральной систем удобрения на агрохимические свойства луговой черноземовидной почвы во взаимосвязи с уровнем урожайности культур в севообороте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В Российской Федерации более 80 лет существует Географическая сеть опытов с удобрениями, созданная Д.Н. Прянишниковым, в которой зарегистрирован длительный стационарный опыт ВНИИ сои по изучению системы удобрений в зерно-соевом севообороте. Исследование в длительном опыте предполагает мониторинг плодородия и продуктивности пашни в южной природно-климатической зоне Приамурья.

Полевой опыт заложен в 1962–1964 гг. в 5-польном севообороте с соей (40%), пшеницей (40%) и однолетними травами — 20% (табл. 1).

Повторность в опыте — трехкратная во времени и пространстве. Общая площадь делянки — 180 м², учетная — 75 м². Опыты выполнены после зяблевой вспашки в комплексе с весенней культивацией и боронованием почвы. Согласно схеме опыта, применяли минеральные удобрения в форме N_{аа}, Р_{сд} и К_х. В качестве органического удобрения вносили полуперепревший навоз крупного рогатого скота. В почве определяли величину рН_{KCl} потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность — методом Каппена в модификации ЦИНАО, подвижный фосфор — методом Кирсанова, подвижность фосфат-иона — по Карпинскому — Замятиной, гумус — по методу Тюрина в модификации

Пономаревой — Плотниковой. Урожайность пшеницы и сои учитывали методом сплошного обмолота комбайном «John Deere 3070», сое-овсяной смеси — вручную с 3-х пробных площадок на каждой делянке опыта. Для проведения аналитических расчетов корреляционно-регрессионного анализа использовали пакеты программ Microsoft Office и Statistica 10.0.

Климат Амурской области относится к муссонному по характеру формирования и к резко континентальному — по температурным признакам. Он характеризуется большим количеством солнечных дней, коротким безморозным периодом, значительными изменениями количества осадков и температуры. Агроклиматические условия данной территории позволяют успешно возделывать многие сельскохозяйственные культуры, в том числе теплолюбивые — сою. Луговые черноземовидные почвы (Классификация и диагностика почв СССР, 1977) составляют основной фонд пашни на Зейско-Буреинской равнине. Они обладают сравнительно высоким потенциальным плодородием и могут обеспечить получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур при соответствующем уровне агротехники.

Пахотный слой почвы опытного участка имел слабокислую реакцию, среднюю величину потенциальной гидролитической кислотности и повышенную сумму поглощенных оснований. В составе поглощенных катионов преобладал ион кальция. Степень насыщенности основаниями — высокая (>80%). Особенностью луговой черноземовидной почвы является сравнительно высокое потенциальное плодородие с низким содержанием минерального азота (25–42 мг/кг почвы) и подвижного фосфора (28–32 мг/кг), при этом содержание подвижного калия очень высокое (170–240 мг/кг почвы).

Таблица 1. Схема длительного стационарного опыта

Внесено удобрений, кг д.в.		Однолетние травы, соя + овес	Соя	Пшеница	Соя	Пшеница
ежегодно на 1 га севооборотной площади	в сумме за ротацию					
Без удобрений	Без удобрений	0	0	0	0	0
N42P48	N210P240	N90P90	P60	N60P30	P30	N60P30
N24P30 + навоз 4,8 т/га	N120P150 + навоз 24 т/га	N60P30 + навоз 12 т/га	N30P60	N30	P60 + навоз 12 т/га	0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе длительного исследования выявлены наибольшие отклонения показателей агрохимического состояния пахотного слоя луговой черноземовидной почвы при использовании в системе минеральных и органо-минеральных удобрений относительно варианта без их внесения (табл. 2).

Применение минеральной системы удобрения (N42P48) повысило на 0.50 ммоль-экв/100 г почвы величину гидролитической кислотности по сравнению с контролем и на 13% относительно исходного показателя. При этом обменная кислотность (pH_{KCl}) увеличилась соответственно на 0.3 и 0.2 ед. pH. При замене части минеральных удобрений эквивалентным количеством органических (N24P30 + навоз 4.8 т/га) ухудшения физико-химических свойств почвы не установлено. Следует отметить снижение кислотности в слое 20–40 см почвы относительно слоя 0–20 см, что отчасти можно объяснить действием физиологической кислотности аммиачной селитры (NH_4NO_3) и непромывным режимом данного типа сезонно-мерзлотных почв. Длительное совместное применение органических и минеральных удобрений увеличило содержание гумуса на 0.69% относительно его исходного показателя и на 0.40% по отношению к контролю. Анализ соотношения численности функциональных групп микроорганизмов (K_r) выявил, что при внесении органических удобрений интенсивность трансформации растительных остатков в органическое вещество почвы в среднем за вегетацию увеличилась в 1.7–3.7 раза относительно контроля, а при их последствии – в 1.2–1.6 раза [11]. В этой связи можно предположить, что при длительном внесении удобрений процесс накопления гумуса проходил интенсивнее по сравнению с контролем. При этом в год их непосредственного внесения этот процесс происходил активнее, чем в последствии.

Длительное использование минеральной и органо-минеральной систем удобрения повысило содержание подвижного фосфора относительно контроля в 2.0–2.5 раза, по сравнению с исходным содержанием (20 мг/кг почвы) – в 4.0 раза. Одновременно увеличилась степень подвижности фосфат-иона относительно контроля в 2.9–3.5 раза. В подпахотном слое 20–40 см отмечено снижение содержания фосфора и его подвижности в 2 раза относительно верхнего слоя почвы.

Проведение оценки влияния удобрений на продуктивность культур севооборота в длительном полевом опыте имеет преимущество перед краткосрочными опытами, т.к. позволяет вести мониторинг агрохимических изменений свойств почвы и оценивать продуктивность культур в севообороте, учитывая все факторы вегетации растений.

Внесение повышенной дозы азотно-фосфорных удобрений в 1-й ротации длительного севооборота (1963–1967 гг.) обеспечило максимальную урожайность сои – 1.58 т/га против 1.50 т/га в контроле. При прохождении первых 6-ти ротаций наиболее эффективно было внесение фосфорных удобрений (P60), прибавка относительно контроля составляла 0.23 т/га [12]. По истечении 8-ми ротаций, когда содержание подвижных форм фосфора в почве увеличивалось соответственно нагрузке удобрениями, достигалась стабильно высокая урожайность сои, которая зависела также от гидротермических условий вегетационного периода [13]. Эта особенность зависимости урожайности сои от содержания фосфора в почве (при дозе P60) в благоприятных гидротермических условиях ($R = 0.71$) была выявлена в период формирования генеративных органов, что обеспечивало стабильный урожай зерна на уровне 2.0 т/га [14]. В посевах пшеницы гидротермические условия в период кущения–колошения определяли изменение

Таблица 2. Влияние длительного внесения удобрений на агрохимические показатели луговой черноземовидной почвы

Внесено удобрений, кг д.в.		Глубина слоя поч- вы, см	Кислотность		P ₂ O ₅		Гумус, %
за 12 ротаций (60 лет)	ежегодно на 1 га севооборотной площади		гидролитическая, ммоль-экв/100 г	обмен- ная, ед. рН	0.2 н. HCl, мг/кг	0.03 НК- SO ₄ , мг/л	
Без удобрений	0	0–20	3.86	5.1	35	0.061	4.49
		20–40	3.63	5.2	21	0.030	3.83
N2520 P2880	N42P48	0–20	4.39	4.9	88	0.216	4.36
		20–40	3.52	5.0	41	0.091	3.01
N1440 P1800 + навоз 288 т/га	N24P30 + навоз 4.8 т/га	0–20	3.79	5.1	71	0.177	4.89
		20–40	3.06	5.2	39	0.071	3.31
HCP ₀₅ слой 0–20 см			0.39	0,1	26	0.06	0.39
F _{факт} (F _{теор} = 2.59)			5.61	3.7	9.33	17.6	2.87

урожайности пшеницы на 75% ($R = 0.87$). Подобные результаты исследования получены и в 12-й ротации севооборота. Например, агротехнические условия возделывания сои в севообороте при длительном внесении удобрений реализовывались с более высоким результатом при благоприятном гидротермическом режиме южной зоны Амурской обл., что обеспечило в среднем за годы исследования урожайность сои сорта Сентябринка 2.62 т/га при внесении Р60 (табл. 3).

Применение азотных удобрений (N30) при последствии применения органо-минеральной системы удобрения увеличивало урожайность пшеницы сорта Арюна в 3-м поле севооборота на 0.58 т/га относительно контроля. Следует отметить существенное увеличение (на 0.30 т/га) урожайности пшеницы (5-й культуры севооборота) при длительном последствии органо-минеральной системы удобрения. Корреляционно-регрессионным анализом агрохимических показателей 3-х закладок во времени за 11 ротаций севооборота выявлена тесная их связь с урожайностью сои и пшеницы (табл. 4).

В отсутствии удобрений связь урожайности сои с содержанием фосфора в почве была слабой прямой ($\beta = 0.12$), пшеницы — сильной прямой ($\beta = 0.50$). Выявлена сильная обратная связь урожайности сои с величиной обменной кислотности ($\beta = -0.70$) и слабая связь урожайности пшеницы с содержанием минерального азота ($\beta = 0.15$). Длительное внесение удобрений делало слабее тесноту связи урожайности от исследованных показателей для сои до 30–38%, для пшеницы — до 28–33% (R^2).

Эффективность длительного использования минеральной и органо-минеральной систем удобрения представлена динамикой продуктивности севооборота в 4-х ротациях (рис. 1).

Длительное внесение удобрений и чередование культур в севообороте оказали положительное влияние как на агрохимические свойства луговой черноземовидной почвы, так и на продуктивность севооборота. Наибольшей она была в 12-й ротации с использованием минеральной (N42P48) и органо-минеральной (N24P30 + навоз 4.8 т/га) систем

Таблица 3. Влияние длительного внесения удобрений на урожайность культур севооборота, т/га (12-я ротация, среднее за 3 года)

Соя (2-я культура), 2019, 2020, 2023 гг.		Пшеница (3-я культура), 2019–2021 гг.		Соя (4-я культура), 2020–2022 гг.		Пшеница (5-я культура), 2021–2023 гг.	
1	2	1	2	1	2	1	2
0	2.43	0	2.50	0	2.43	0	2.36
Р60	2.48	N60P30	3.10	Р30	2.62	N60P30	2.97
N30P60	2.55	N30	3.08	Р60 + навоз 12 т/га	2.54	0	2.66
НСР ₀₅	0.18		0.28		0.26		0.28
$F_{\text{факт}}$	1.49		5.73		0.98		6.67

$$F_{\text{теор}} = 2.59$$

Примечание. В графе 1 — внесено удобрений, кг д.в./га, 2 — урожайность, т/га.

Таблица 4. Зависимость урожайности сои и пшеницы от агрохимических показателей луговой черноземовидной почвы при разных системах удобрения

Среднегодовая нагрузка удобрениями на 1 га севооборотной площади	Уравнение множественной регрессии	n	R	β -коэффициент		
				$N_{\text{мин}}$	P_2O_5	pH_{KCl}
Соя						
0 (контроль)	$Y = 138.25 + 0.07x_1 - 3.64x_2$	22	0.76	—	0.12	−0.71
N42P48	$Y = 57.98 + 0.04x_1 - 8.11x_2$	22	0.62	—	0.34	−0.30
N24P30 + навоз 4.8 т/га	$Y = 70.07 + 0.06x_1 - 10.41x_2$	22	0.61	—	0.37	−0.31
Y — урожайность (т/га), x_1 — P_2O_5 (мг/кг), x_2 — pH_{KCl} (ед.)						
Пшеница						
0 (контроль)	$Y = 6.05 + 0.19x_1 + 0.38x_2$	22	0.59	0.15	0.52	—
N42P48	$Y = 14.64 + 0.219x_1 + 0.09x_2$	22	0.57	0.35	0.38	—
N24P30 + навоз 4.8 т/га	$Y = 14.53 + 0.19x_1 + 0.09x_2$	22	0.53	0.27	0.42	—
Y — урожайность (т/га), x_1 — $N_{\text{мин}}$ (мг/кг, в фазе кущения), x_2 — P_2O_5 (мг/кг)						

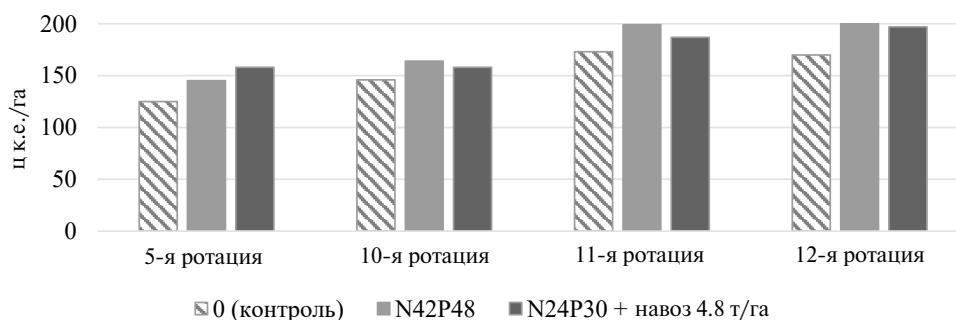


Рис. 1. Влияние длительного внесения удобрений на продуктивность зерно-соевого полевого севооборота, к.е. ц/га

удобрения, с превышением относительно 5-й ротации на 27.5 и 19.8% соответственно. Возделывание культур в севообороте без внесения удобрений обеспечило рост его продуктивности к 12-й ротации на 26.5%. Корреляционно-регрессионным анализом связи агрохимических показателей луговой черноземовидной почвы с продуктивностью севооборота установлено, что на 73% она определялась изменениями почвенной кислотности, содержания гумуса и подвижного P_2O_5 в слое 0–20 см почвы (табл. 2). При этом связь продуктивности с содержанием гумуса была слабой ($\beta = 0.26$), гидролитической кислотностью – средней обратной ($\beta = -0.57$), обменной кислотностью – сильной обратной ($\beta = -0.81$) и содержанием фосфора – сильной ($\beta = 0.84$). Величины p -уровней и коэффициентов Стьюдента свидетельствовали о том, что гидролитическая и обменная кислотности, содержание подвижного фосфора были статистически значимыми переменными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение минеральной системы удобрения в течение 60-ти лет с ежегодной нагрузкой N42P48/га севооборотной площади существенно повысило величину гидролитической и обменной кислотности по сравнению с контролем. При замене части минеральных удобрений эквивалентным количеством органических (N24P30 + навоз 4.8 т/га) их внесение не привело к ухудшению физико-химических свойств почвы. Длительное использование минеральной и органо-минеральной систем удобрения увеличило содержание в почве подвижного фосфора в 2.0–2.5 раза, подвижность фосфат-иона – в 2.9–3.5 раза относительно контроля. Особенно важным было увеличение содержания гумуса на 0.69% относительно его исходного показателя и на 0.40% по сравнению с контролем при длительном совместном применении органических и минеральных удобрений. Улучшение агрохимических свойств луговой черноземовидной почвы при длительном систематическом внесении удобрений в течение 12-ти ротаций 5-польного

севооборота, особенно в благоприятных гидротермических условиях, обеспечило в среднем за годы исследования урожайность сои сорта Сентябрька на уровне 2.42–2.62 т/га. Последствие применения органо-минеральной системы удобрения в 5-м поле севооборота повысило урожайность пшеницы на 0.30 т/га, в 3-м поле при внесении N30 – на 0.58 т/га относительно контроля. Урожайность сои, возделываемой без удобрений, была тесно связана с показателями обменной кислотности и содержания подвижного фосфора в почве, пшеницы – с содержанием подвижного фосфора и минерального азота. Продуктивность севооборота к 12-й ротации возрастала как при использовании удобрений, так и за счет чередования культур в севообороте без применения удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селезнева Н.А., Тишкова А.Г., Федорова Т.Н., Савченко Н.Е., Асеева Т.А. Изменение химических и микробиологических свойств почвы при антропогенном воздействии в полевом севообороте // Достиж. науки и техн. АПК. 2020. Т. 34. № 6. С. 5–10.
2. Скороходов В.Ю. Биологический фактор воспроизводства гумуса и поддержания плодородия почвы в условиях степной зоны Южного Урала // Плодородие. 2021. № 2(119). С. 55–59.
3. Храпач В.В., Кожевников В.И., Годунова Е.И. Влияние различных формаций на агрохимические свойства агрочерноземов Центрального Предкавказья // Достиж. науки и техн. АПК. 2022. Т. 36. № 5. С. 11–15.
4. Шулико Н.Н., Хамова О.Ф., Тимохин А.Ю., Тукмачева Е.В. Изменение биологических и агрохимических свойств орошаемой лугово-черноземной почвы при длительном применении удобрений // Плодородие. 2022. № 4(127). С. 71–78.
5. Жарикова Е.А., Бурдуковский М.Л., Голодная О.М. Агрохимические параметры плодородия пахотных луговых дифференцированных почв Приморского края в условиях длительного сельскохозяйственного использования // Агрохимия. 2023. № 2. С. 3–9.

6. Васбиева М.Т. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений // Почвоведение. 2021. № 1. С. 90–99.
7. Кожокина А.Н., Мязин Н.Г., Сальгадо Пачеко Т., Гасанова Е.С., Брехов П.Т., Стекольников Н.В. Влияние многолетнего внесения удобрений на продуктивность звена севооборота и агрохимические свойства чернозема выщелоченного // Земледелие. 2022. № 6. С. 11–15.
8. Лазарев В.И., Ильин Б.С., Лазарева Р.И., Золотарева И.А. Отзывчивость сельскохозяйственных культур на отдельные виды минеральных удобрений и их сочетания в длительном стационарном опыте // Агрохимия. 2017. № 2. С. 28–33.
9. Seidel S.J., Gaiser T., Kautz T., Bauke S.L. Estimation of the impact of pre-crops and climate variability on soil depth-differentiated spring wheat growth and water, nitrogen and phosphorus uptake // Soil Till. Res. 2019. V. 195. P. 404–427.
10. Русакова М.В., Житов В.В., Замашников Р.В., Романчук Е.И. Зависимость урожая яровой пшеницы от комплексного сочетания условий влаго- и теплообеспеченности в условиях лесостепи Приангарья // Вестн. Бурят. ГСХА им. В.Р. Филиппова. 2015. № 1(38). С. 31–35.
11. Синеговская В.Т., Банецкая Е.В. Микробоценозный состав луговой черноземовидной почвы в посевах сои и пшеницы при длительном внесении удобрений // Плодородие. 2022. № 1. С. 46–49.
12. Степкина Р.Н. Эффективность систематического применения удобрений в севообороте на луговых черноземовидных почвах Приамурья. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2001. 274 с.
13. Наумченко Е.Т., Ковшик И.Г., Кондратова А.В. Результаты длительного применения системы удобрения под сою в стационарном соево-зерновом севообороте // Итоги исследований по сое за годы реформирования и направления НИР на 2005–2010 гг.: сб. ст. коорд. совещ. ВНИИМК. Краснодар, 2004. С. 164–169.
14. Наумченко Е.Т., Малашонок А.А. Агроэкологические условия формирования урожайности сои в севообороте // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2016. № 6. С. 27–29.

Changes in Agrochemical Properties of Meadow Chernozem-Like Soil under Prolonged Exposure to Agrogenic Factors in Grain-Soybean Crop Rotation

V. T. Sinegovskaya^{a, #}, E. T. Naumchenko^a, E. V. Banetskaya^a

^a Federal Scientific Center All-Russian Scientific Research Institute of Soybean, Ignatievskoe highway 19, Amur region, Blagoveshchensk 675005, Russia,

[#]E-mail: valsino9@gmail.com

In a long-term stationary experiment to study the fertilizer system in crop rotation, established in 1962–1964 on meadow chernozem-like soil in the southern natural and climatic zone of the Amur region, the influence of prolonged use of mineral and organo-mineral fertilizer systems on the agrochemical properties of meadow chernozem-like soil in relation to the level of crop yield in crop rotation was studied. The use of mineral fertilizers alone and together with organic ones provided an increase in the content of mobile phosphorus in the soil by 2.0–2.5 times, its mobility by 2.9–3.5 times relative to control. The long-term use of the organo-mineral fertilizer system led to an increase in the humus content by 0.69% and the preservation of acidity indicators at the initial level, while the application of only mineral fertilizers increased the hydrolytic and metabolic acidity. Wheat yield when applying N30 against the background of prolonged application of fertilizers to the 12th rotation of the crop rotation increased by 0.58 t/ha relative to the control, with its aftereffect – by 0.30 t/ha. At the same time, the yield of soybeans was 2.42–2.62 t/ha. It was found that the productivity of crop rotation was determined by 73% by changes in humus content, soil acid content and mobile P₂O₅ content in the 0–20 cm soil layer. The relationship of crop rotation productivity with humus content was weak ($\beta = 0.26$), hydrolytic acidity – medium reverse ($\beta = -0.57$), metabolic acidity – strong reverse ($\beta = -0.81$) and phosphorus content – strong ($\beta = 0.84$). The values of p-levels and Student coefficients indicated the fact that hydrolytic and metabolic acidity, the content of mobile phosphorus were statistically significant variables.

Keywords: fertilizers, agrochemical properties of soil, mobile phosphorus, long-term stationary experiment, meadow chernozem-like soil, crop rotation, yield, soybeans, wheat.

УДК 631.445.24:631.85:631.821.1

УСИЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ С УЧЕТОМ ИЗВЕСТКОВАНИЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2024 г. С. П. Бижан

*Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова**127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия**E-mail: k2uek@yandex.ru*

В многолетнем полевом опыте на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве выявлена существенная отдача от применения цинковых, медных, магниевых удобрений, микробного препарата Бисолбифит совместно с фосфорными удобрениями в связи с известкованием в посевах озимой пшеницы. Отмечено благоприятное воздействие изученных приемов на качество зерна, окупаемость удобрений, потребление и коэффициент использования фосфора растениями. На сильноокислой неизвесткованной почве с высоким содержанием мобильного алюминия (около 130 мг/кг), вызванного систематическим внесением физиологически кислых калия хлористого и селитры аммиачной, фосфорные удобрения (в среднем за все годы исследования с 2017 по 2023 гг.) обеспечивали прирост урожайности озимой пшеницы на 69% на произвесткованной дозой 11.5 т известки/га среднекислой почве в 2.2 раза, на слабокислой (19.0 т известки/га) – в 2.7 раза, совместно с применением микроэлементов и Бисолбифита – в 2.4 и 2.9 раза от среднего уровня фона азотно-калийных удобрений (2.38 т/га). При этом увеличилась окупаемость фосфорных удобрений зерном озимой пшеницы на слабокислой почве от внесения микроудобрений и бисолбифита в 2.7 раза (до 15.7 кг/кг), содержание белка в зерне – на 1.3%, вынос фосфора – в 3.8 раза (до 70.7 кг/га), использование растениями озимой пшеницы фосфора – в 2.7 раза.

Ключевые слова: озимая пшеница, известкование, фосфорные удобрения, дерново-подзолистая почва, урожайность, окупаемость зерном.

DOI: 10.31857/S0002188124120036, **EDN:** VWJOWO

ВВЕДЕНИЕ

В связи с дефицитным балансом фосфора на слабокультуренных дерново-подзолистых почвах, площадь которых значительна, возникает неотложная потребность с большей результативностью использовать остаточные и внесенные с удобрениями фосфаты, что особенно актуально при применении интенсивных технологий. Периодическое известкование кислых дерново-подзолистых почв, проводимое с целью достижения наиболее приемлемых для растений характеристик почвенной кислотности и других агрохимических показателей, способствует более полному усвоению растениями фосфора [1–3]. Для уравновешенного соотношения почвенных элементов питания в условиях формирования высокой продуктивности растений важнейшее значение приобретают микроэлементы и магниевые удобрения [4–8]. Необходимость использования магниевых, цинковых и медных удобрений обусловлена в первую очередь возрастанием площадей пахотных угодий с дефицитным содержанием мобильных форм

магния, цинка и меди из-за усиливающегося их вымывания при пролонгированном внесении закисляющих форм минеральных удобрений, в отсутствие известкования [7, 9, 10]. Применение биопрепарата для модификации минеральных удобрений такого как Бисолбифит, с нанесением его на гранулы также используют как один из действенных факторов в исследованиях, посвященных повышению отдачи от применения минеральных удобрений, что обладает рядом технологических достоинств [11–13].

Между тем отмеченные агроприемы повышения результативности применения фосфорных удобрений вместе с известкованием исследованы в недостаточной степени, тем более в условиях длительного полевого опыта на дерново-подзолистых суглинистых почвах при возделывании озимой пшеницы сортов интенсивного типа. Цель работы – исследование средств, усиливающих эффект от применения фосфорных удобрений, при выращивании озимой пшеницы интенсивных сортов в длительном полевом опыте на слабокультуренной дерново-подзолистой почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования — длительный полевой опыт СШ-27, основанный в 1966 г. на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Центральной опытной станции ВНИИА (Московская обл., Шебанцевский участок).

Первичные характеристики почвы (слабая окультуренность): содержание гумуса — 1.5%, pH_{KCl} 3.9–4.2 ед., степень насыщенности основаниями — 57–63%, сумма поглощенных оснований 7.5–8.2 ммоль-экв/100 г почвы (по Каппену), гидролитическая кислотность — 4.9–5.2 ммоль-экв/100 г почвы (по Каппену–Гильковицу), содержание подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) в почве — 30–70 и 112–115 мг/кг соответственно, подвижного алюминия (по Соколову) — 45–60 мг/кг.

Чередование культур в полевом севообороте: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта Московская 56—яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта НУР с подсевом клевера (*Trifolium pratense* L.)—клевер 2-х лет пользования (в последние годы (11- и 12-я ротации) — один год пользования).

Удобрения применяли перед посевом озимой пшеницы под культивацию в виде N_{aa} , P_{cd} (в 12-й ротации — в форме АФ), K_x , магниевых — в форме сернокислого магния, цинковых — в форме сернокислого цинка, медных — в форме сернокислой меди (в дозах по 30.0 кг д.в./га), Бисолбифит — нанесением на гранулы аммофоса (в дозе 5 кг/га).

При перемежающемся известковании дозами 11.5 и 23 т извести/га (за весь период) почва в 12-й ротации была среднекислой (pH_{KCl} 4.7 ед.) и слабокислой

(pH_{KCl} 5.4 ед.). Регулярное применение фосфорных и калийных удобрений повысило к данному этапу содержание мобильных форм фосфора и калия в почве до 140–157 и 152–170 мг/кг соответственно.

Анализы растений проводили согласно ГОСТам. Содержание общего азота определяли по Кьельдалю (ГОСТ 13996.4-93), фосфора — по ГОСТ 26657-97, калия — по ГОСТ 30504-97, сумму поглощенных оснований (по Каппену) — по ГОСТ Р 50682-94, обменную кислотность — по ГОСТ Р 58594-2019, величину pH_{KCl} — по ГОСТ 26423-85, гидролитическую кислотность — по Каппену в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), мобильный алюминий (по Соколову) — по ГОСТ 26485-86.

Агротехника выращивания пшеницы — традиционная для Московской обл. Общим фоном вносили гербициды, фунгициды, ретарданты. Более подробно данная методика представлена в работе [14].

Данные статистически обрабатывали дисперсионным методом в программе Stat VIVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Азотно-калийные удобрения, внесенные в формах N_{aa} и K_x (фон НК) в сильнокислую почву (pH_{KCl} 4.1 ед.), не способствовали повышению урожайности озимой пшеницы, которая оставалась сходной с контролем (без удобрений) из-за негативной динамики содержания (с 44.0 до 130 мг/кг почвы) токсичного для растений мобильного алюминия (табл. 1–4) [8, 9].

Таблица 1. Урожайность и окупаемость зерном озимой пшеницы (среднее за 2020–2022 гг.) в зависимости от кислотности почвы и примененных фосфорных и медных удобрений

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га		Окупаемость NPK прибавкой зерна, кг/кг
		от P ₂ O ₅	от Cu	
Без известкования (pH _{KCl} 4.1)				
Без удобрений	2.22	—	—	—
N120K90	2.20	—	—	—
N120P90K90	3.89	1.69	—	5.7
N120P90K90 + Cu	4.14	—	0.25	6.4
Известкование 11.5 т извести/га (pH _{KCl} 4.7)				
N120K90	3.81	—	—	—
N120P90K90	5.20	1.39	—	9.9
N120P90K90 + Cu	5.71	—	0.51	11.6
Известкование 19.0 т извести/га (pH _{KCl} 5.4)				
N120K90	5.15	—	—	—
N120P90K90	6.32	1.17	—	13.7
N120P90K90 + Cu	6.82	—	0.50	15.3
НСП ₀₅	0.28	—	—	—

Таблица 2. Урожайность озимой пшеницы (среднее за 2017–2019 гг.) в зависимости от кислотности почвы и примененных фосфорных и цинковых удобрений

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га		Окупаемость NPK прибавкой зерна, кг/кг
		от P ₂ O ₅	от Zn	
Без известкования (pH _{KCl} 4.1)				
Без удобрений	2.18	—	—	—
N120K90	2.40	—	—	—
N120P90K90	3.89	1.49	—	5.7
N120P90K90 + Zn	4.20	—	0.31	6.7
Известкование 11.5 т извести/га (pH _{KCl} 4.7)				
N120K90	3.38	—	—	—
N120P90K90	4.86	1.48	—	8.9
N120P90K90 + Zn	5.38	—	0.52	10.7
Известкование 19.0 т извести/га (pH _{KCl} 5.4)				
N120K90	4.97	—	—	—
N120P90K90	6.31	1.34	—	13.8
N120P90K90 + Zn	6.92	—	0.61	15.8
HCP ₀₅	3.1	—	—	—

Таблица 3. Урожайность озимой пшеницы (среднее за 2021–2023 гг.) в зависимости от кислотности почвы и примененных фосфорных и магниевых удобрений

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га		Окупаемость NPK прибавкой зерна, кг/кг
		от P ₂ O ₅	от Mg	
Без известкования (pH _{KCl} 4.1)				
Без удобрений	2.52	—	—	—
N120K90	2.75	—	—	—
N120P90K90	4.53	1.78	—	6.7
N120P90K90 + Mg	4.86	—	0.33	7.8
Известкование 11.5 т извести/га (pH _{KCl} 4.7)				
N120K90	4.60	—	—	—
N120P90K90	6.11	1.51	—	12.0
N120P90K90 + Mg	6.60	—	0.49	13.6
Известкование 19.0 т извести/га (pH _{KCl} 5.4)				
N120K90	5.81	—	—	—
N120P90K90	6.92	1.11	—	14.7
N120P90K90 + Mg	7.53	—	0.61	16.7
НСП ₀₅	0.31	—	—	—

Фосфорные удобрения в форме АФ, внесенные в дозе 90 кг P₂O₅/га, обеспечивали прирост урожайности на всех исследованных фонах применения извести. На сильнокислой неизвесткованной почве (pH_{KCl} 4.1) средняя за 3 года урожайность увеличивалась в 2020–2022 гг. на 76.8, в 2017–2019 гг. – на 62.1, в 2021–2023 гг. – на 64.7, в 2019,

2021, 2022 гг. – на 71.9%. Прибавки от микроудобрений в этом случае были невысокими: от медных – на 6.4, от цинковых – на 8, от магниевых – на 7.3%, что было вызвано в числе прочего антагонизмом ионов меди, цинка и магния по отношению к ионам мобильного алюминия в почве, ограничивающим поступление микроэлементов в растения при

Таблица 4. Урожайность озимой пшеницы (среднее за 2019, 2021, 2022 г.) в зависимости от кислотности почвы, примененных фосфорных удобрений и Бисолбифита

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га		Окупаемость NPK прибавкой зерна, кг/кг
		от P ₂ O ₅	от Бисолбифита	
Без известкования (рН _{KCl} 4.1)				
Без удобрений	2.29	—	—	—
N90K90	2.17	—	—	—
N90P90K90	3.73	1.56	—	5.3
N90P90K90 + Бф	3.98		0.25	6.3
Известкование 11.5 т извести/га (рН _{KCl} 4.7)				
N90K90	3.56	—	—	—
N90P90K90	4.77	1.21	—	9.2
N90P90K90 + Бф	5.21		0.44	10.8
Известкование 19.0 т извести/га (рН _{KCl} 5.4)				
N90K90	4.85	—	—	—
N90P90K90	5.90	1.05	—	13.4
N90P90K90 + Бф	6.38	—	0.48	15.1
НСП ₀₅	2.9	—	—	—

Примечание. Бф — бактериальный препарат Бисолбифит. То же в табл. 5—8.

избыточном насыщении (до 130 мг/кг) почвенного раствора ионами Al^{3+} [4]. Сравнительно небольшая прибавка от Бисолбифита (6.7%) на сильноокислой почве определялась намеренно сниженной дозой азота (до 90 кг д.в./га), с целью более точного выявления действия бактериального модификатора минеральных удобрений, а также токсическим действием на растения озимой пшеницы подвижного алюминия в почве.

Эффективность фосфорных удобрений на слабоокислой почве (pH_{KCl} 5.4) снижалась, прирост урожайности был равен в 2020—2022 гг. 22.7, в 2017—2019 гг. — 27.0, в 2021—2023 гг. — 19.1, в 2019, 2021, 2022 гг. — 26.1%. Уменьшение отдачи от применения фосфорных удобрений на слабоокислой почве было вызвано активизацией фосфорного питания растений благодаря известкованию, которое содействовало увеличению урожайности (в среднем за годы исследования) в 2.7 раза по сравнению с фоном НК на сильноокислой почве.

Когда количество мобильного алюминия в результате известкования (19.0 т извести/га) в разы уменьшилось, а почва стала слабоокислой, от использования медных удобрений получена наибольшая урожайность 6.82 т/га, превышающая фон НК сильноокислой почвы в 3.1 раза, от цинковых — 6.92 т/га с превышением в 2.9 раза, от магниевых — 7.53 т/га и в 2.7 раза, от Бисолбифита — 6.38 т/га и в 2.9 раза соответственно.

Окупаемость минеральных удобрений зерном на слабоокислой почве возрастала от применения меди

в 2.7 раза и достигала 15.3 кг/кг, цинка — в 2.8 раза и 15.8 кг/кг, магния — в 2.5 раза и 16.7 кг/кг, бисолбифита — в 2.8 раза и 15.1 кг/кг относительно почвы сильноокислой.

В среднем за все годы опыта (2017—2023) фосфорные удобрения повышали вынос фосфора в 2.5 раза из среднеокислой почвы и в 3.5 раза — из слабоокислой по сравнению с фоном НК. Вынос его при внесении микроэлементов и Бисолбифита в этих условиях был еще больше: из среднеокислой почвы — в 3.1 раза, из слабоокислой — в 3.8 раза, чем на фоне НК из сильноокислой почвы (табл. 5).

В среднем за все годы исследования коэффициент использования фосфора в почве со слабоокислой реакцией среды с применением микроэлементов и Бисолбифита в 2.7 раза превышал таковой в сильноокислой почве (табл. 6).

Результаты выноса фосфора 1 т урожая в полной мере можно применить для уточнения справочных нормативов, основываясь на показателях урожайности растений озимой пшеницы, применяемых удобрений и препаратов с учетом кислотности дерново-подзолистой почвы Центрального Нечерноземья (табл. 7).

Совместное с фосфорными удобрениями внесение микроэлементов и Бисолбифита вызывало самый существенный прирост содержания белка в зерне озимой пшеницы, достигавший в среднем за годы опыта 13.3%, превосходя показатель на фоне НК сильноокислой почвы на 1.3% (табл. 8).

Таблица 5. Вынос фосфора растениями озимой пшеницы в зависимости от кислотности почвы, примененных удобрений и препаратов (среднее за 3 года), кг/га

Вариант	Удобрения и препараты			
	Cu	Zn	Mg	Бф
Без известкования (pH _{KCl} 4.1)				
Без удобрений	17.6	17.3	20.9	17.0
N120(90) K90	16.8	18.8	21.0	17.8
N120(90) P90K90	31.9	33.6	39.4	32.4
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	36.6	38.9	43.9	34.6
Известкование 11.5 т извести/га (pH _{KCl} 4.7)				
Без удобрений	33.9	30.9	41.5	33.1
N120(90) K90	49.7	47.5	58.9	45.3
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	57.0	52.6	66.1	50.7
Известкование 19.0 т извести/га (pH _{KCl} 5.4)				
Без удобрений	50.0	49.1	56.5	43.2
N120(90) K90	64.6	65.8	70.3	56.7
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	70.0	69.0	77.1	66.5

Примечание. В скобках (90) – доза азота для вариантов с применением Бисолбифита. То же в табл. 6–8.

Таблица 6. Использование фосфора растениями озимой пшеницы в зависимости от кислотности почвы, примененных удобрений и препаратов (среднее за 3 года), %

Вариант	Удобрения и препараты			
	Cu	Zn	Mg	Бф
Без известкования (pH _{KCl} 4.1)				
Без удобрений	—	—	—	—
N120(90) K90	—	—	—	—
N120(90) P90K90	16.8	16.4	20.4	16.2
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	22.0	22.3	25.4	18.7
Известкование 11.5 т извести/га (pH _{KCl} 4.7)				
N120(90) K90	—	—	—	—
N120(90) P90K90	36.6	31.9	42.1	30.6
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	44.7	37.6	50.1	36.6
Известкование 19.0 т извести/га (pH _{KCl} 5.4)				
N120(90) K90	—	—	—	—
N120(90) P90K90	53.1	52.2	54.8	43.2
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	59.1	55.8	62.3	54.1

Таблица 7. Вынос фосфора растениями озимой пшеницы (зерно + солома) 1 т урожая в зависимости от кислотности дерново-подзолистой почвы, примененных удобрений и препаратов (среднее за 3 года), кг

Вариант	Удобрения и препараты			
	Cu	Zn	Mg	Бф
Без известкования (pH_{KCl} 4.1)				
Без удобрений	—	—	—	—
N120(90) K90	—	—	—	—
N120(90) P90K90	8.2	8.6	8.7	8.7
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	8.8	9.3	9.0	8.7
Известкование 11.5 т извести/га (pH_{KCl} 4.7)				
N120(90) K90	—	—	—	—
N120(90) P90K90	9.6	9.8	9.6	9.5
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	10.0	9.8	10.0	9.7
Известкование 19.0 т извести/га (pH_{KCl} 5.4)				
N120(90) K90	—	—	—	—
N120(90) P90K90	10.2	10.4	10.2	9.6
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	10.3	10.0	10.2	10.4

Таблица 8. Содержание белка в зерне озимой пшеницы в зависимости от кислотности почвы, примененных удобрений и препаратов (среднее за 3 года)

Вариант	Удобрения и препараты			
	Cu	Zn	Mg	Бф
Без известкования (pH_{KCl} 4.1)				
Без удобрений	12.0	12.0	12.2	11.8
N120(90) K90	12.3	12.4	12.8	12.2
N120(90) P90K90	12.4	12.5	12.5	12.3
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	12.4	12.6	13.1	12.4
Известкование 11.5 т извести/га (pH_{KCl} 4.7)				
N120(90) K90	12.4	12.7	12.7	12.3
N120(90) P90K90	12.7	12.9	13.0	12.6
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	12.8	13.0	13.5	12.6
Известкование 19.0 т извести/га (pH_{KCl} 5.4)				
N120(90) K90	12.9	13.1	13.5	12.7
N120(90) P90K90	13.1	13.4	13.2	12.9
N120(90) P90K90 + примененное удобрение или препарат	13.3	13.6	13.4	13.0
HCP_{05}	0.7	0.8	0.6	0.7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в длительном полевом опыте на дерново-подзолистой сильноокислой почве установлена сильная отзывчивость растений озимой пшеницы на совместное применение фосфорных,

известковых, микроэлементных удобрений и Бисол-бифита по сравнению с фоном применения только азотно-калийных удобрений. На сильноокислой неизвесткованной почве с высоким содержанием мобильного алюминия (≈ 130 мг/кг) при систематическом

внесении физиологически кислых калия хлористого и селитры аммиачной фосфорные удобрения (в среднем за все годы исследования с 2017 по 2023 гг.) обеспечивали прирост урожайности озимой пшеницы на 69%, на произвесткованной 11.5 т извести/га среднекислой почве — в 2.2 раза, на слабокислой (19.0 т извести/га) — в 2.7 раза, совместно с применением микроэлементов и Бисолбифита — в 2.4 и 2.9 раза больше, чем средняя урожайность на фоне азотно-калийных удобрений (2.38 т/га). Увеличивались окупаемость фосфорных удобрений зерном озимой пшеницы на слабокислой почве при внесении микроудобрений и Бисолбифита в 2.7 раза (до 15.7 кг/кг), содержание белка в зерне — на 1.3%, вынос фосфора — в 3.8 раза (до 70.7 кг/га), использование растениями озимой пшеницы фосфора — в 2.7 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аристархов А.Н.* Оптимизация полиэлементного состава в агросистемах России — агрохимическая оценка состояния дефицита, резервов, способов и средств его устранения / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2019. С. 200—255.
2. *Небольсин А.Н., Небольсина З.П.* Теоретические основы известкования почв. СПб.: ЛНИИСХ, 2005. С. 90—118.
3. *Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С.* Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
4. *Кук Д.У.* Факторы, лимитирующие урожай, и их взаимодействие в системах земледелия // Вестн. сел.-хоз. науки. 1987. № 2. С. 124—130.
5. *Кулаковская Т.Н.* Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М., 1990. 218 с.
6. *Shiwakoti S., Zheljazkov V.D., Gollany H.T., Kleber M., Xing B.* Macronutrients in soil and wheat as affected by a long-term tillage and nitrogen fertilization in winter wheat—fallow rotation // *Agronomy*. 2019. V. 9. P. 178.
7. *Гомонова Н.Ф.* Влияние 30-летнего применения минеральных удобрений на урожай сельскохозяйственных культур и агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы // *Химия в сел. хоз-ве*. 1984. № 1. С. 8—11.
8. *Kamprath E.J.* Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1970. V. 34. № 2. P. 252—254.
9. *Болдышева Е.П., Попова В.И.* Методологические аспекты исследования оптимизации применения микроудобрений под зерновые культуры // *Электр. научн.-метод. журн. ОмскГАУ*. 2017. № 3(10). С. 2.
10. *Аристархов А.Н., Бушуев Н.Н., Сафонова К.Г.* Приоритеты применения различных видов, способов и доз микроудобрений под озимые и яровые сорта пшеницы в основных природно-сельскохозяйственных зонах России // *Агрохимия*. 2012. № 9. С. 26—40.
11. *Shahzad Z., Amtmann A.* Food for thought: how nutrients regulate root system architecture // *Curr. Opin. Plant Biol.* 2017. V. 39. P. 80—87. DOI: 10.1016/j.pbi.2017.06.008
12. *Бахитова А.Р., Кидин В.В.* Содержание микроэлементов в зерне ячменя при внесении микроудобрений в разные слои дерново-подзолистой почвы // *Плодородие*. 2016. № 6(93). С. 27—29.
13. *Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Гуторова О.А., Петрик Я.Б.* Медные удобрения в рисовом агроценозе // *Плодородие*. 2021. № 3(120). С. 62—65.
14. *Бижан С.П.* Влияние совместного применения фосфорных и магниевых удобрений на фоне азотно-калийных на урожайность, качество и вынос элементов питания яровым ячменем в зависимости от кислотности дерново-подзолистой почвы // *Агрохимия*. 2023. № 6. С. 39—46.

Enhancing the Effect of Phosphorus Fertilizers, Taking into Account Liming, Taking into Account Liming in Winter Wheat Cultivation on Sod-Podzolic Soil

S. P. Bizhan

*D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia,
E-mail: kzuek@yandex.ru*

In long-term field experience on sod-podzolic heavy loamy soil, a significant return was revealed from the use of zinc, copper, magnesium fertilizers, the microbial preparation Bisolbifit together with phosphorus fertilizers in connection with liming in winter wheat crops. The beneficial effect of the studied techniques on grain quality, payback of fertilizers, consumption and utilization rate of phosphorus by plants was noted. On highly acidic, untreated soil with a high content of mobile aluminum (about 130 mg/kg), caused by the systematic introduction of physiologically acidic potassium chloride and ammonium nitrate, phosphorus fertilizers (on average for all the years of the study from 2017 to 2023) provided an increase in winter wheat yield by 69% at a dose of 11.5 tons of lime/ha of medium acid in the soil by 2.2 times, on slightly acidic (19.0 tons of lime/ha) – by 2.7 times, together with the use of trace elements and Bisolbifit – by 2.4 and 2.9 times from the average background level of nitrogen-potassium fertilizers (2.38 t/ha). At the same time, the payback of phosphorus fertilizers with winter wheat grain on slightly acidic soil from the introduction of micro fertilizers and Bisolbifit increased 2.7 times (up to 15.7 kg/kg), the protein content in the grain increased by 1.3%, phosphorus removal by 3.8 times (up to 70.7 kg/ha), the use of phosphorus by winter wheat plants by 2.7 times.

Keywords: winter wheat, liming, phosphorous fertilizers, sod-podzolic soil, yield, grain payback.

УДК 631.46:633.494:632.05.028

ВЛИЯНИЕ СТИМУЛИРУЮЩЕЙ РОСТ БАКТЕРИИ *Pseudomonas protegens* DA1.2 И ЕЕ МЕТАБОЛИТОВ НА ПОВРЕЖДЕНИЕ РАПСА ПОЧВЕННЫМИ ОСТАТКАМИ МЕТСУЛЬФУРОН-МЕТИЛА¹

© 2024 г. М. Д. Бакаева^{1,*}, А. А. Кенджиева¹, С. Н. Стариков¹, С. П. Четвериков¹,
Д. В. Четверикова¹

¹Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

*E-mail: chelab007@yandex.ru

Исследовали биохимические процессы, опосредующие положительное влияние бактерий на растения, испытывающие гербицидный стресс. Для этого оценили действие штамма бактерий *Pseudomonas protegens* DA1.2, низкомолекулярной (<5 кДа) и высокомолекулярной (>5 кДа) фракций его культуральной жидкости (КЖ) на активность ацетолактатсинтазы (АЛС) и антиоксидантный статус рапса (*Brassica napus* L.) сорта Купол, выращенного при искусственном освещении в загрязненной метсульфурон-метилом почве. Штамм *P. protegens* DA1.2 и его метаболиты способствовали увеличению массы побегов рапса на 21–68%, уменьшали ингибирование фермента АЛС на 11–24% и смягчали проявления окислительного стресса. Защитный эффект обработок убывал в ряду: КЖ с живыми клетками бактерий–низкомолекулярная фракция КЖ–высокомолекулярная фракция КЖ. Рост активности супероксиддисмутазы на 51–94% и глутатионредуктазы на 17–20% в обработанных бактериями или их метаболитами растениях указывал на возможное участие этих антиоксидантных ферментов в уменьшении фитотоксичности почвенных остатков метсульфурон-метила для растений рапса.

Ключевые слова: метсульфурон-метил, бактерии, рапс, стимулятор роста, ацетолактатсинтаза, окислительный стресс.

DOI: 10.31857/S0002188124120041, **EDN:** VWIRWA

ВВЕДЕНИЕ

Метсульфурон-метил является одним из наиболее широко используемых гербицидов на полях по всему миру из-за его низкой стоимости и действия на широкий спектр сорных растений. Однако метсульфурон-метил может быть токсичным для чувствительных видов растений в системах севооборота при чрезвычайно низких концентрациях в почве [1–3]. Время персистенции метсульфурон-метила в почве может составлять от нескольких недель до нескольких месяцев в зависимости от pH почвы, содержания органического углерода, микробной биомассы и глинистой фракции [4, 5]. Это приводит к необходимости применения средств, которые защищали бы чувствительные культуры от остатков метсульфурон-метила.

Исследователи активно ищут новые возможности практического применения полезных для растений

микроорганизмов [6]. Это связано с растущей обеспокоенностью потребителей сельскохозяйственной продукции токсическим воздействием пестицидов, а также большим потенциалом бактерий для решения различных задач агрономии. Использование бактерий в качестве антидотов гербицидов было продемонстрировано относительно недавно [7–9]. В описанных экспериментах зафиксировано улучшение роста сельскохозяйственных растений, но мало внимания уделено биохимическим процессам, опосредующим защитное действие бактерий.

Гербицидный эффект метсульфурон-метила связан с ингибированием ферментативной активности ацетолактатсинтазы (АЛС) чувствительных растений. Также этот гербицид может влиять на накопление активных форм кислорода в обработанных растениях, хотя окислительный стресс является вторичным следствием ингибирования АЛС [10]. Цель работы – оценка влияния бактерий *P. protegens* DA1.2 и содержащей их метаболиты культуральной жидкости (КЖ) на активность АЛС и антиоксидантный

¹Исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 23-26-00097).

статус растений рапса, выращенных в загрязненной метсульфурон-метилом почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Штамм бактерий DA1.2 вида *P. protegens* был ранее выделен авторами и описан как стимулятор роста растений, эффективно действующий на фоне засухи и гербицидных обработок [11]. Бактерию выращивали в питательной среде King B в шейкере-инкубаторе ES-20/60 (Biosan, Латвия) при 160 об./мин и 28 °C в течение 72 ч. С помощью мембранного фильтра CHROMAFIL®Xtra PTFE (MACHEREY-NAGEL, Германия) с диаметром пор 0.45 мкм была получена бесклеточная культуральная жидкость, из которой ультрафильтрацией на установке "Vivaflow 50" (Sartorius, Германия) выделена фракция с молекулярным весом метаболитов <5 кДа. Высокомолекулярные фракции были доведены 0.1 М калий-фосфатным буфером (pH 7.0) до объема исходной культуральной жидкости. Для уменьшения содержания низкомолекулярных метаболитов в высокомолекулярной фракции она была 10-кратно подвергнута ультрафильтрации с замещением буфером отфильтрованного объема жидкости.

Рапс (*Brassica napus* L.) сорта Купол был выбран в качестве тест-растения, поскольку он чувствителен к метсульфурон-метилу и часто следует в севооборотах за однодольными зерновыми культурами, в посевах которых применяют этот гербицид. Для обработок был использован препарат Наномет (ООО «Пестициды РУ», Россия) с содержанием метсульфурон-метила 60%.

Вегетационный опыт был заложен в 2023 г. в Уфимском институте биологии УФИЦ РАН с использованием почвы из верхнего слоя чернозема (Chernozem Naplic согласно WRB, C_{орг} – 3.5%, N_{общ} – 0.45%, P_{Egner} – 140 мг/кг, K_{Egner} – 125 мг/кг, pH_{KCl} 6.5). Почва была обработана гербицидом из расчета 0.05 мг действующего вещества на 1 кг и помещена в вентилируемые контейнеры на 4 мес., после чего использована для выращивания рапса. Способ подготовки грунта был выбран на основании ранее проведенных исследований [12]. Семена рапса высаживали в горшки объемом 0.2 л и выращивали при искусственном освещении. Плотность потока фотонов – 190 мкмоль/м²/с, фотопериод 14 ч, температура 20–25°C, влажность почвы 60 ± 5% ПВ. Половину семян опрыскивали культурой бактерий, разведенной до титра 10⁵ КОЕ/мл. Другую половину обработали смесью питательной среды King B и воды в соотношении 1 : 10000. Контрольные растения выращивали без воздействия гербицидов или бактерий. Каждому варианту опыта соответствовали 30 горшков с растениями. В возрасте 18 сут свежесрезанные побеги (n = 30) взвешивали на аналитических весах HR-250AZG (AND, Токио, Япония).

Биохимические анализы проводили на 14–17-е сут после появления всходов в 5-кратной повторности. Для оценки активности ALS *in vivo* были использованы описания анализа, приведенные в работе [13]. Перекисное окисление липидов оценивали с помощью анализа веществ, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой, усовершенствованного в работе [14]. Для измерения активности антиоксидантных ферментов свежие листья измельчали в жидком азоте и гомогенизировали в 0.1 М калий-фосфатном буфере (pH 7.4 с 0.1 мМ ЭДТА), центрифугировали 20 мин при 5000 g, супернатант держали на льду и использовали для анализа в течение 1 ч. Активность глутатионредуктазы (ГР), супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ) и аскорбатпероксидазы (АП) измеряли согласно [15]. Активность ферментов выражали в условных единицах (у.е.) в минуту на 1 г сырой массы.

Данные были проанализированы с помощью программы Statistica (Statsoft) (версия 10). Значимость различий между средними оценивали методом ANOVA с применением критерия Дункана ($p \leq 0.05$). В таблицах и на графиках для всех величин приведена стандартная ошибка среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Остатки метсульфурон-метила значительно подавляли развитие растений рапса. Масса одного растения, подвергшегося воздействию химиката, уменьшилась по сравнению с контролем без применения гербицидов на 47.9% (табл. 1).

В нашем эксперименте бактериальный стимулятор *P. protegens* DA1.2 действовал как средство защиты рапса от фитотоксичности метсульфурон-метила. После обработки культурой с живыми клетками *P. protegens* DA1.2 на фоне метсульфурон-метила масса побегов составила 87.5% от контроля. Для низкомолекулярных и высокомолекулярных метаболитов этот показатель был равен 68.0 и 63.4% соответственно. Влияние живых бактерий на фитотоксичность гербицидов в отношении разных сельскохозяйственных культур было показано ранее в нескольких экспериментальных работах [7–9]. Сообщений о роли низкомолекулярных метаболитов бактерий в смягчении гербицидного стресса у растений нами обнаружено не было.

Фермент АЛС отвечает за создание аминокислот с разветвленными цепями и является мишенью для многих коммерческих гербицидов, включая сульфонилмочевины и имидазолины. Активность АЛС у рапса как чувствительного к метсульфурон-метилу растения была сильно подавлена гербицидом (рис. 1а).

Однако снижение активности фермента частично компенсировалось после бактеризации растений. В обработанных живыми бактериями растениях рапса активность АЛС восстановилась до 59.3% от контрольного уровня. Низкомолекулярные метаболиты

Таблица 1. Влияние метсульфурон-метила, штамма *P. protegens* DA1.2 и фракций его культуральной жидкости на массу побегов рапса, г/растение

Обработка всходов	Почва без гербицида	Почва с гербицидом
Без обработки	0.54 ± 0.03 b	0.28 ± 0.03 e
Культура с клетками <i>P. protegens</i> DA1.2	0.62 ± 0.05 a	0.47 ± 0.03 c
Фракция метаболитов весом >5 кДа	0.58 ± 0.04 ab	0.34 ± 0.03 d
Фракция метаболитов весом <5 кДа	0.57 ± 0.04 ab	0.37 ± 0.03 d

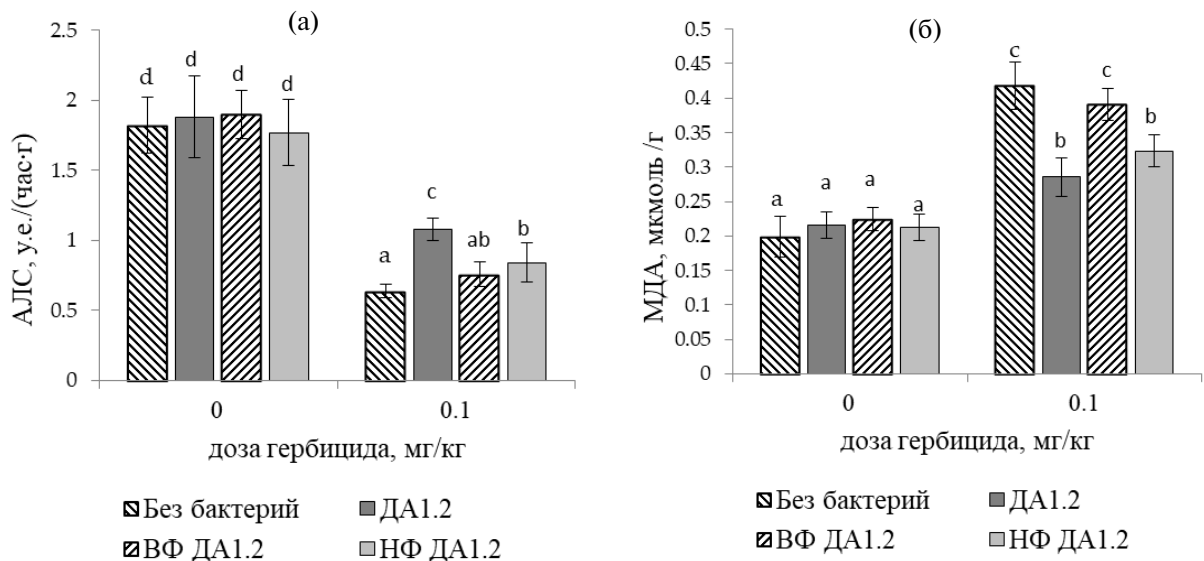


Рис. 1. Влияние метсульфурон-метила, штамма *P. protegens* DA1.2 и фракций его культуральной жидкости на активность фермента ацетолаттасинтазы (а) и содержание малонового диальдегида (б) в листьях рапса.

были менее активны, на их фоне активность фермента восстановилась лишь до 46.2%. Влияние высокомолекулярных метаболитов не было статистически значимым. Можно предположить, что бактерии разрушали метсульфурон-метил в почве. Биodeградация или биотрансформация гербицидов как микроорганизмами, так и растениями, – хорошо известный феномен [16, 17]. Ранее *in vitro* была продемонстрирована способность штамма *P. protegens* DA1.2 использовать метсульфурон-метил в качестве источника питания [18]. Положительное влияние фракции низкомолекулярных метаболитов, не содержащей ферменты, на активность АЛС, возможно, указывало на стимуляцию ими процессов детоксикации гербицида самими растениями рапса.

Когда почва была загрязнена остатками гербицида, количество малонового диальдегида (МДА) в листьях рапса увеличилось на 105%, что указывало на окислительное повреждение (рис. 1б). Использование бактерий и их метаболитов приводило к ингибированию образования МДА в листьях рапса. Благодаря инокуляции цельной культурой *P. protegens* DA1.2 количество МДА в растениях, выросших в почве, загрязненной гербицидом, снизилось на 34.4%, после обработки низкомолекулярными

метаболитами – на 20.7%. Высокомолекулярные фракции культуральной жидкости гораздо меньше влияли на этот показатель.

Пероксид водорода и супероксидный радикал играют важную роль в передаче сигналов и активации механизмов адаптации растений к неблагоприятным факторам среды [19]. Однако их чрезмерное накопление при стрессе приводит к окислительному повреждению мембран, фотосинтетических пигментов и других компонентов растительных клеток. Поэтому растительные ткани содержат многокомпонентный пул соединений, выступающих в качестве антиоксидантов. С целью оценки воздействия бактерий и их метаболитов на антиоксидантный статус растений рапса в экстракте из листьев была измерена активность 4-х антиоксидантных ферментов (рис. 2).

Каталаза (КАТ) и аскорбатпероксидаза (АП) катализируют разложение пероксида водорода. Каталазная и пероксидазная активность в экстрактах листьев была на 143 и 110% больше на фоне гербицидного стресса, чем в контроле. Обработка цельной культурой бактерий, напротив, нивелировала усиление активности КАТ, вызванное гербицидом. Наблюдали тенденцию и к уменьшению активности

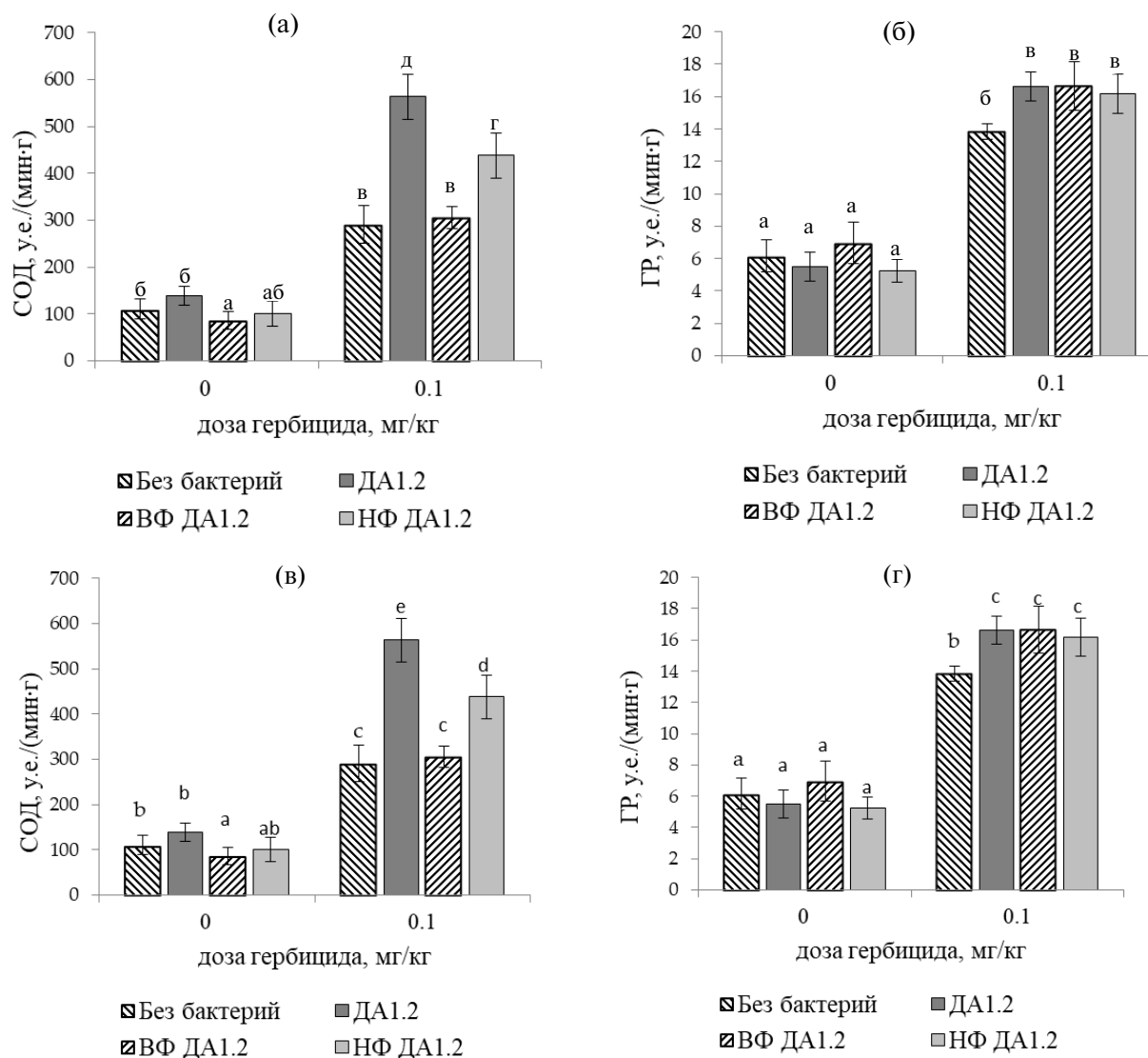


Рис. 2. Влияние метсульфурон-метила, штамма *P. protegens* DA1.2 и фракций его культуральной жидкости на активность антиоксидантных ферментов, выделенных из листьев рапса: (а) — каталазы, (б) — аскорбатпероксидазы, (в) — супероксиддисмутазы, (г) — глутатионредуктазы.

аскорбатпероксидазы (АП) после применения бактерий. В многочисленных исследованиях растительных каталаз и пероксидаз в стрессовых условиях преобладают выводы об активации этих ферментов после применения бактерий, стимулирующих рост растений. Например, такие данные были получены для рапса в условиях засоления [20, 21] и загрязнения тяжелыми металлами [22]. Наблюдавшаяся нами нормализация активности САТ и АР, по-видимому, являлась следствием уменьшения токсичности почвенных остатков метсульфурон-метила.

Реакция фермента СОД на одновременную обработку растений гербицидами и стимулирующими рост бактериями изучена мало. В работе [7] сообщали об усилении активности СОД в растениях под влиянием штамма *Pseudomonas chlororaphis* PAS18. Согласно

работе [23], сульфосульфурон или его комбинация с биостимуляторами индуцировали активность СОД в растениях пшеницы. В нашем исследовании обработка бактериями и их низкомолекулярными метаболитами привела к увеличению активности СОД в растениях рапса, испытывавших гербицидный стресс, на 93 и 51% соответственно. Однако обработки способствовали росту активности СОД только в сочетании с гербицидом.

Фермент ГР помогает поддерживать уровень антиоксидантного соединения — окисленного глутатиона. Его активность также усиливалась, только при условии одновременного воздействия на рапс бактериальной обработки и почвенных остатков гербицида. Причем стимулирующий эффект метаболитов не уступал влиянию живых бактерий. Можно предположить, что

СОД и ГР играют роль в смягчении гербицидного стресса и улучшении роста растений, обработанных бактериями. Таким образом, после обработки бактериями наблюдали изменения активности 4-х протестированных антиоксидантных ферментов. Помимо живых бактерий на активность ферментов влияла также фракция низкомолекулярных метаболитов, что не позволило связать наблюдаемый эффект лишь с микробной деструкцией гербицида и указывало на непосредственное действие каких-то метаболитов штамма *P. protegens* DA1.2 на растения. Возможно, бактерии и их метаболиты активировали в растениях механизмы индуцированной системной толерантности, как было ранее показано для микроорганизмов, уменьшающих в растениях стресс от засухи [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обработка культурой бактерий *P. protegens* DA1.2 и ее производными в лабораторном вегетационном эксперименте уменьшала фитотоксичность загрязненной метсульфурон-метилом почвы для растений рапса. Защитный эффект обработок убывал в ряду: культуральная жидкость (КЖ) с живыми клетками бактерий—бесклеточная низкомолекулярная фракция КЖ—бесклеточная высокомолекулярная фракция КЖ. На биохимическом уровне он выражался в частичном восстановлении нормальной активности фермента ацетолактатсинтазы (АЛС), уменьшении окислительных повреждений и изменении активности антиоксидантных ферментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Z.-J., Xu J.-X., Muhammad A., Ma G.-R. Effect of bound residues of metsulfuron-methyl in soil on rice growth // *Chemosphere*. 2005. V. 58. № 9. P. 1177–1183.
2. Kaur T., Brar L.S. Residual effect of wheat applied sulfonylurea herbicides on succeeding crops as affected by soil pH // *Indian J. Weed Sci.* 2014. V. 46. № 3. P. 241–243.
3. Mehdizadeh M., Alebrahim M.T., Roushani M., Streibig J.G. Evaluation of four different crops' sensitivity to sulfosulfuron and tribenuron methyl soil residues // *Acta Agric. Scandinavica. Sect. B Soil Plant Sci.* 2016. V. 66. № 8. P. 706–713.
4. Sarmah A.K., Sbadie J. Hydrolysis of sulfonylurea herbicides in soils and aqueous solutions: A review // *J. Agric. Food Chem.* 2002. V. 50. № 22. P. 6253–6265.
5. Wang H., Xu J., Yates S.Y., Zhang J., Gan J., Ma J., Wu J., Xuan R. Mineralization of metsulfuron-methyl in Chinese paddy soils // *Chemosphere*. 2010. V. 78. № 3. P. 335–341.
6. Ajjah N., Fiodor A., Pandey A.K., Rana A., Pranaw K. Plant growth-promoting bacteria (pgpb) with biofilm-forming ability: A Multifaceted agent for sustainable agriculture // *Diversity*. 2023. V. 15. № 1. art. 112.
7. Jiang Z., Jiang D., Zhou Q., Zheng Z., Cao B., Meng Q., Qu J., Wang Y., Zhang Y. Enhancing the atrazine tolerance of *Pennisetum americanum* (L.) K. Schum by inoculating with indole-3-acetic acid producing strain *Pseudomonas chlororaphis* PAS18 // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2020. V. 202. Art. 110854.
8. Bakaeva M., Chetverikov S., Timergalin M., Feoktistova A., Rameev T., Chetverikova D., Kenjieva A., Starikov S., Sharipov D., Hkudaygulov G. PGP-Bacterium *Pseudomonas protegens* improves bread wheat growth and mitigates herbicide and drought stress // *Plants*. 2022. V. 11. Art. 3289.
9. Motamedi M., Zahedi M., Karimmojeni H., Baldwin T.C., Motamedi H. Rhizosphere-associated bacteria as biofertilizers in herbicide-treated alfalfa (*Medicago sativa*) // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2023. V. 23. P. 2585–2598.
10. Traxler C., Gaines T.A., Küpper A., Luemmen P., Dayan F.E. The nexus between reactive oxygen species and the mechanism of action of herbicides // *J. Biol. Chem.* 2023. V. 299. № 11. Art. 105267.
11. Феоктисова А.В., Тимергалин М.Д., Рамеев Т.В., Четвериков С.П. Обработка растений пшеницы бактериями *Pseudomonas protegens* DA1.2 нивелировала негативное действие гербицида Чисталан в условиях дефицита воды // *Агрохимия*. 2021. № 10. С. 89–96.
12. Четверикова Д.В., Бакаева М.Д., Кенджиева А.А., Худайгулов Г.Г., Четвериков С.П. Применение бактерий для повышения устойчивости рапса к остаткам в почве гербицида Наномет // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2023. Т. 37. № 3. С. 22–27.
13. Simpson D., Stoller E., Wax L. An *in vivo* acetolactate synthase assay // *Weed Technol.* 1995. V. 9. № 1. P. 17–22.
14. Hodges D.M., Delong J.M., Forney C.F., Prange R.K. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds // *Planta*. 1999. V. 207. P. 604–611.
15. Elavarthi S., Martin B. Spectrophotometric assays for antioxidant enzymes in plants // *Plant Stress Tolerance. Methods in Molecular Biology* / Ed. Sunkar, R. N.Y., U.S.: Humana Press, 2010. V. 639, P. 273–280.
16. Lei Q., Zhong J., Chen S.F., Wu S., Huang Y., Guo P., Mishra S., Bhatt K., Chen S. Microbial degradation as a powerful weapon in the removal of sulfonylurea herbicides // *Environ. Res.* 2023. V. 235. Art. 116570.
17. Palma-Bautista C., Vázquez-García J.G., de Portugal J., Bastida F., Alcántara-de la Cruz R., Osuna-Ruiz M.D., Torra J., De Prado R. Enhanced detoxification via Cyt-P450 governs cross-tolerance to ALS-inhibiting herbicides in weed species of *Centaurea* // *Environ. Pollut.* 2023. V. 322. Art. 121140.

18. Четвериков С. П., Четверикова Д.В., Кенджиева А.А., Бакаева М.Д. Использование гербицидов в качестве питательного субстрата бактериями-стимуляторами роста сельскохозяйственных культур // Естеств. и техн. науки. 2019. № 11. С. 108–111.
19. Mittler R., Zandalinas S. I., Fichman Y., Van Breusegem F. Reactive oxygen species signalling in plant stress responses // Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 2022. V. 23. № 10. P. 663–679.
20. Neshat M., Abbasi A., Hosseinzadeh A., Sarikhani M.R., Dadashi Chavan D., Rasoulnia A. Plant growth promoting bacteria (PGPR) induce antioxidant tolerance against salinity stress through biochemical and physiological mechanisms // Physiol. Mol. Biol. Plants. 2022. V. 28. P. 347–361.
21. Rossi M., Borromeo I., Capo C., Glick B.R., Del Gallo M., Pietrini F., Forni C. PGPB Improve photosynthetic activity and tolerance to oxidative stress in *Brassica napus* grown on salinized soils // Appl. Sci. 2021. V. 11. № 23. Art. 11442.
22. Raihan M.R.H., Rahman M., Mahmud N.U., Adak M.K., Islam T., Fujita M., Hasanuzzaman M. Application of rhizobacteria, *Paraburkholderia fungorum* and *Delftia* sp. confer cadmium tolerance in rapeseed (*Brassica campestris*) through modulating antioxidant defense and glyoxalase systems // Plants. 2022. V. 11. № 20. Art. 2738.
23. Iwaniuk P., Łuniewski S., Kaczyński P., Łozowicka B. The Influence of humic acids and nitrophenols on metabolic compounds and pesticide behavior in wheat under biotic stress // Agronomy. 2023. V. 13. № 5. Art. 1378.
24. Gowtham H. G., Singh S. B., Shilpa N., Aiyaz M., Nataraj K., Udayashankar A. C., Amruthesh K.N., Murali M., Poczai P., Gafur A., Almalki W.H., Sayyed R. Z. Insight into recent progress and perspectives in improvement of antioxidant machinery upon PGPR augmentation in plants under drought stress: a review // Antioxidants. 2022. V. 11. № 9. Art. 1763.

Effect of the Growth-Stimulating Bacterium *Pseudomonas protegens* DA1.2 and Its Metabolites on Damage to Rapeseed by Soil Residues of Metsulfuron-Methyl

M. D. Bakaeva^{a, #}, A. A. Kendzhieva^a, S. N. Starikov^a, S. P. Chetverikov^a, D. A. Chetverikova^a

^aUfa Institute of Biology, Ufa Federal Research Center, RAS

prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

[#]E-mail: chelab007@yandex.ru

The biochemical processes mediating the positive effect of bacteria on plants experiencing herbicidal stress were investigated. For this purpose the effect of the *Pseudomonas protegens* DA1.2 bacterial strain, low molecular weight (<5 kDa) and high molecular weight (>5 kDa) fractions of its culture fluid (CF) on the activity of acetolactate synthase (ALS) and the antioxidant status of rapeseed (*Brassica napus* L.) of the Kupol variety grown under artificial lighting in metsulfuron-methyl contaminated soil was evaluated. Strain *P. protegens* DA1.2 and its metabolites contributed to an increase in the mass of rapeseed shoots by 21–68%, reduced the inhibition of the ALS enzyme by 11–24% and mitigated the manifestations of oxidative stress. The protective effect of the treatments decreased in a row: CF with living bacterial cells-low molecular weight fraction of CF-high molecular weight fraction of CF. An increase in the activity of superoxide dismutase by 51–94% and glutathione reductase by 17–20% in plants treated with bacteria or their metabolites indicated the possible participation of these antioxidant enzymes in reducing the phytotoxicity of metsulfuron-methyl soil residues for rapeseed plants.

Keywords: metsulfuron-methyl, bacteria, rapeseed, growth stimulant, acetolactate synthase, oxidative stress.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ФУНГИЦИДОВ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ПОДСОЛНЕЧНИКА

© 2024 г. А. К. Лысов^{1,*}, Н. И. Наумова¹, Д. О. Морозов¹, В. В. Букреев¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений

196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: lysov4949@yandex.ru

Изучили эффективность защиты подсолнечника от септориоза в 3-х системах защиты: химической, интегрированной и биологизированной. Каждая система имела 2 повторности, в одной из них вносили осенью почвенный биологический фунгицид Стернифаг, СП (*Trichoderma harzianum*, штамм ВКМ F-4099D, 10^{10} КОЕ/г). Исследование проводили в 2021 и 2022 гг. на поле НИЦ «Агробиотехнология» в Шебекинском р-не Белгородской обл. В интегрированной и биологизированной системах защиты применяли биопрепараты. В частности, в биологизированной системе защиты применяли биопрепарат Алирин-Б, Ж. Опытным путем установлено, что при осеннем внесении почвенного биологического фунгицида Стернифаг, СП во всех вариантах систем защиты отмечено повышение эффективности обработок и урожайности подсолнечника. Также было установлено, что исследованные биологические препараты обладали ростстимулирующим эффектом на вегетативные органы растений, включая корневую систему. Хозяйственная оценка 3-х систем защиты подсолнечника показала, что средняя за 2 года урожайность была больше во всех вариантах при внесении препарата Стернифаг, СП. Наибольшая урожайность была получена при интегрированной системе защиты 39.3 ц/га. Из-за высоких затрат на препараты рентабельность в химической системе была в обеих повторностях меньше других вариантов — 215 и 286%. В биологизированной системе рентабельность была самой высокой — 536 и 618%, это было связано с затратами на биологические препараты, которые были в 2 раза меньше. Таким образом, рекомендовано внедрение интегрированной и биологизированной систем защиты подсолнечника, что будет способствовать не только снижению затрат на проведение защитных мероприятий, но и уменьшению пестицидной нагрузки на агроэкосистемы и улучшению качества готовой продукции за счет применения биологических пестицидов.

Ключевые слова: подсолнечник, биопрепараты, болезни подсолнечника, химическая защита, биологическая защита, интегрированная защита, эффективность обработок, сохраненный урожай.

DOI: 10.31857/S0002188124120052, **EDN:** VWHYNQ

ВВЕДЕНИЕ

Подсолнечник — одна из важнейших масличных культур в мировом и отечественном земледелии. Россия является мировым лидером по площади и производству подсолнечника. Его доля в структуре посевных площадей масличных культур составляет 70%, среди производимых растительных масел — 85% [1]. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур, в частности подсолнечника, предусматривают использование эффективных средств защиты растений от комплекса вредителей, болезней и сорной растительности. При этом в современных условиях уделяется большое внимание сохранению и повышению качества урожая при обеспечении экологической безопасности для окружающей среды [2, 3]. Площади посевов подсолнечника постоянно расширяются, одновременно с этим наблюдается нарастание поражения болезнями

и сорняком — заразихой посевов [4]. Подсолнечник поражают более 40 видов возбудителей различных заболеваний [5]. Наибольшую опасность сейчас представляют такие распространенные и вредоносные болезни, как белая и серая гнили, фомопсис, ложная мучнистая роса, альтернариоз, септориоз (бурая пятнистость). Их инфекционный потенциал постоянно нарастает, создавая угрозу урожаю и его качеству. Распространение болезней и сорняка-паразита заразики на подсолнечнике связано, прежде всего, с нарушением севооборотов, преобладанием зарубежных сортов-гибридов, которые неустойчивы к грибной и вирусной инфекциям, накоплению в почве инфекции и появлению новых более агрессивных рас патогенов. Правильное размещение подсолнечника в севообороте с возвращением его на прежнее поле не ранее чем через 7–8 лет является наиболее радикальной мерой снижения вредоносности

от поражения растений болезнями и вредителями. Лучшими предшественниками подсолнечника являются озимая пшеница и яровой ячмень [6]. Высокий экспортный потенциал подсолнечника и решения задач по получению сельскохозяйственной продукции с улучшенными экологическими характеристиками настоятельно требуют более широкого использования интегрированных и биологизированных систем защиты. Переход на указанные системы защиты должен обеспечить снижение пестицидной нагрузки на агроценозы, повысить качество продукции. В настоящее время объемы применения биологических средств защиты растений в Российской Федерации значительно сократились, чем в бывшем СССР, и составляют всего 0,9 млн га, в связи с чем в настоящее время активно проводят исследования для расширения ассортимента и использования биопрепаратов в системах интегрированной защиты основных сельскохозяйственных культур [8].

Цель работы – расширение ассортимента биологических средств для защиты подсолнечника от болезней и оценка их биологической и экономической эффективности в различных системах защиты.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовательские испытания по оценке 3-х систем защиты с использованием биопрепаратов на подсолнечнике против болезней проводили в 2021 и 2022 гг. на опытных полях ООО НИЦ «Агробiotехнология» согласно методическим рекомендациям [9, 10].

Опытное поле ООО НИЦ «Агробiotехнология» расположено в 5-ти км на Ю.-В. от с. Чураево Шебекинского р-на Белгородской обл., ориентировочные GPS-координаты – 50°28'40,6''N36°54'25,6''E. Опыты были мелкоделяночными, размер делянок 32 м², размещение делянок рендомизированное, повторность четырехкратная. Для закладки опытов высевали подсолнечник сорта Арлин, двухлинейный

гибрид, который включен в Госреестр селекционных достижений по Центрально-Черноземному, Северо-Кавказскому и Нижневолжскому регионам [11]. Средняя урожайность в Центрально-Черноземном регионе составляет 25,3 ц/га. Vegetационный период – 118 сут. Максимальная урожайность семян в Центрально-Черноземном регионе 36,5 ц/га получена на Новооскольском ГСУ Белгородской обл. в 2018 г. Сорт восприимчив к белой гнили, очень слабо поражается серой и сухой гнилью, слабо – заразной и ржавчиной. Норма высева – 7–8 шт. семян/м погонный. Дата высева – последняя декада апреля. В севообороте предшественником подсолнечника была озимая пшеница.

Схемой опыта на учетных делянках была предусмотрена оценка эффективности 3-х систем защиты подсолнечника: химической, интегрированной и биологизированной. Схема опытов в 2021–2022 гг. представлена в табл. 1.

Были применены 2 биологических препарата Алирин-Б, Ж и Стернифаг, СП. Алирин-Б, Ж – фунгицид на основе бактерии *Bacillus subtilis* В-10 ВИЗР, который рекомендован к применению в качестве лечебного и профилактического препарата, эффективно подавляющего возбудителей грибных заболеваний растений. Кроме этого, Алирин-Б, Ж имеет 4-й класс опасности (малоопасный) и способен снижать токсичность почв после пропаривания, применения химических средств защиты растений путем восстановления почвенной микрофлоры. Срок защитного действия препарата на поверхности растений (листьях, стеблях, цветах) составляет 2 нед благодаря защитному барьеру из полезной микрофлоры (после обильных дождей необходимо повторить обработку).

Стернифаг, СП – почвенный биологический фунгицид, применяемый для разложения растительных остатков и подавления почвенных фитопатогенов. Биологический фунгицид на основе гриба *Trichoderma harzianum* ВКМ F-4099D, который рекомендован

Таблица 1. Схема микрополевого опыта (Белгородская обл., 2021, 2022 г.)

Вариант защиты	Делянка, №			
	1	2	3	4
Химическая система защиты + осеннее внесение препарата Стернифаг, СП	1.1	1.2	1.3	1.4
Химическая система защиты	2.1	2.2	2.3	2.4
Интегрированная система защиты + осеннее внесение препарата Стернифаг, СП	3.1	3.2	3.3	3.4
Интегрированная система защиты	4.1	4.2	4.3	4.4
Биологизированная система защиты + осеннее внесение препарата Стернифаг, СП	5.1	5.2	5.3	5.4
Биологизированная система защиты	6.1	6.2	6.3	6.4
Контроль (без фонового внесения Стернифаг, СП)	7.1	7.2	7.3	7.4

к применению в качестве лечебного и профилактического препарата, эффективно подавляет возбудителей грибных заболеваний (корневые гнили, пятнистости) зерновых, овощных культур и разлагает высокополимерные компоненты растительных остатков. Стернифаг, СП относится к 4-му классу опасности (малоопасный). Отличительной особенностью препарата является его высокая биологическая активность, безопасность для растений, устойчивость к перепадам температур и химическому загрязнению почвы.

Системы защиты подсолнечника и препараты, которые применяли в исследовании, представлены в табл. 2.

Зарегистрированные для борьбы с сорной растительностью микогербициды отсутствовали, в связи с чем для объективной оценки 3-х систем защиты предусматривали применение химических гербицидов против однолетних злаковых и некоторых двудольных сорняков во всех вариантах и даже в контроле.

Семена подсолнечника для посева, поступавшие с семенных заводов, были обработаны протравителями централизованно.

Учеты на обработанных участках осуществляли в соответствии с методикой [12].

Рабочую жидкость готовили непосредственно перед обработкой и в соответствии с нормами внесения, рекомендованными [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Годы исследования незначительно различались по погодным условиям. Метеорологические условия 2021 г. в весенний и летний периоды вегетации подсолнечника были оптимальными для данной культуры. Температура воздуха находилась в диапазоне среднесезонной нормы: в 1-й и 2-й декадах апреля составляла 4.4 и 8.9 °С, мая – 12.0 и 17.6 °С.

Метеорологические условия 2022 г. в весенний и летний период вегетации также были оптимальными для данной культуры. Температура воздуха находилась в диапазоне среднесезонной нормы: в 1-й и 2-й декадах апреля составляла 5.0 и 7.0 °С, мая – 13.3 и 14.9 °С. Среднемесячная температура в мае, июне 2021 г. составила 16.1 и 20.9 °С, в 2022 г. – 12.7 и 20.3 °С соответственно, что было близким к биологическому оптимуму и способствовало нормальному росту и развитию растений подсолнечника.

Мониторинг сорных растений на учетных делянках показал, что из сорных растений в посевах доминировали ярутка полевая (*Thlaspi arvense* L.) и всходы малолетних яровых сорняков: мари белой (*Chenopodium album* L.). В связи с этим были проведены 2 гербицидные обработки всех делянок перед посевом под культивацию гербицидом Метолс, КЭ с нормой расхода препарата 1.3 л/га против однолетних злаковых и некоторых двудольных сорняков и в фазе 2 пары листьев – гербицидом Квикстеп, МКЭ с нормой расхода препарата 0.4 л/га против однолетних злаковых сорняков. Данные обработки

Таблица 2. Схема применения препаратов в посевах подсолнечника в вариантах опыта

Препарат	Фаза развития растения	Системы защиты			
		химическая	интег- рированная	биоло- гизированная	кон- троль
Семена подсолнечника, протравленные поставщиком					
Осеннее внесение препарата Стернифаг, СП <i>Trichoderma harzianum</i> , штамм ВКМ F-4099D (титр 10 ¹⁰ КОЕ/г)		80 г/га	80 г/га	80 г/га	—
Без внесения препарата Стернифаг, СП		—	—	—	—
Обработка гербицидами от однолетних злаковых и некоторых двудольных сорняков					
Метолс КЭ-(С—Метолахлор 960 г/л	Перед посевом под культивацию	1.3 л/га	1.3 л/га	1.3 л/га	1.3 л/га
Квикстеп, МКЭ (Клетодим 130 г/л + галоксифоп-Р-метил 80 г/л)	2 пары листьев	0.8 л/га	0.4 л/га	0.4 л/га	0.4 л/га
Обработка фунгицидами против болезней (альтернариоза, фомоза, белой и серой гнили, септориоза, фомопсиса)					
Пропульс, СЭ (Протиокназол 125 г/л + Флуопирам 125 г/л)	Бутонизация (звезда)	1.0 л/га	0.8 л/га	—	—
Алирин-Б, Ж, (<i>Bacillus subtilis</i> титр 10 ⁹ КОЕ/г)		—	2.0 л/га	3.0 л/га	—
Биолипостим, Ж, (биополимеры)		—	0.3 л/га	0.3 л/га	—

позволили обеспечить чистоту посевов подсолнечника от сорной растительности в течение всей вегетации культуры.

Оценку эффективности применения 3-х технологий защиты проводили при обработке подсолнечника против болезней химическими фунгицидами и биопрепаратами. В 2021 и 2022 гг. посадки подсолнечника поражались в фазе бутонизации (стадия звезда) септориозом, экономический порог вредоносности развития болезни превышал 10%.

Против септориоза при применении химической защиты были проведены обработки фунгицидом

Пропульс, СЭ с нормой расхода 1.0 л/га. При применении интегрированной защиты обработку проводили фунгицидом Пропульс, СЭ в минимальной дозе 0.8 л/га (по регламенту справочника пестицидов и агрохимикатов 2021 г.) и препаратом Алирин-Б, Ж с нормой расхода 2 л/га. При биологизированной защите применяли только Алирин-Б, Ж с нормой расхода 3 л/га. Расход рабочей жидкости во всех вариантах опытов составлял 200 л/га. Развитие септориоза на подсолнечнике в вариантах опыта представлено в табл. 3.

Таблица 3. Степень поражения растений подсолнечника септориозом, 2021 г.

Дата учета	Варианты (всего учтено растений $N = 80$)	Из них поражено в баллах						Распростра- ненность болезни (P) $P = n/N \cdot 100$ (%)	Сумма произведений числа больных растений на соответствующий им балл поражения $\Sigma(a \cdot b)$	Развитие болезни, % $R = \Sigma(a \cdot b) : N$ ($R = \Sigma(a \cdot b)$ $100 : N \cdot K$)
		0	1	2	3	4	Итого (n)			
2021 г.										
01.07	Стернифаг, СП 80 г/га									
	Химическая защита	67	6	4	3	0	13	16.2	23	0.29 (7.2%)
	Интегрирован ная защита	68	5	4	3	0	12	15.0	22	0.28 (6.9%)
	Биологизированная защита	67	5	4	4	0	13	16.2	25	0.31 (7.8%)
	Без Стернифага, СП									
	Химическая защита	64	8	4	4	0	16	20.0	28	0.35 (8.7%)
	Интегрирован- ная защита	65	7	4	4	0	15	18.7	27	0.34 (8.4%)
	Биологизированная защита	64	7	5	4	0	16	20.0	29	0.36 (9.1%)
	Контроль (без обработки)	60	9	7	4	0	20	25.0	35	0.44 (10.9%)
2022 г.										
01.07	Стернифаг, СП 80 г/га									
	Химическая защита	68	5	5	2	0	12	15.0	21	0.26 (6.6%)
	Интегрированная защита	71	4	3	2	0	9	11.3	16	0.2 (5.0%)
	Биологизированная защита	68	5	4	3	0	12	15.0	22	0.28 (6.9%)
	Без Стернифага, СП									
	Химическая защита	65	7	6	2	0	15	18.8	25	0.31 (7.8%)
	Интегрированная защита	66	6	6	2	0	14	17.5	24	0.3 (7.5%)
	Биологизированная защита	65	7	6	3	0	16	20.0	28	0.35 (8.8%)
	Контроль (без обработки)	60	9	8	3	0	20	25.0	34	0.43 (10.6%)

Таблица 4. Изменение морфометрических показателей растений подсолнечника при применении систем защиты

Вариант	Средняя длина корня			Средняя длина стебля		
	см					
	2021 г.	2022 г.	средняя за 2 года	2021 г.	2022 г.	средняя за 2 года
Осеннее внесение препарата Стернифаг, СП						
Химическая система защиты	19.0	17.0	18	129	67.0	97.9
Интегрированная система защиты	22.7	21.5	22.0	135	72.0	104
Биологизированная система защиты	16.6	13.3	14.9	123	64.0	93.5
Контроль	16.3	12.3	14.3	112	56.0	84.2
Без применения препарата Стернифаг, СП						
Химическая система защиты	17.4	16.3	16.8	120	65.5	92.8
Интегрированная система защиты	19.4	17.5	18.5	121	69.3	95.3
Биологизированная система защиты	16.0	12.5	14.3	113	60.0	56.7
Контроль	15.7	11.5	13.6	109	52.0	80.4

Большинство примененных биопрепаратов не только эффективно подавляли возбудителей грибных заболеваний (корневые гнили, пятнистости), но и обладали ростстимулирующим эффектом на вегетативные органы растений, включая корневую систему, что очень важно для культуры подсолнечника. Подсолнечник является засухоустойчивым растением благодаря мощной корневой системе, дающей возможность усваивать влагу с глубины до 3 м и опушению стебля и листьев, что позволяет уменьшить испарение воды. В связи с этим при испытаниях 3-х систем защиты провели оценку влияния средств защиты на морфологические признаки корневой системы и стебля (табл. 4).

По результатам морфологической оценки за 2 года установлено, что растения во всех вариантах опыта были хорошо сформированы. Обследование деленок различных вариантов защиты (с осенним внесением препарата Стернифаг, СП) выявило отличия в развитии корневой системы и вегетативной части растений в сравнении с контролем (без осеннего внесения препарата Стернифаг, СП), в этом варианте они были менее развиты по сравнению с другими, длина стебля составила 80,4 см, длина корня – 13,6 см. Наилучшие показатели развития растений подсолнечника были в варианте с интегрированной системой защиты. Даже без внесения препарата Стернифаг, СП длина стебля составляла 95,3 и 104 см, длина корня – 18,5 и 22,0 см.

Полученные в результате защитных мероприятий высокие показатели развития растений подсолнечника, естественно, оказали влияние на формирование урожайности культуры. Учет урожая проводили на всех учетных деланках, выбранные растения обмолачивали и взвешивали.

Результаты учета среднего урожая в вариантах 3-х систем защиты за 2021 и 2022 гг. представлены в табл. 5.

Установлено, что наибольшая прибавка урожайности была в варианте интегрированной системы защиты с осенним внесением препарата Стернифаг, СП (на 18,6 ц/га больше относительно контроля). Вариант интегрированной системы защиты без применения препарата Стернифаг, СП также показал прибавку урожайности 17,3 ц/га.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно рекомендовать применение интегрированной защиты в посевах подсолнечника, зарекомендовавшей себя наибольшим показателем урожайности.

Необходимо было также провести расчет экономической эффективности опытных систем защиты культуры. Для этого определяли показатели затрат на проведение обработок и доход от реализации дополнительно полученного урожая. Прежде всего была рассчитана стоимость полученной прибавки урожайности для всех систем защиты подсолнечника. В качестве стоимости семян подсолнечника принята рыночная стоимость реализации семян в 2022 г., она составляла 25 тыс. руб./т семян. Наибольший доход получен от реализации прибавки урожая семян при применении интегрированной системы защиты: без внесения препарата Стернифаг, СП – 43,250 руб./га, и с его внесением – 46,500 руб./га.

Расчетом затрат на проведение систем защиты подсолнечника установлено, что больше всего требовалось денежных средств для химической защиты подсолнечника с внесением препарата Стернифаг, СП – 9,519 руб./га и без его внесения – 8,907 руб./га.

Таблица 5. Экономическая эффективность систем защиты подсолнечника

Показатель	Варианты (системы) защиты			
	химическая	интегрированная	биологизированная	контроль
Осеннее внесение препарата Стернифаг, СП				
Урожайность (средняя за 2 года), ц/га	35.4	39.3	34.6	20.7
Прибавка урожайности, ц/га относительно контроля	14.7	18.6	14.0	
Стоимость прибавки урожая, руб./га	36750	46500	34875	
Всего затраты на защиту подсолнечника, руб./га	9519.6	8754.7	4862.7	
Затраты на препараты для обработки, руб./га	9357.4	7897.2	4005.2	
Доход, руб./га	27230.4	37745.3	30012.3	
Рентабельность, %	286	478	618	
Без внесения препарата Стернифаг, СП				
Средняя за 2 года урожайность, ц/га	31.85	37.95	31.4	
Прибавка урожая, ц/га, относительно контроля	11.2	17.3	10.75	
Стоимость прибавки урожая, руб./га	28000	43250	26875	
Всего затраты для обработок систем	8907.4	8142.2	4222.7	
Затраты на препараты для обработки	8734.0	7257.2	3365.2	
Доход, руб./га	19092.6	35107.8	22624.8	
Рентабельность, %	215	432	536	

Для проведения биологизированной системы защиты потребовалось в 2 раза меньше затрат (соответственно 4,222 и 4,862 руб./га), что было связано с более низкими ценами на биопрепараты. Рентабельность этих обработок была самой высокой – 536 и 618%. Кроме экономии денежных средств, при защите подсолнечника данная система защиты растений будет способствовать снижению пестицидной нагрузки на агроэкосистемы и улучшению качества готовой продукции. Результаты опыта доказали обоснованность применения биологических фунгицидов в системах защиты подсолнечника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано положительное влияние осеннего внесения препарата Стернифаг, СП под подсолнечник, что позволило дополнительно увеличить урожайность по сравнению с вариантами без внесения биофунгицида: при биологизированной системе защиты – на 3.2, интегрированной – на 1.3 и химической – на 3.5 ц/га.

В результате применения биологических фунгицидов при биологизированной системе защиты на фоне осеннего внесения препарата Стернифаг, СП получена прибавка урожайности относительно контроля, которая составила 14.0 ц/га. Интегрированная система защиты с осенним внесением препарата Стернифаг, СП позволила получить прибавку урожайности

культуры относительно контроля 18.6 ц/га. При химическом варианте защиты с осенним внесением препарата Стернифаг, СП прибавка составила 14.7 ц/га (16.1%) в сравнении с контролем.

Установили, что из-за невысоких цен на биологические препараты более рентабельными при проведении защиты культуры были биологизированная (516 и 618%) и интегрированная системы защиты (432 и 478%).

Данные системы защиты подсолнечника будут способствовать также снижению пестицидной нагрузки на агроэкосистемы и улучшению качества готовой продукции, за счет уменьшения применения химических пестицидов в системе интегрированной защиты (на 40.6% меньше (до 0.899 кг д.в./га пашни) по отношению к системе химической защиты).

Таким образом, можно рекомендовать применение биологических фунгицидов – препаратов Алирин-Б, Ж и Стернифаг, СП в интегрированной и биологизированной системах защиты подсолнечника, что позволяет увеличить урожайность подсолнечника и рентабельность защитных мероприятий в этих системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухонова Ю.В., Михина Н.Г. Мониторинг вредителей и болезней подсолнечника // Защита и карантин раст. 2023. № 1. С. 19–22. DOI:10.47528/1026-8634_2023_1_19

2. Лантеев А.Б., Мальцев В.К. Эффективность и безопасность пестицидов в защите подсолнечника от вредных организмов // *Агрохимия*. 2023. № 11. С. 63–70. DOI: 10.31857/S0002188123110078
3. Высоцкая Е.А., Крекотень Б.А. Оптимизация биоресурсного потенциала подсолнечника с использованием в технологии возделывания биологически активных препаратов // *Вестн. ВоронежГАУ*. 2017. № 1(52). С. 20–25. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2017.1.20
4. Якуткин В.И., Саулич М.И. Фитосанитарные риски болезней и заразики в ареалах подсолнечника России, Украины, Молдавии и Казахстана // *Вестн. защиты раст.* 2016. № 2(88). С. 15–21.
5. Макаров М.Р. Технология возделывания подсолнечника // *Совр. научн. исслед. и инновации*. 2021. № 12 [Электр. ресурс]. <https://web.snauka.ru/issues/2021/12/97200> (дата обращения: 11.01.2024).
6. Лукомец В.М., Семеренко С.А., Пивень В.Т., Бушнева Н.А., Влияние основных агротехнических приемов на развитие болезней и сорняков в посевах подсолнечника // *Защита и карантин раст.* 2020. № 10. С. 30–33. DOI: 10.47528/10268634_2020_10_30
7. Михайликова В.В., Стребкова Н.С., Живых А.В. Биометод в цифрах // *Защита и карантин раст.* 2022. № 11. С. 39–40. DOI: 10.47528/1026-8634_2022_11_39
8. Павлюшин В.А., Новикова И.И., Бойкова И.В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) // *Сел.-хоз. биол.* 2020. Т. 55. № 3. С. 421–438. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.3.421rus
9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1968. 355 с.
10. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 321 с.
11. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. (Электр. ресурс). Реестр селекционных достижений (gossortrf.ru).
12. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 378 с.
13. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории РФ. М., 2021. 826 с.

Evaluation of the Effectiveness of Biological Fungicides in Various Sunflower Protection Systems

A. K. Lysov^{a, #}, N. I. Naumova^a, D. O. Morozov^a, V. V. Bukreev^a

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

[#]E-mail: lysov4949@yandex.ru

The effectiveness of sunflower protection against septoria was studied in 3 protection systems: chemical, integrated and biologized. Each system had 2 repetitions, in one of them the soil biological fungicide Sternifag, *SP* (*Trichoderma harzianum*, strain VKM F-4099D, 1010 CFU/g) was introduced in autumn. The study was conducted in 2021 and 2022 at the Agrobiotechnology field in the Shebekinsky district of the Belgorod region. Biologics were used in integrated and biologized protection systems. In particular, the biological preparation Alirin-B, Zh was used in the biologized protection system. It has been experimentally established that during the autumn application of the soil biological fungicide Sternifag, *SP*, in all variants of protection systems, an increase in the efficiency of treatments and sunflower yields was noted. It was also found that the studied biological preparations had a growth-stimulating effect on the vegetative organs of plants, including the root system. An economic assessment of 3 sunflower protection systems showed that the average yield over 2 years was higher in all variants when applying Sternifag, *SP*. The highest yield was obtained with an integrated protection system of 39.3 c/ha. Due to the high costs of drugs, the profitability in the chemical system was in both replications less than other options – 215 and 286%. In the biologized system, profitability was the highest – 536 and 618%, this was due to the cost of biological drugs, which were 2 times less. Thus, it is recommended to introduce integrated and biologized sunflower protection systems, which will contribute not only to reducing the cost of protective measures, but also to reducing the pesticide burden on agroecosystems and improving the quality of finished products through the use of biological pesticides.

Keywords: sunflower, biological products, sunflower diseases, chemical protection, biological protection, integrated protection, efficiency of treatments, preserved harvest.

УДК 632.4:632.9:547.341

ИНСЕКТИЦИДНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ПРИРОДНЫХ ПИРЕТРИНОВ И ЗАМЕЩЕННЫХ БЕНЗОДИОКСОЛАНОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

© 2024 г. П. П. Муковоз¹, Р. И. Александров¹, В. Л. Семенов¹, С. А. Пешков²,
А. Н. Сизенцов², Л. Р. Валиуллин³, В. П. Муковоз⁴,
Н. В. Птицына⁴, Ю. И. Мешков^{5,*}

¹Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
428015 Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

²Оренбургский государственный университет
460018 Оренбург, просп. Победы, 13, Россия

³Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности
420075 Казань, Научный городок-2, Россия

⁴Смоленская государственная сельскохозяйственная академия
214000 Смоленск, ул. Большая Советская, 10/2, Россия

⁵Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН
119991 Москва, Ленинский просп., 47, Россия

*E-mail: yimeshkov@rambler.ru

С целью подтверждения теоретических расчетов валидности применения природных пиретринов совместно с компонентами растительных масел разработаны биологически активные композиции инсектицидов, выделенных из ромашки далматской (*Pyrethrum cinerariaefolium*) и веществ-синергистов, полученных из кунжутного, канангового и анисового масел. Установлено, что инсектицидные композиции проявили свою эффективность в отношении модельных насекомых-вредителей (тепличной белокрылки – *Trialeurodes vaporariorum*). Показано, что разработанные композиции могут быть использованы в качестве перспективной основы при создании новых средств защиты сельскохозяйственных растений от насекомых-вредителей.

Ключевые слова: биологически активные композиции, вещества-синергисты, бензодиоксоланы, инсектициды, пиретрины.

DOI: 10.31857/S0002188124120063, **EDN:** VVZBGS

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ежегодный ущерб от насекомых-вредителей (**НВ**), причиняемый урожаю продовольственных культур, составляет от 20 до 25% валового мирового производства аграрной продукции [1–3]. В этой связи **НВ** являются одной из ключевых проблем защиты сельскохозяйственных растений, представляя прямую угрозу продовольственной безопасности Российской Федерации [4–7]. Одной из причин больших потерь растениеводческой продукции является быстро приобретаемая насекомыми резистентность (устойчивость) к различным средствам защиты растений [8]. Этому способствует обилие видов **НВ**, трудности с диагностикой, их высокая плодовитость и скорость распространения [9].

Исследования, связанные с возникновением резистентности у **НВ**, и последующие разработки, направленные на поиск более эффективных химических

средств защиты растений, ведутся многими отечественными научными школами и коллективами [10–16]. Тем не менее полноценное осуществление таких разработок возможно только с применением современных методов медицинской химии (молекулярного докинга, виртуального скрининга и др.), которые ранее использовали в основном при производстве фармпрепаратов [17–24]. Несмотря на то, что данные методы только начинают завоевывать свое место в аграрном секторе [25–27], результаты таких исследований открывают широкие перспективы в сфере производства новых средств защиты сельскохозяйственных растений [28, 29]. В частности, теоретические расчеты, вскрывающие механизмы блокады веществами-синергистами ферментов насекомых, дезактивирующих пиретроидные инсектициды, позволяют реализовать направленный поиск биоцидных композиций, эффективно подавляющих резистентные популяции **НВ** [30].

В частности, были проведены теоретические расчеты валидности применения пиретроидных инсектицидов совместно с веществами-синергистами из группы бензодиоксоланов, позволяющие реализовать дальнейшую разработку инсектицидных композиций на их основе [31].

Цель работы – подтверждение валидности таких расчетов путем экспериментальной проверки эффективности инсектицидных композиций, включающих природные пиретрины (III) и вещества-синергисты (BC), содержащиеся в растительных маслах (кунжутном, кананговом и анисовом), в отношении НВ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения III выращивали ромашку далматскую (*Pyrethrum cinerariaefolium*) в количестве 240 растений. Из высушенных соцветий ромашки методами многократной экстракции липидных фракций выделяли III. Подбор соответствующих систем органических экстрагентов осуществляли экспериментально, руководствуясь максимально полным извлечением компонентов. Экстракты объединяли, растворитель отгоняли на ротаторном испарителе до получения концентрата в виде желтого масла. Полученный концентрат разделяли на препаративной нормально-фазовой хроматографической колонке, экспериментально подбирая соответствующие системы органических элюентов с их последующей отгонкой на ротаторном испарителе.

Анализ полученных образцов проводили методами хроматомасс-спектрометрии, получая хроматограммы и масс-спектры сверхвысокого разрешения содержащихся в образцах биологически активных компонентов. Масс-спектры компонентов записывали, регистрируя положительные ионы в режиме электрораспылительной ионизации (ESI-электроспрей). Анализ содержания BC в коммерчески доступных природных растительных маслах (кунжутном, кананговом и анисовом) проводили, используя их 1%-ные растворы (по массе) в смеси метанола с ацетонитрилом (32%: 67% по объему). Количественный состав целевых компонентов устанавливали методами хроматомасс-спектрометрии.

Разработку биологически активных композиций (БАК) на основе III и BC, содержащихся в растительных маслах, проводили экспериментальным путем на основании данных теоретических расчетов валидности применения пиретроидных инсектицидов совместно с веществами-синергистами из группы бензодиоксоланов, полученных методом молекулярного докинга. Рецептурный состав и количественное соотношение компонентов БАК подбирали экспериментальным путем, учитывая их растворимость в различных органических растворителях. Для получения исходного концентрата 1.0 г БАК растворяли в 50 мл диметилсульфоксида (ДМСО). Для получения рабочих растворов 10 мл исходного концентрата растворяли в 70 мл водно-этанол-хлороформного раствора (72%: 12%: 6%, по объему) и доводили конечный объем до 100 мл.

Биотестирование эффективности действия БАК в отношении модельных НВ проводили путем опрыскивания рабочими растворами растений фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* Linnaeus) сорта Среднеспелая, зараженных модельными тест-объектами – тепличной белокрылкой (*Trialeurodes vaporariorum*), с последующим подсчетом отношения числа погибших насекомых к исходному числу живых насекомых-вредителей на 3-и сутки после обработки. Опыт проводили в трехкратной повторности.

Модельные растения фасоли и насекомых-вредителей выращивали по стандартным методикам [32, 33]. Заражение модельных растений насекомыми-вредителями проводили, пересаживая на листья растений тепличную белокрылку. Статистическую обработку данных проводили по *t*-критерию Стьюдента, эффект считали достоверным при *p* < 0.001, используя программу XL 2012.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа данных хроматомасс-спектрометрии биологически активных компонентов ромашки далматской и компонентов кунжутного, канангового и анисового масел свидетельствовали, что в экстрактах ромашки содержится 6 классов пиретринов (пиретрины I и II, цинерины I и II, жасмолины I и II), а в экстрактах масел содержатся

Таблица 1. Содержание природных бензодиоксоланов в растительных и эфирных маслах

Компонент	Масла, концентрация компонента (%)		
	кунжутное	кананговое	анисовое
Сезамин	12.31	1.18	2.01
Сезамолин	0.71	—	—
Сезамол	2.89	1.67	2.29
Сезаминол	0.27	0.66	—
Эписезамин	—	2.31	2.09

Таблица 2. Содержание *ДВ* в *РР* № 1–9, %

Компонент	№ <i>РР</i>								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	содержание компонентов, %								
Пиретрины Ф I	10	10	10	5	10	10	15	10	15
Пиретрины Ф II	10	10	10	5	10	10	15	10	15
Пиретрины Ф III	10	10	10	5	10	10	15	15	15
Пиретрины Ф IV	10	10	10	5	10	10	15	15	15
Кунжутное масло	10	10	10	10	10	60	40	50	40
Кананговое масло	25	25	25	35	25	—	—	—	—
Анисовое масло	25	25	25	35	25	—	—	—	—

Таблица 3. Усиление действия *ДВ* в присутствии *ВС* в *РР* № 1–9, % гибели насекомых

Гибель насекомых (%) после обработки <i>РР</i> № 1–9								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	8	11	14	22	39	32	19	17

компоненты, имеющие в молекуле бензодиоксолановый фрагмент (табл. 1).

В результате дальнейшего исследования были составлены рабочие рецептуры (*РР*) № 1–9, содержащие фракции I–IV *ПП* и *ВС* в качестве компонентов. Состав и количественное соотношение действующих веществ (*ДВ*) в *РР* представлено в табл. 2.

Дальнейшее биотестирование показало, что использованные в *РР* № 1–9 *ВС* обладали достаточно высоким синергетическим эффектом. Во всех случаях наблюдали усиление действия *ДВ* в присутствии *ВС*. В *РР* № 6 наблюдали 39%-ную, в *РР* № 7 – 32%-ную, в *РР* № 8 – 19%-ную гибель насекомых (табл. 3). При этом наибольшую эффективность проявили *РР* № 6, 7.

Анализ полученных результатов показал, что природные масла (кунжутное, кананговое и анисовое) можно успешно использовать в составе композиций с природными пиретринами. Наибольший синергетический эффект кунжутного масла, вероятно, был связан с присутствием в нем таких преобладающих компонентов, как сезамин и сезамол (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные результаты экспериментально подтвердили теоретические расчеты валидности применения веществ-синергистов из группы бензодиоксоланов совместно с природными пиретринами. Предложенные в работе рабочие рецептуры инсектицидных биологически активных композиций могут быть успешно использованы при разработке средств защиты сельскохозяйственных растений от насекомых-вредителей

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорожкина Н.А.* Справочник по защите сельскохозяйственных растений от вредителей и болезней. Минск: Урожай, 1969. 286 с.
2. *Яхонтов В.В.* Вредители сельскохозяйственных растений и продуктов Средней Азии и борьба с ними. Ташкент: Гос. изд-во УзССР, 1953. 663 с.
3. *Соколов М.С., Семенов А.М., Спиридонов Ю.Я., Торопова Т.Ю., Глинушкин А.П.* Здоровая почва – условие устойчивости и развития агро- и социосфер (проблемно-аналитический обзор) // Изв. РАН. Сер. биол. 2020. № 1. С. 12–21. DOI: 10.31857/S0002332920010142
4. *Kim D.Y., Kadam A., Shinde S., Saratale R.G., Patra J., Ghodake G.* Recent developments in nanotechnology transforming the agricultural sector: a transition replete with opportunities // J. Sci. Food Agriculture. 2018. V. 98. № 3. P. 849–864. DOI: 10.1002/jsfa.8749
5. *Sunding D., Zilberman D.* The agricultural innovation process: research and technology adoption in a changing agricultural sector // Handbooks in Economics. 2001. V. 18. № 1A. P. 207–262. DOI: 10.1071/EA9940549
6. *Banfalvi G.* Antifungal activity of gentamicin B1 against systemic plant mycoses // Molecules. 2020. V. 25. № 10. P. 2401–2411. DOI: 10.3390/molecules25102401
7. *Thevissen K., Kristensen H.H., Thomma B.P., Cammue B.P.A., François I.E.J.A.* Therapeutic potential of antifungal plant and insect defensins // Drug Discovery Today. 2007. V. 12. № 21–22. P. 966–971. DOI: 10.2174/187221508786241684

8. Хрунин А.В. Биохимические и молекулярные аспекты метаболической устойчивости насекомых к инсектицидам // *Агрохимия*. 2001. № 7. С. 72–85.
9. Щеголев В.Н. Сельскохозяйственная энтомология. М.–Л: Сельхозгиз, 1960. 371 с.
10. Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО) // *Агрохимия*. 2019. № 5. С. 3–20. DOI: 10.1134/S000218811905003X
11. Семенов А.М., Глинушкин А.П., Соколов М.С. Здоровье почвенной экосистемы: от фундаментальной постановки к практическим решениям // *Изв. ТСХА*. 2019. № 1. С. 5–18.
12. Соколов М.С., Спиридонов Ю.Я., Калинин В.П., Глинушкин А.П. Управляемая коэволюция педосферы – реальная биосферная стратегия XXI века (вклад в развитие ноосферных идей В.И. Вернадского) // *Агрохимия*. 2018. № 11. С. 3–18. DOI: 10.1134/S0002188118110091
13. Романова И.Н., Рыбченко Т.И., Птицына Н.В. Агробиологические основы производства зерновых культур. Смоленск: Смоленск. ГСХА, 2008. 109 с.
14. Романова И.Н., Беляева О.П., Птицына Н.В., Рыбченко Т.И. Совершенствование технологий производства зерна и семян в Центральном регионе России // *Изв. СмоленскГУ*. 2011. № 4(16). С. 101–108.
15. Терентьев С.Е., Птицына Н.В., Можжекина Е.В. Азотное питание и качество пивоваренного солода // *Пиво и напитки*. 2017. № 6. С. 14–17.
16. Торики В.Е., Птицына Н.В. Качество зерна озимой пшеницы в зависимости от сроков посева и уровня минерального питания // *Вестн. АлтайГАУ*. 2017. № 3(149). С. 11–15.
17. Chemcraft [Электр. ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.chemcraftprog.com/>
18. Sanders M.P.A., Barbosa A.J.M., Zarzycka B., Nicolaes G.A.F., Klomp J.P.G., De Vlieg J., Del Rio A. Comparative analysis of pharmacophore screening tools // *J. Chem. Inform. Model*. 2012. V. 52. № 6. P. 1607–1620. DOI: 10.1021/ci2005274
19. Huang N., Shoichet B.K., Irwin J.J. Benchmarking sets for molecular docking // *J. Med. Chem*. 2006. V. 49. № 23. P. 6789–6801. DOI: 10.1021/jm0608356
20. Shoichet B.K. Virtual screening of chemical libraries // *Nature*. 2004. V. 432. № 7019. P. 862–865. DOI: 10.1038/nature03197
21. Sanders M.P.A., Barbosa A.J.M., Zarzycka B. Comparative analysis of pharmacophore screening tools // *J. Chem. Inform. Model*. 2012. V. 52. № 6. P. 1607–1620. DOI: 10.1021/ci2005274
22. Berman H.M., Westbrook J., Feng Z., Gilliland G., Bhat T.N., Weissig H., Shindyalov I.N., Bourne P.E. The Protein data bank // *Nucl. Acid. Res*. 2000. V. 28. № 1. P. 235–242. DOI: 10.1093/nar/28.1.235
23. Firefly computational chemistry program [Электр. ресурс]. Режим доступа: <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>
24. Neto A.C., Muniz E.P., Centoducatte R., Jorge F.E. Gaussian basis sets for correlated wave functions. Hydrogen, helium, first-and second-row atoms // *J. Mol. Struct. THEOCHEM*. 2005. V. 718. № 1–3. P. 219–224. DOI: 10.1016/j.theochem.2004.11.037
25. Муковоз П.П., Пешков С.А., Левенец Т.В., Сизенцов А.Н., Квитко А.В., Глинушкин А.П. Иновационные способы подавления микозов растений: подходы, решения, перспективы // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2020. Т. 34. № 12. С. 19–27. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11203
26. Соколов М.С., Спиридонов Ю.Я., Глинушкин А.П., Каракотов С.Д. Стратегия фундаментально-прикладных исследований в сфере адаптивно-интегрированной защиты растений // *Агрохимия*. 2018. № 5. С. 3–12.
27. Соколов М.С., Санин С.С., Долженко В.И., Спиридонов Ю.Я., Глинушкин А.П., Каракотов С.Д., Надикта В.Д. Концепция фундаментально-прикладных исследований защиты растений и урожая // *Агрохимия*. 2017. № 4. С. 3–9.
28. Mangalagiu I.I. Biological activity of some new azaheterocycles: 3rd French-Romanian colloquium on medicinal chemistry. Iasi, Romania, 2014. P. 194. DOI: 10.2478/achi-2014-0015
29. Rajput A.P., Kankhare A.R. Synthetic utility of azaheterocyclics: A Short review // *Inter. J. Pharm. Sci. Invent*. 2017. V. 6. P. 19–25.
30. Слынько Н.М., Леонова И.Н. Синергизм инсектицидов и перспективы его использования // *Агрохимия*. 1987. № 10. С. 116–130.
31. Mukovoz P., Mukovoz V., Dankovtseva E. Isolation of Dalmatian chamomile extracts – environmentally friendly natural compounds with insecticidal action // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 17. ser. “XVII Inter. Youth Sci. and Environ. Baltic Region Countries Forum “ECOBALTICA”. 2020. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/578/1/012010
32. Бобовые: горох, фасоль, боб, чечевица, соя / сост. Т.Е. Лушиц. М.: Кн. дом, 2001. 80 с.
33. Болотских А.С., Велюева Т.М., Томах Е.О. Оптимальные способы посева, схемы размещения и густота растений фасоли овощной // *Сб. научн. тр. по овощеводству и бахчеводству*. М.: РАСХН, ВНИИО, 2006. Т. 2. С. 111–115.

Insecticidal Compositions of Natural Pyrethrins and Substituted Benzodioxolanes from Vegetable Oils

P. P. Mukovoz^a, R. I. Alexandrov^a, V. L. Semenov^a, S. A. Peshkov^b, A. N. Sizentsov^b,
L. R. Valiullin^c, V. P. Mukovoz^d, N. V. Ptitsyna^d, Yu. I. Meshkov^{e, #}

^aChuvash State University named after I.N. Ulyanov,
Moskovsky prosp. 15, Cheboksary 428015, Russia

^bOrenburg State University,
prosp. Pobedy 13, Orenburg 460018, Russia

^cFederal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety,
Science Town-2, Kazan 420075, Russia

^dSmolensk State Agricultural Academy,
Bolshaya Sovetskaya ul. 10/2, Smolensk 214000, Russia

^eN.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the RAS,
Leninsky prosp. 47, Moscow 119991, Russia

[#]E-mail: yimeshkov@rambler.ru

In order to confirm the theoretical calculations of the validity of the use of natural pyrethrins together with the components of vegetable oils, biologically active compositions of insecticides isolated from Dalmatian chamomile (*Pyrethrum cinerariaefolium*) and synergistic substances obtained from sesame, kanang and anise oils have been developed. It was found that insecticidal compositions showed their effectiveness against model insect pests (greenhouse whitefly – *Trialeurodes vaporariorum*). It is shown that the developed compositions can be used as a promising basis for the creation of new means of protecting agricultural plants from insect pests.

Keywords: biologically active compositions, synergistic substances, benzodioxolanes, insecticides, Pyrethrins.

УДК 631.4:630:581.5

СЕКВЕСТРАЦИЯ УГЛЕРОДА ЭКОСИСТЕМАМИ ХОЛОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАБАЙКАЛЬЯ¹

© 2024 г. Г. Д. Чимитдоржиева^{1,*}, Э. О. Чимитдоржиева¹, Е. Ю. Мильхеев¹,
Ю. Б. Цыбенков¹, Ц. Д.-Ц. Корсунова¹

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

*E-mail: galdorgj@gmail.com

В Байкальском регионе сплошная криолитозона занимает ≈ 15 , переходная прерывистая с островами таликов – 30, переходная островная – 45, талики со сплошным ареалом – 10%. Обращает на себя внимание доминирование переходной полосы, которая отличается неустойчивым термодинамическим равновесием. Высокотемпературная многолетняя мерзлота легко деградирует при техноконверсии внешних условий теплообмена: удалении напочвенных покровов (органо-генного слоя и снежного покрова), сведении леса, распашках, пожарах и др. Эти обстоятельства повышают природные опасности и риски в регионе. В этой связи территория Забайкалья представляет большой интерес, находясь в зоне многолетней мерзлоты и вблизи ее южной границы, с одной стороны, и с повышенными темпами потепления в последние десятилетия, с другой. Континентальность и суровость климата в Бурятии выражены гораздо резче, чем в соседних обширных регионах России. Южная граница криолитозоны растянута практически по всей территории республики, в пределах которой выделяется целый спектр ландшафтов – от автоморфных лесных экосистем до широко распространенных в связи с высокой долей озер и болот гидроморфных ландшафтов, формирующихся при активном влиянии многолетнемерзлых пород, а также и сухостепных. Для реализации Киотского протокола по стабилизации концентраций парниковых газов (ПГ) в атмосфере требуется количественная оценка пространственно-временных изменений наземных поглотителей углерода. Выявление районов с высоким потенциалом и стратегий управления секвестрацией атмосферной углекислоты экосистемами является важной задачей и существует большая неопределенность в отношении фактических оценок резервуаров углерода и того, как на них может повлиять изменение климата. В складывающихся условиях изучение закономерностей функционирования почвенного и растительного резервуара углерода в Забайкалье считаем своевременным и актуальным.

Ключевые слова: холодные экосистемы, секвестрация углерода, почва, лес, Забайкалье.

DOI: 10.31857/S0002188124120074, **EDN:** VVTELU

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях важно научиться улавливать и долгосрочно хранить углекислый газ для замедления потепления климата. Эта практика в настоящее время рассматривается научным сообществом как неотъемлемая часть решения проблем изменения климата. Это возможно с помощью секвестрации атмосферного углерода путем устойчивого управления его запасами в почве и лесах. Глобальное изменение климата несет в себе как угрозы, так и новые возможности для развития различных территорий, а также необходимость разработки региональных

мер по смягчению негативного влияния изменения климата и адаптации к последствиям климатических изменений.

Процесс связывания углерода может задержать потепление атмосферы. Секвестрация углерода – это долгосрочное хранение углерода в природных поглотителях: растительности (особенно леса), почвах, водах. Этот процесс демонстрирует огромные перспективы для сокращения человеческого «углеродного следа».

В 2000 г. уровень содержания CO_2 составлял ≈ 369 мг/л, и этот показатель был больше, чем когда-либо за последнее тысячелетие. Такие беспрецедентные темпы роста настолько велики, что экосистемы могут оказаться неспособными адаптироваться к ним. Секвестрирование углерода, под которым

¹Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-24-20098 «Секвестрация углерода в результате естественного восстановления лесов после пожаров (на примере Прибайкальского заказника)».

понимается связывание диоксида углерода атмосферы в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией мортмассы в почвенное органическое вещество, обеспечивает потенциальную возможность смягчения климатических влияний на экосистемы. Роли секвестрации органического углерода и оценки отдельных параметров углеродного цикла уделяется все большее внимание в связи с изменениями климата и продовольственной безопасностью [1]. Углеродный след, углеродные компенсации и оценка углеродного баланса являются ключевыми вызовами и проблемами для современного практического почвоведения, прикладной экологии и экономики природопользования [2].

Известно, что сокращение содержания органического углерода в почве (*SOC*) в результате деградации почвы и неправильного управления привело к повышению уровня CO_2 в атмосфере. Однако, внедряя самые современные методы землепользования и современные системы управления в сельском хозяйстве, существует потенциал для замедления темпов выбросов CO_2 . Восстановление истощенного фонда почвенного органического углерода (*ПОУ*) возможно с помощью различных стратегий, таких как продвижение методов сокращенной или нулевой обработки почвы в сочетании с покровными или пожнивными культурами, а также внедрение круговорота питательных веществ посредством компостирования, внесения навоза и других видов удобрений [3]. Внедрение этих инновационных методов имеет решающее значение для решения проблем, вызванных изменениями окружающей среды, что делает секвестрацию углерода почвой важным решением. Авторы работы [4] отмечали, что минеральные удобрения и ирригационные насосы являются основными геоэкологическими факторами связывания углерода в почве.

Своеобразием условий криолитозоны является то, что в ее пределах выделяется целый спектр ландшафтов — от автоморфных лесных экосистем до широко распространенных в связи с высокой долей озер и болот гидроморфных ландшафтов, формирующихся при активном влиянии многолетнемерзлых пород. Растительный и почвенный покровы являются индикаторами происходящих климатических сдвигов, и исследование их изменений — актуальная задача не только для оценки, но и прогнозирования ресурсного потенциала регионов России.

Более 80% наземного углерода и 70% почвенного органического углерода депонировано в лесах наземных экосистем [5]. По этой причине леса являются основными климатостабилизирующими системами земной поверхности [6]. Самые значительные климатические изменения ожидаются на территории России, особенно в ее лесной зоне. Около 95% лесного покрова страны представлено бореальными

лесными экосистемами, которые эволюционно приспособились к холодному климату. Их адаптационная способность и буферная мощность по отношению к ожидаемому потеплению неизвестны. Предполагают, что при достижении определенного уровня потепления бореальные леса могут стать «элементом переключения», т.е. вступить в фазу неустойчивого состояния, когда относительно небольшие изменения внешней среды приведут к нелинейному отклику в функционировании экосистемы и гибели ее элементов с наименьшей адаптационной способностью [7]. Цель работы — оценка углерод-депонирующей функции холодных экосистем горного Забайкалья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования расположены в Западном Забайкалье [8, 9]. Также был собран литературный материал по почвам Республики Бурятия [10–17].

Полевые исследования на пробных площадях осуществляли методами, изложенными в работе [18]. Запасы органического углерода ($C_{\text{орг}}$) определяли в слоях почвы 0–20 см и 0–50 см с учетом плотности сложения по методике [18].

Статистическую обработку результатов и визуализацию данных проводили с использованием программы Microsoft Excel 2013 (пакет «Анализ данных») и Statistica 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дено углерода в почвах. Площадь земель в Республике Бурятия (**РБ**) составляет 35.1 млн га. Распределение земельного фонда по угодьям следующее: сельскохозяйственные угодья, всего — 3151.4, земли под поверхностными водами — 2413.0, болота — 488.4, земли под лесами и древесно-кустарниковой растительностью — 23888.5, другие угодья — 5192.1, из всех земель — земли под оленями пастбищами — 335.8 тыс. га. Наибольшее количество земель (66.7%) покрыто лесами и кустарниками, 7.7% территории занято водоемами, 1.3% — болотами. На долю сельскохозяйственных угодий приходится 8.8% всех земель. Согласно оценкам, темпы потепления климата составили 0.05–0.08 °C/год [19], и вместе с некоторыми другими районами Забайкалья было отнесено к территориям ускоренного потепления [20, 21]. Ускоренное потепление происходит на фоне относительно стабильного уровня среднегодового увлажнения в регионе [22], предопределяя формирование сопутствующего тренда аридизации климата, особенно выраженного в южной части Забайкалья [23, 24] (рис. 1).

В Бурятии выделяют 5 природно-климатических зон: горно-тундровая, горно-таежная (таежно-лесная), лесостепная, степная и сухостепная. Кроме этого, некоторые площади заняты интразональными

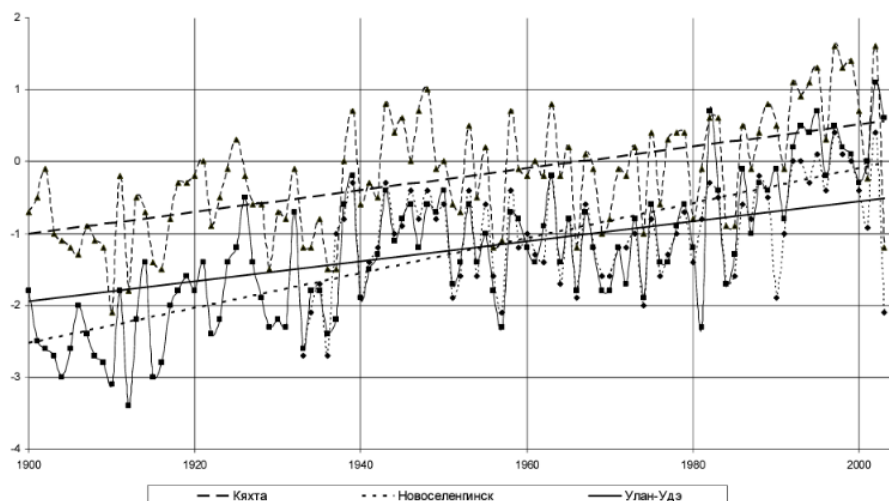


Рис. 1. Многолетняя динамика и тренды средней годовой температуры воздуха в Байкальском регионе [23].

(азональными) образованиями — поймами рек, дельтой р. Селенги, болотами, заболоченными землями, засоленными массивами и др., разнообразие почв представлено почвами всех 4-х створов почвообразования: 1 — первичного, 2 — постлитогенного, 3 — синлитогенного, 4 — органогенного.

В связи с глобальным потеплением климата мировое сообщество обеспокоено проблемой снижения выбросов парниковых газов и ставит перед собой задачи углеродной нейтральности с обозначением дат ее достижения. Поэтому для решения задач, связанных с секвестрацией углерода, определением ресурсного потенциала требуется привлечение различных материалов исследований запасов углерода в почвенном и растительном покрове. Результаты исследований запасов углерода в почвах приведены в табл. 1.

Секвестрация углерода включает трехэтапный процесс: 1 — улавливание или защита двуокси углерода от промышленных процессов или электростанций, 2 — транспорт уловленного и сжатого углекислого газа, 3 — хранение оксида углерода в глубоких подземных горных породах.

Поскольку отрасли промышленности по всему миру ежегодно выбрасывают 10 гигатонн (один миллиард метрических т) парниковых газов (ПГ), потребность в связывании углерода остра.

Приводим несколько типов связывания углерода, которые помогут справиться с глобальным потеплением и изменением климата в индивидуальном порядке: секвестрация в лесах, на пастбищах, в водно-болотных угодьях, в водах океана, а также прямой захват из воздуха (DAC) и хранение в почвах, горных породах, отрабатывают также аспекты промышленного улавливания углерода.

Предотвращение дальнейшего нагревания земной атмосферы требует от человечества огромных коллективных усилий. Каждое потенциальное решение

важно, если хотим остановить беспрецедентное изменение климата, от прекращения нашей зависимости от топлива, выделяющего углерод, до установления цели нулевого уровня выбросов к 2050 г.

Секвестрация в лесах. Поглощение углерода в ДФО выше всего в лесах Забайкалья [25]. В пятерку лидеров вошли Якутия, Бурятия, Приморье и Камчатский край. Как сообщили EastRussia в пресс-службе Рослесинфорга, в Забайкальском крае поглощение углерода составляет 49.3 млн т, в Якутии — 47.3, в Бурятии объемы поглощения составляют 25.7, в Приморском крае — 12.2, на Камчатке — 12.1 млн т. По данным дальневосточного филиала Рослесинфорга «Дальлеспроект», часто встречающиеся породы в этих регионах — сосна, ель и лиственница, средний возраст которых составляет ≈ 90 лет. Именно эти породы усиленно поглощают углерод. По общим накопленным запасам углерода на Дальнем Востоке лидерами стали Якутия — 2.9, Хабаровский край — 2.3, Забайкалье — 1.3 млрд т.

Леса и редколесья признаны одной из лучших форм естественного связывания углерода. В среднем леса хранят в 2 раза больше углерода, чем они выделяют, в то время как по оценкам $\approx 25\%$ выбросов углерода поглощаются богатыми лесами ландшафтами, такими как пастбища, поля, прерии, кустарники и т.п.

Агроэкосистемы разрушают и истощают запасы органического углерода в почве. Кроме того, через болота, торф углерод может улавливаться и храниться в виде карбонатов. Эти карбонаты накапливаются тысячи лет в виде CO_2 , смешиваются с другими минеральными элементами, такими как минералы кальция или магния, образуя «калише» в пустыне и засушливой почве. В конце концов, этот углерод, хранящийся в карбонатах, высвобождается из земли, но ненадолго — в некоторых случаях через более

Таблица 1. Запасы углерода в слоях 0–50 и 0–100 см почв, кг/м²

Тип почв	<i>n</i>	0–50 см	0–100 см	Авторы
Каштановые	26	5.59 ± 0.24	7.25 ± 0.72	Уфимцева, 1960; Ногина, 1964; Ишигинов 1972; Цыбжитов и др., 1999; Чимитдоржиева, 2016; Чимитдоржиева, 2017
Буроземы	14	14.9 ± 1.1	19.3 ± 1.9	Цыбжитов, Убугунова, 1992; Балсанова и др., 2014; Сымпилова, Бадмаев, 2019; Gininova et al., 2021
Серая лесная	16	10.0 ± 2.0	11.7 ± 1.2	Ногина, 1964; Ишигинов, 1972
Темно-серая лесная	4	10.6 ± 2.1	12.5 ± 1.3	Ногина, 1964; Ишигинов, 1972
Серая лесная неоподзоленная	7	5.76 ± 0.25	8.44 ± 0.16	Ишигинов, 1972
Темно-серая лесная неоподзоленная	9	11.5 ± 2.3	17.5 ± 1.8	Ишигинов, 1972
Подзолы	13	13.6 ± 2.1	15.4 ± 2.1	Цыбжитов, Убугунова, 1992
Дерново-подзолистая	7	6.78 ± 1.36	8.05 ± 0.81	Цыбжитов, Убугунова, 1992; Балсанова и др., 2014

чем 70 000 лет, в то время как органическое вещество почвы хранит углерод в течение нескольких лет. Ученые работают над тем, чтобы ускорить процесс карбонатообразования, добавляя в почву мелкоизмельченные силикаты, чтобы хранить углерод в течение более длительных периодов времени.

Секвестрация на пастбищах. В то время как леса обычно считаются важными поглотителями углерода, луга также могут поглощать больше углерода под землей, поэтому углерод остается фиксированным в корнях и почве, а не в листьях и древесной биомассе. Луга и пастбища являются более надежными местами хранения углерода, чем леса, из-за частых лесных пожаров и обезлесения, затрагивающих леса. Однако леса способны удерживать больше углерода, чем пастбища, но в нестабильных условиях из-за изменения климата пастбища могут быть более устойчивыми.

Секвестрация водно-болотных угодий. Как и все растения, растения водно-болотных угодий поглощают углерод из воздуха в виде углекислого газа и хранят этот углерод в биомассе. Они известны как важные природные активы, способные поглощать атмосферный углерод и ограничивать последующую потерю углерода для облегчения долгосрочного хранения. Ими можно намеренно управлять, чтобы обеспечить естественное решение для смягчения последствий изменения климата, а также помочь компенсировать прямые потери водно-болотных угодий в результате различных изменений в землепользовании и естественных факторов. Кроме того, водно-болотные угодья, такие как торфяные болота, улавливают углерод с более высокой плотностью поглощения углерода на 1 га, чем леса или сельскохозяйственные угодья.

Ситуация на территории Республики Бурятия. Ориентировочно нами рассчитана секвестрация

углерода лесами без учета кустарниковой и травянистой растительности, а также корневых масс, ветоши, опада и т.д.

Леса республики занимают 29140.3 тыс. га, что составляет 83% от всей ее территории. [26]. Лесистость варьирует от 10% в лесостепи до 95% в горной тайге. Все леса относятся к категории горных, с преобладанием хвойных пород. Лесопокрытые площади лесного фонда в РБ составляют: хвойный лес – 3035.4, лиственница – 9843.6, кедр – 1858.2, пихта – 277.5, ель – 157.3 тыс. га. Средний возраст насаждений составляет: хвойных лесов – 123 года, мягколиственных – 43 года. Используя данные поглотительной способности CO₂ отдельными видами деревьев, а также лесопокрытые площади из Гослесфонда Бурятии, рассчитаны ориентировочные величины секвестрации CO₂ (т/год/га) (табл. 2). При общей площади земель, покрытых лесной растительностью, равной 22 332 тыс. га, на площадь под березой, осиной и кустарниками приходится 7 160 т CO₂/год/га.

Мягколиственные леса, состоящие из березы и осины, по данным Рослесинфорга, являются интенсивными поглотителями CO₂: соответственно, до 3.6 и 3.3 т CO₂/год/га. При их учете вместе с кустарниками, травяным покровом может значительно вырасти количество поглощенного CO₂. Не учтены леса с зарастающих земель, лесных полос, парковых зон, водно-болотных угодий, населенных пунктов и т.п.

Улавливание углерода из вод. Водная среда и большие водоемы также являются отличными поглотителями CO₂. Известно, что воды океанов поглощают из атмосферы ≈25% углекислого газа, ежегодно выделяемого в результате деятельности человека. Данными определения поглощенных ПГ из водных систем коллектив не владеет, однако надо полагать, что в холодных и богатых питательными веществами

Таблица 2. Секвестрация С-СО₂ лесной растительностью Бурятии, тыс. т/га/год

Вид деревьев	Площадь, га	Запас, млн м ³	Секвестрация СО ₂	
			т/га/год	тыс т/га/год со всей площади
Сосна	3035.4	367.3	2.4	7285.0
Лиственница	9843.6	987.8	1.8	17718.5
Кедр	1858. 2	304.6	1.8	3344.8
	277.5	47.4	2.0	555.0
Ель	157.3	19.4	2.0	314.6
Береза с осиной	7160.0	123.5	3.5	24702.0
Всего	22332.0	1850.0	13.5	53919.8

небольших водоемах (озерах, болотах, временных застойных водах) может депонироваться значительное количество углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из имеющихся данных литературы о депонировании углерода в почвенном покрове и лесной растительности в Республике Бурятия следует, что значительное количество углерода накапливается как в почвенном покрове исследованных районов, так и в лесах различных пород, что, естественно, способствует экологической устойчивости региона. Однако нужно отметить, что данные ориентировочные, т.к. в лесах не учтены кустарники, лесное разнотравье с присущими им мощными корневыми массами. А также вне учета остались опад в виде ветоши, отпада веток, сучьев и т.п. Не учтены леса населенных пунктов, парков, почвозащитные, противодефляционные, эрозионные лесные полосы и места отдыха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moinet G.Y.K., Amundson R., Galdos M.V., Grace P.R., Haefele S.M., Hijbeek, R., Van Groenigen J.W., Van Groenigen K.J., Powlson D.S. Climate change mitigation through soil carbon sequestration in working lands: A reality check // Glob. Change Biol. 2024. V.30. P. e17010. <https://doi.org/10.1111/gcb.17010>

2. Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773–786. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070024>

3. Кудеяров В.Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Усп. совр. биол. 2022. Т. 142. № 6. С. 545–559. <https://doi.org/10.31857/S0042132422060047>

4. Nazir M.J., Li G., Nazir M.M., Zulfiqar F., Siddique K.H.M., Iqbal B., Du D. Harnessing soil carbon

sequestration to address climate change challenges in agriculture // Soil Till. Res. 2024. V. 237. P. 105959. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105959>

5. Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Byrne K.A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? // Geoderma. 2007. V. 137. № 3–4. P. 253–268.

6. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный баланс лесов России // Сибир. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.

7. Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.W., Lucht W., Rahmstorf S., Schellnhuber H.J. Tipping elements in the earth climate system // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105(6). P. 1786–1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>

8. Чимитдоржиева Г.Д. Органическое вещество холодных почв. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2016. 387 с.

9. Чимитдоржиева Э.О. Запасы углерода в постагрогенных сухостепных почвах Западного Забайкалья // Арид. экосист. 2017. Т. 23. № 3(72). С. 59–65.

10. Уфимцева К.А. Степные и лесостепные почвы Бурятской АССР. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 151 с.

11. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 312 с.

12. Ишигенов И.А. Агрохимическая характеристика почв Бурятии. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1972. 210 с.

13. Цыбжитов Ц.Х., Убугунова В.И. Генезис и география таежных почв бассейна озера Байкал. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1992. 237 с.

14. Цыбжитов Ц.Х., Цыбикдоржиев Ц.Ц., Цыбжитов А.Ц. Почвы бассейна озера Байкал. Т. 1. Генезис, география и классификация каштановых почв. Новосибирск: Наука, СО РАН, 1999. 128 с.

15. Балсанова Л.Д., Гынинова А.Б., Цыбикдоржиев Ц.Ц., Гочиков Б-М.Н., Шахматова Е.Ю. Генетические особенности почв бассейна озера Котокельское (Восточное Прибайкалье) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 1–9.

16. Сымпилова Д.П., Бадмаев Н.Б. Почвообразование в ландшафтах тайги и степи Селенгинского среднегорья (Западное Забайкалье) // Почвоведение. 2019. № 2. С. 140–151.
17. Gyninova A.B., Badmaev N.B., Tsybenov Yu.B., Gonchikov B.N., Mangataev A.Ts., Kulikov A.I., Sympilova D.P. Soils of the Darkhitui catena in the southern Vitim Plateau and their micromorphological features // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2021. № 862. P. 012068.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012068>
18. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1975. 488 с.
19. Куликов А.И., Куликов М.А., Смирнова И.И. О глубине протаивания почв при изменениях климата // Вестн. Бурят. ГСХА им. В.Р. Филиппова. 2009. № 1(14). С. 121–126.
20. Инполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Пространственные и временные масштабы наблюдаемого потепления в Сибири // Докл. РАН. 2007. Т. 412. № 6. С. 814–817.
21. Поднебесных Н.В., Инполитов И.И. Крупномасштабная атмосферная циркуляция над Сибирью в конце XX – начале XXI веков: сравнение данных, полученных на основе приземных синоптических карт и реанализа // Фундамент. и прикл. климатолог. 2019. Т. 2. С. 34–44.
22. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф. Особенности температурного режима у поверхности земного шара в 2020 году // Фундамент. и прикл. климатолог. 2021. Т. 7. № 2. С. 26–56.
23. Смирнова И.И., Куликов А.И., Куликов М.А. Термическое состояние деятельного слоя в криолитозоне байкальского региона в контексте глобального потепления // Вестн. ВСГУТУ. 2012. № 4(39). С. 227–233.
24. Убугунов Л.Л., Куликов А.И. Глобальное потепление и его некоторые экосистемные следствия // Вестн. Бурят. НЦ СО РАН. 2013. № 4(12). С. 243–258.
25. <https://www.eastrussia.ru/news/pogloshchenie-ugleroda-v-dfo-vyshe-vsego-v-lesakh-zabaykalya/>
26. <https://roslesinforg.ru/news>

Carbon Sequestration by Ecosystems of Cold Territories of Transbaikalia

G. D. Chimitdorzhieva^{a, #}, E. O. Chimitdorzhieva^a, E. Yu. Milkheev^a, Yu. B. Tsybenov^a,
Ts. D.-Ts. Korsunova^a

^a*Institute of General and Experimental Biology SB RAS,
ul. Sakhyanova 6, Ulan-Ude 670047, Russia*
[#]*E-mail: galdorgj@gmail.com*

In the Baikal region, the continuous cryolithozone occupies $\approx 15\%$, the transitional intermittent zone with Talikov islands – 30, the transitional island zone – 45, taliki with a continuous area – 10%. Attention is drawn to the dominance of the transition band, which is characterized by unstable thermodynamic equilibrium. High-temperature permafrost is easily degraded by technoconversion of external heat exchange conditions: removal of ground covers (organogenic layer and snow cover), deforestation, plowing, fires, etc. These circumstances increase the natural hazards and risks in the region. In this regard, the territory of Transbaikalia is of great interest, being in the permafrost zone and near its southern border, on the one hand, and with increased warming rates in recent decades, on the other. The continentality and severity of the climate in Buryatia are much more pronounced than in neighboring single-latitude regions of Russia. The southern boundary of the cryolithozone stretches almost throughout the entire territory of the republic, within which a whole range of landscapes is distinguished – from automorphic forest ecosystems to widespread, due to the high proportion of lakes and swamps, hydromorphic landscapes formed under the active influence of permafrost, as well as dry-steppe. The implementation of the Kyoto Protocol on Stabilization of Greenhouse Gas (GHG) Concentrations in the Atmosphere requires a quantitative assessment of spatiotemporal changes in terrestrial carbon sinks. Identifying areas with high potential and strategies for managing sequestration of atmospheric carbon dioxide by ecosystems is an important task and there is great uncertainty about the actual estimates of carbon reservoirs and how they may be affected by climate change. In the current conditions, we consider the study of the patterns of functioning of the soil and plant carbon reservoir in Transbaikalia to be timely and relevant.

Keywords: cold ecosystems, carbon sequestration, soil, forest, Transbaikalia.

УДК 631.46:633.491(470.57)

ОЦЕНКА ФЕРМЕНТАТИВНОЙ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЫ РИЗОСФЕРЫ *Solanum tuberosum* L. ПОД ВЛИЯНИЕМ ОБРАБОТКИ КЛУБНЕЙ ЭНДОФИТНЫМИ БАКТЕРИЯМИ *Bacillus subtilis* В УСЛОВИЯХ ПРЕДУРАЛЬЯ¹

© 2024 г. С. Р. Гарипова^{1,2,*}, Л. И. Пусенкова¹, Л. В. Сидорова³, В. А. Валиева¹,
А. В. Чистоедова¹, В. Д. Матюнина¹, А. С. Григориади²

¹Баширский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН

450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 19, Россия

²Уфимский университет науки и технологий

450076 Уфа, ул. З. Валиди, 32, Россия

³Институт биологии — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН

450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

*E-mail: garipovasvetlana@gmail.com

Исследовали влияние инокуляции эндифитными бактериями *B. subtilis* 26Д и 10-4 на урожайность картофеля, его товарное качество, распространенность болезней клубней, численность бактерий в разных органах эндиферы растений, ферментативную активность почвы ризосферы инокулированных и неинокулированных (контроль) растений и численность разных трофических групп микроорганизмов в динамике. Обработка штаммом *B. subtilis* 10-4 привела к увеличению общего числа клубней с куста на 35.4, их массы — на 16.5%, снижению числа больных клубней с признаками парши и сухой гнили. Обработка штаммом *B. subtilis* 26Д способствовала защите от сухой гнили при сохранении продуктивности на уровне контроля без инокуляции. Численность эндифитных бактерий в разных органах растения менялась от 10⁶ до 8×10⁷ КОЕ/г сырой массы. Большая, чем в контроле и варианте инокуляции штаммом 26Д, численность эндифитов была зафиксирована в варианте обработки штаммом 10-4 в фазе бутонизации в корнях, а в фазе цветения — в стеблях и листьях. По соотношению активности полифенолоксидазы/пероксидазы в ризосфере инокулированных вариантов коэффициент гумусонакопления увеличился с 0.51 в контроле без инокуляции до 0.56 и 0.57 в вариантах инокуляции эндифитными бактериями. Коэффициент интенсивности гидролиза органических соединений почвы (соотношение активности инвертазы/каталазы) был в 2 раза меньше в варианте инокуляции штаммом 10-4. Высокая и пролонгированная активность каталазы в ризосфере растений, инокулированных штаммом 10-4, указывала на положительное влияние эндифитов не только на сохранение почвенного плодородия, но и на эффективность биоконтроля фитопатогенов. Различия в микробиоме ризосферы инокулированных растений были связаны с увеличением численности микромицетов и высоким коэффициентом микробной минерализации в варианте обработки штаммом 26Д и преобладанием численности олигонитрофилов при обработке штаммом 10-4.

Ключевые слова: почвенные ферменты, трофические группы микроорганизмов, картофель, инокуляция, эндифитные бактерии, *Bacillus subtilis*.

DOI: 10.31857/S0002188124120085, **EDN:** VVPXEL

ВВЕДЕНИЕ

Применение микробных препаратов для предпосевной инокуляции семян на основе штаммов ассоциативных бактерий может оказывать положительное

влияние на рост, развитие и защитные свойства растений [1], в том числе за счет интенсификации биохимических процессов в системе почва—растение [2]. Особенность эндифитных бактерий в том, что, занимая нишу внутри растения, они меньше конкурируют с аборигенной микробиотой и оказывают непосредственное действие на метаболические процессы растительного организма [3]. Применение

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00262, <https://rscf.ru/project/23-26-00262/>.

эндофитных бактерий в определенных сорт—штаммовых комбинациях может положительно влиять на рост и развитие растений, способствовать повышению продуктивности и качества урожая сельскохозяйственных культур [4, 5].

Картофель является стратегически важной культурой в обеспечении продовольственной безопасности в мире [6]. По сравнению с другими культурами производство картофеля требует интенсивной обработки почвы, что приводит к минимальному количеству растительных остатков и быстрой потере питательных веществ почвы [7]. Благодаря инокуляции картофеля эндофитными бактериями можно повысить урожай картофеля и качество клубней, снизить заболеваемость клубней при хранении [8–10]. При этом влияние инокуляции растений эндофитными бактериями на биохимические и микробиологические процессы, происходящие в ризосфере растений, пока слабо изучено [11, 12]. Вместе с тем рассмотрение растительно-микробной системы в совокупности с микробиомом ризосферы может выявить новые механизмы управления компонентами агроэкосистем [13].

Удобным диагностическим показателем экологического состояния почвы, отражающим не только ее биологические свойства, но и их изменения под влиянием агроэкологических факторов, является ферментативная активность почвы. Этот показатель биологической активности почв относительно стабилен, характеризуется малой ошибкой, простотой определения, высокой чувствительностью к внешним воздействиям [14]. Процессы, определяющие ферментативную активность почв, находятся в тесной взаимосвязи с микробиотой почвы, которая подается или стимулируется в результате применения препаратов с разным принципом действия [15].

Цель работы — изучение влияния предпосадочной инокуляции клубней картофеля препаратами эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* на продуктивность и устойчивость клубней к болезням, численность эндофитных бактерий в разных тканях растений, а также на ферментативную активность почв и численность трофических групп микроорганизмов в ризосфере растений *Solanum tuberosum* L. в полевых условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Условия проведения полевых опытов. Опыты проводили в условиях лесостепной зоны Республики Башкортостан (Чишминский р-н). Исследование проводили на растениях картофеля (*Solanum tuberosum* L.) раннего сорта Башкирский. Почва опытного участка — чернозем выщелоченный тяжелосуглинистого гранулометрического состава. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы: рН_{KCl} 6.3, содержание гумуса (по Тюрину) — 7.4%, подвижных форм фосфора и калия — 12.7 и 14.8 мг/100 г почвы

соответственно. Условия вегетационного периода 2023 г. были неблагоприятными как для закладки, так и формирования урожая картофеля. Накопление сумм положительных и эффективных температур происходило в опережающем режиме, распределение осадков было неравномерным. Период интенсивного клубнеобразования характеризовался дефицитом влаги на фоне аномально высоких температур (максимальная температура на поверхности почвы достигала 30–50 °С), что способствовало раннему (10 августа) увяданию ботвы. ГТК вегетационного периода составил 0.56–0.61, что соответствует засушливым условиям.

Инокуляция. Для инокуляции клубней картофеля использовали препараты эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* 10–4 и 26Д (эталон). Препарат представлял собой суспензии спор бактерий, выросших на жидкой среде *LB*₃ разбавленный до получения заданного титра $1 \cdot 10^8$ кл/мл. Численность клеток бактерий подсчитывали в камере Горяева и верифицировали по стандарту мутности. Клубни картофеля замачивали в биопрепарате в течение 30 мин, затем их подсушивали на воздухе и высаживали на следующий день.

Закладка полевого опыта. Посадка клубней картофеля была проведена 15 мая в предварительно нарезанные гребни. Делянки 7035 м размещали рандомизированно в четырехкратной повторности. Технология подготовки почвы: вспашка на глубину 22–24 см, культивация почвы на 15–17 см, нарезка гребней, внесение азофоски 16 : 16 : 16 в дозе 100 кг/га. Уход за посадками состоял из одной дождевой, одной повсходовой междурядных обработок и окучивания перед смыканием рядков.

Отбор почвенных образцов. Отбор образцов почвы осуществляли трижды: в начале вегетации, в фазе бутонизации и в фазе созревания. Образец почвы без растений представлял собой смешанную пробу из 4-х прикопок с пахотного слоя с глубины 20 см. Образцы ризосферной почвы получали путем 4-х смешанных проб почвы, непосредственно примыкающей к корням 4-х растений. Варианты полевого опыта включали: почву без растений в начале вегетации, ризосферу растений без обработки (контроль) и обработанных штаммами *Bacillus subtilis* 26Д и 10–4 в фазе бутонизации, а также в эти же варианты опыта в фазе созревания.

Определение численности трофических групп почвенных микроорганизмов. Численность бактериальных гидролитиков определяли на мясо-пептонном агаре (МПА), копиотрофов — на крахмало-аммиачном агаре (КАА), олиготрофов — на почвенном агаре (ПА), олигонитрофилов — на среде Эшби, микромицетов — на среде Чапека [16].

Определение ферментативной активности почв. Ферментативную активность почв определяли следующими методами: пероксидазы (ПО)

и полифенолоксидазы (ПФО) (мг 1,4-бензохинона/г почвы/30 мин при 30 °С) — методом Карягиной—Михайловской (1986), каталазы (мг 1,4-бензохинона/г почвы/30 мин при 30 °С) — газометрическим методом Галстяна (1978), анаэробной дегидрогеназы (мкг фармазана/г почвы) — методом Росса (1970), протеазы (мг глицина/г почвы/24 ч) — методом Галстяна (1978), фосфатазы (мг фенола/г почвы/3 ч) — методом Гоффмана (1967), инвертазы (мг глюкозы/г почвы/4ч) — методом Щербаковой (1983); уреазы (мг NH_3 /г почвы/3 ч) — колориметрическим методом с реактивом Несслера [17].

Определение численности эндофитных микроорганизмов в тканях растений. Со стебля, листа и корня растения брали навеску 0.5 г. Поверхностная стерилизация образца включала промывку образца мыльным раствором и водой, замачивание в 70%-ном спирте 1 мин, промывку стерильной водой, замачивание в 30%-ном растворе гипохлорита натрия 5 мин, 5-кратную промывку стерильной водой. Контроль чистоты поверхностной стерилизации проводили путем посева на питательную среду смыва с последней обработки. Образец растирали до однородного состояния, разводили водой, перемешивали в Vortex и высевали серию кратных разведений в чашки Петри со средой *PDA* (Himedia) и инкубировали в термостате при 36.5 °С. Учитывали все выросшие колонии через 24–48 ч.

Статистическую обработку полученных результатов проводили методом дисперсионного анализа. При математической обработке экспериментальных данных использовали статистические программы Microsoft Excel. На гистограммах показаны средние величины и их стандартные ошибки при $p < 0.95$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка штаммом *B. subtilis* 10-4 положительно повлияла на продуктивность и товарное качество клубней картофеля (табл. 1).

По сравнению с контролем без инокуляции количество клубней с куста увеличилось на 35.4, их

масса — на 16.6%, число больных клубней с признаками парши снизилось в 3.3 раза и с признаками сухой гнили — в 4.6 раза. Обработка штаммом *B. subtilis* 26Д способствовала снижению числа пораженных сухой гнилью клубней в 1.9 раза при сохранении продуктивности на уровне контроля.

Эти данные согласуются с литературными, в которых инокуляция картофеля сорта Удача препаратом БисолбиСан обеспечила увеличение урожайности на 20.5%, показав высокую биологическую эффективность против возбудителей грибковых болезней картофеля — фитофтороза, ризоктониоза [9].

Численность эндофитов в растениях контрольного варианта в фазе бутонизации была сосредоточена в большей степени в стеблях, а в фазе цветения — в стеблях и листьях (табл. 2).

По сравнению с контролем без инокуляции в варианте обработки штаммом 10-4 численность эндофитов в фазе бутонизации преобладала в корнях, в фазе цветения — в стеблях и листьях, превышая контроль в 1.6 и 2.5 раза соответственно. В варианте обработки штаммом 26Д по сравнению с другими вариантами опыта численность бактерий в фазе бутонизации была в 2 раза больше в листьях, тогда как в стеблях и корнях в обеих фазах развития численность эндофитов была меньше, чем в контроле. По-видимому, это обстоятельство снизило защитный эффект обработки штаммом 26Д по сравнению со штаммом 10-4.

Как показало исследование микробного биоразнообразия эндофитов в разных органах картофеля, возбудитель парши обнаруживали и в стеблях, и в корнях, и в клубнях как больных, так и здоровых растений, но присутствие некоторых специфических видов в микробиоме здоровых и отсутствие их в больных указывало на их определенную роль в контроле фитопатогена [18]. По данным литературы, численность эндофитных бактерий в тканях картофеля составляла от $<1 \times 10^3$ до 4.2×10^7 клеток/см³ в ткани стебля [19]. Это согласуется с уровнем численности клеток эндофитных бактерий в эксперименте авторов.

Таблица 1. Влияние предпосадочной обработки клубней препаратами эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* 26Д и 10-4 на продуктивность, товарное качество и распространенность болезней клубней

Вариант	Число клубней	Число товарных клубней	Масса клубней	Масса товарных клубней	Парша	Сухая гниль
	шт./куст		г/куст		%	
Контроль без обработки	4.8	1.8	253	163	34.7	18.5
26 Д	5.1	1.8	238	137	31.2	10.0
10-4	6.5	2.4	295	188	10.4	4.0
Стандартная ошибка	0.5	0.2	20	18	7.6	4.2

Таблица 2. Численность бактериальных клеток с бациллоподобным морфотипом колоний в разных органах картофеля в разных фазах вегетации

Вариант	Органы растения		
	листья	стебли	корни
	КОЕ × 10 ⁶ /г		
	Фаза бутонизации		
Контроль без инокуляции	1.2	8	1
26Д	2.4	0.5	1
10-4	1.3	1.5	8.8
	Фаза цветения		
	КОЕ × 10 ⁷ /г		КОЕ × 10 ⁶ /г
Контроль без инокуляции	2	5	6
26Д	3	2.6	1.4
10-4	5	8	4.7

Активность пероксидазы (ПО) и полифенолоксидазы (ПФО) в почве часто рассматривают в связи с процессами трансформации гумуса. Считается, что ПФО-активность является показателем процессов гумификации, а ПО-активность — показателем интенсивности процессов минерализации гумуса, соотношение активности ПФО/ПО используют как условный коэффициент накопления гумуса [20, 21].

Согласно данным активности ПО и ПФО (рис. 1а, б), в почве без растений перед посадкой условный коэффициент накопления гумуса был равен 0.6.

В ризосфере картофеля без инокуляции в фазе бутонизации—цветения этот коэффициент снизился до 0.51, при этом в вариантах инокуляции *B. subtilis* он сохранялся на уровне 0.56 (штамм 10-4)—0.57 (штамм 26Д). В период уборки коэффициенты гумусонакопления в разных вариантах опыта сравнялись: 0.56 (контроль) и 0.57 (при обработках). Однако процессы, происходившие в ризосфере в период активной вегетации инокулированных и неинокулированных растений, различались, что свидетельствовало об определенном модулирующем влиянии эндофитных бактерий на почвенный микробиом опосредованно через физиологический статус растения. Известно, что прижизненные выделения корней способны менять химические свойства почвы и состав микробного сообщества [22, 23].

С ризосферным эффектом тесно связана активность ферментов каталазы (Кат) и дегидрогеназы (ДГГ). Кат относится к одному из наиболее распространенных и устойчивых видов оксидоредуктаз, осуществляющих окисление продуктов гидролиза органических соединений с образованием предгумусовых веществ [24]. Дегидрогеназы, в отличие от других ферментов, не имеют внеклеточного компонента, они не адсорбируются и не накапливаются в почве, дегидрирование органического субстрата идет за счет дегидрогеназ живых микробных клеток.

Поэтому дегидрогеназная активность относится к наиболее объективным характеристикам как актуальной численности, так и метаболической активности микробных сообществ почвы [25].

В почве без растений исходный уровень каталазной (Кат) активности был выше, чем в ризосфере (рис. 1в), что согласовалось с более высоким коэффициентом гумусонакопления (ПФО/ПО = 0.6) в начальной точке измерений динамики процесса. В период бутонизации—цветения каталазная активность в почве под растениями уменьшалась (синхронно снижался и коэффициент гумусонакопления), но повышалась дегидрогеназная активность, обусловленная деятельностью ризосферной микробиоты в связи с притоком экзометаболитов растений.

В вариантах инокуляции в ризосфере растений были обнаружены отличия активности Кат и ДГГ. В фазе цветения картофеля в ризосфере обработанных штаммами 26Д и 10-4 активность Кат была в 1.3 и 2.0 раза больше, чем в ризосфере растений без инокуляции. Следует отметить, что это также согласовалось и более высоким коэффициентом гумусонакопления в ризосфере инокулированных вариантов (0.56—0.57), косвенно характеризовавшим баланс трансформации органического вещества почвы, близким к исходному. Повышенная (в 1.5 раза больше контроля) Кат-активность в ризосфере обработанных штаммом 10-4 растений сохранялась и в фазе созревания (рис. 1в). Если принять во внимание высокую сопротивляемость болезням растений, обработанных штаммом 10-4 (табл. 2), то можно с Кат-активностью связать не только влияние на процессы трансформации гумуса, но и подавление возбудителей болезней в ризосфере этих растений, т.к. именно активность этого фермента значительно отличалась в данном варианте опыта от других вариантов. Дегидрогеназная активность в ризосфере растений, обработанных штаммом 10-4, в обеих фазах вегетации была меньше, чем в контроле без инокуляции (рис. 1г), что также

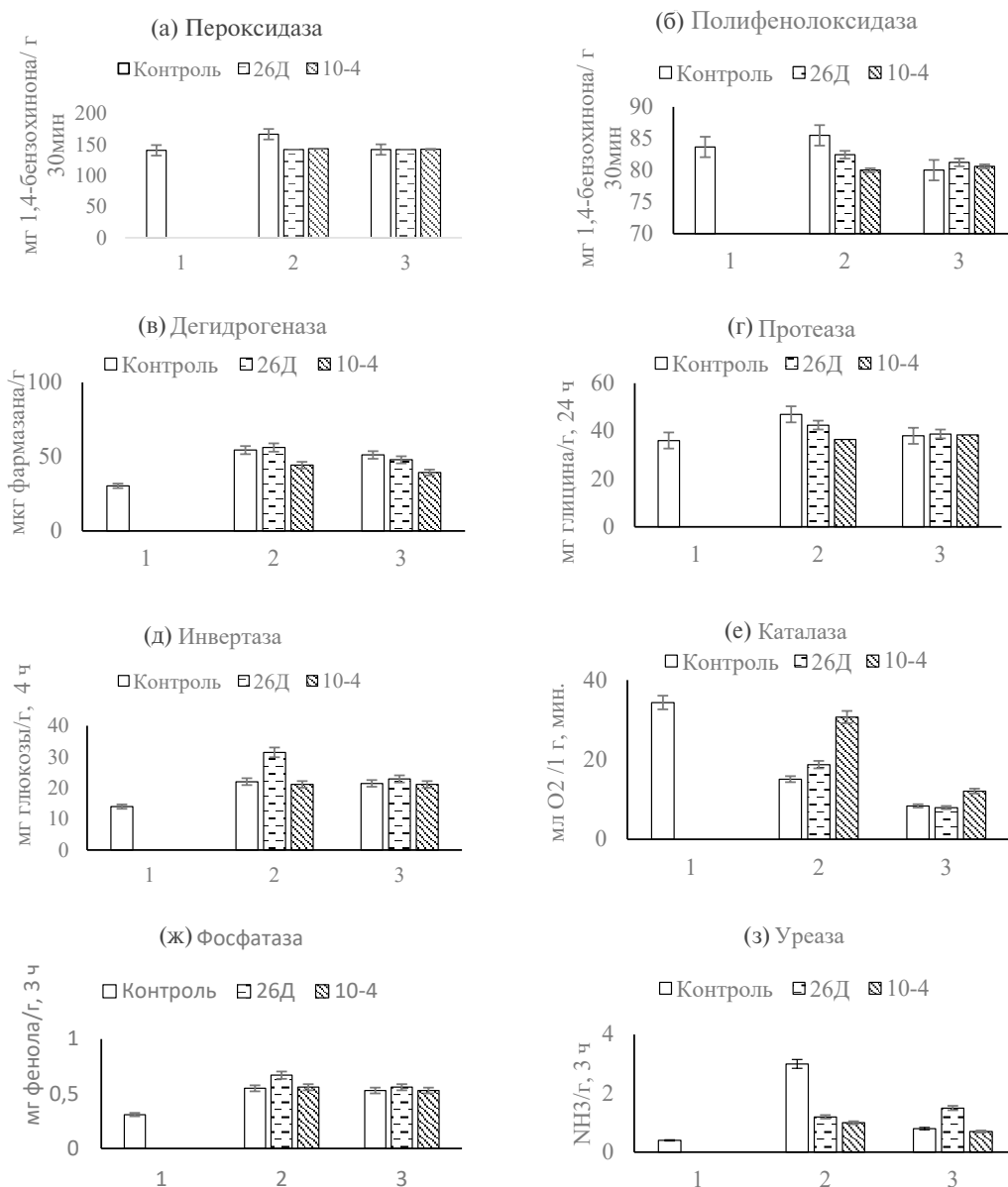


Рис. 1. Активность ферментов в ризосфере картофеля: 1 – начало вегетации, 2 – фаза бутонизации, 3 – фаза созревания урожая.

косвенно указывало на снижение метаболической активности микроорганизмов в ризосфере.

Влияние инокуляции высокоэффективным эндофитным штаммом *Bacillus endophyticus* IGPEB33 на повышение каталазной активности относительно контроля без инокуляции прослеживалось и в экспериментах с растениями имбиря (*Zingiber officinale*) [26]. Увеличение каталазной активности в ризосфере растений люпина, инокулированных эндофитным штаммом *B. subtilis*, отмечено в разных фазах развития растений. Дегидрогеназная активность в этом опыте варьировала в зависимости от периода развития растений люпина: в фазе всходов она была больше, чем

в ризосфере неинокулированных растений, в фазе цветения снижалась, а затем, после созревания вновь значительно повышалась относительно неинокулированного контроля [27].

Интересно, что в экспериментах с растениями картофеля при применении биопрепарата на основе экстракта зеленого чая, содержащего наночастицы железа, в фазах всходы и бутонизация–цветение активность Кат в ризосфере обработанных данным препаратом растений обратно коррелировала с конечной урожайностью, а активность ДГГ сильно варьировала, и существенных взаимосвязей

активности этого фермента с продуктивностью картофеля не было выявлено [28].

В наших экспериментах Кат-активность в ризосфере растений в фазах цветения и созревания прямо коррелировала с показателями продуктивности ($r = 0.57$ и 0.80 соответственно), а ДГГ-активность в тех же фазах — отрицательно ($r = -0.84$ и -0.56 соответственно). Возможно, различия в действии разных препаратов на Кат- и ДГГ-активность в ризосфере были связаны с тем, что эндофитные бактерии влияли на окислительно-восстановительный пул в ризосфере опосредованно через экссудацию определенных метаболитов корневой системой, а железосодержащие препараты могли оказывать прямое контактное действие на активность ферментов.

Протеазная активность мало зависела от вариантов опыта (рис. 1д). Исключение составило повышение активности этого фермента в ризосфере неинокулированных растений в фазе бутонизации. Синхронная активизация протеазной и пероксидазной активности в ризосфере неинокулированных растений (рис. 1а) могла быть связана с процессами трансформации органического вещества почвы в ризосфере этих растений.

При оценке различных диагностических критериев экологического состояния агрогенных почв было предложено использовать активность ДГГ, инвертазы (Инв), уреазы (Ур) и фосфатазы (Фсф). При этом с учетом чувствительности, точности и сложности определения наиболее чувствительным и информативным биохимическим показателем была признана активность Инв, которая прямо коррелировала с содержанием органического вещества ($r = 0.84$) [29]. Определение активности Инв позволяет одновременно судить как о способности к преобразованию углеводов растительных остатков, так и о мобилизующей способности микробиоценоза почвы. Инвертазная активность почвы в значительной степени определяет общий уровень биогенности почвы и ее обогащенность биомассой [30].

В эксперименте в ризосфере растений активность Ур, Инв и Фсф была больше, чем в почве без растений (рис. 1е–з). Вероятно, это было вызвано поступлением в ризосферу растительных экзометаболитов, содержащих аминокислоты, сахара и органические кислоты. Различия в уровне активности данных ферментов в ризосфере разных вариантов инокуляции, возможно, были связаны с модулирующим действием штаммов на состав разных фракций корневых выделений. В ризосфере неинокулированных растений Ур-активность была значительно больше, чем в ризосфере инокулированных, а активность Инв и Фсф повышалась в ризосфере обработанных штаммом 26Д растений относительно других вариантов опыта.

Повышение активности Ур, Инв и Фсф в почве было отмечено при инокуляции эндофитными

бактериями растений имбиря [26]. Кислая Фсф в фазе созревания усиливала свою активность в ризосфере растений люпина, обработанных эндофитным штаммом *B. subtilis* [27]. В экспериментах с применением железосодержащих биопрепаратов для растений картофеля выявлена отрицательная связь между активностью Инв в фазе отмирания ботвы и урожайностью картофеля [28]. В нашем эксперименте связь между активностью Инв в ризосфере в фазе бутонизации—цветения и конечным урожаем была отрицательной ($r = -0.95$), а в фазе созревания различия между вариантами уже не прослеживались (рис. 1ж). Это указывало на действие разных механизмов взаимодействия растения с ризосферным микробиомом при инокуляции эндофитными и иными биопрепаратами.

Высокое отношение активности Инв к активности Кат указывало на то, что в системе преобладали реакции гидролиза органических соединений и менее интенсивно шел синтез гумусовых веществ. В эксперименте отношение Инв : Кат было равно 1.5 и 1.6 в ризосфере растений без инокуляции и инокулированных штаммом 26Д, тогда как при инокуляции штаммом 10–4 это отношение снизилось в 2 раза и составило 0.7. Более низкий коэффициент Инв : Кат, как и более высокий коэффициент ПФО : ПО, могли указывать на то, что формирование более высокого урожая растений, инокулированных штаммом 10–4, происходило не столько с участием питательных веществ, образующихся при трансформации гумуса в ризосфере, сколько за счет процессов эффективного использования ресурсов микроорганизмов в эндосфере растений. Не исключено, что это может происходить в том числе посредством механизмов ризофагии — процесса, в котором микробы чередуются между корневой внутриклеточной эндофитной фазой и свободноживущей почвенной фазой; микробы усваивают питательные вещества почвы в свободноживущей фазе почвы, питательные вещества извлекаются посредством воздействия реактивного кислорода, вырабатываемого хозяином, во внутриклеточной эндофитной фазе [31]. Эта гипотеза поддерживается наблюдением высокой активности Кат в ризосфере наиболее эффективного варианта обработки.

Данные ферментативной активности почвы в разных вариантах опыта было интересно сопоставить с численностью разных трофических групп почвенных микроорганизмов (рис. 2).

Численность гидролитических бактерий в ризосфере была больше, чем в почве без растений в начальный период вегетации, при этом в фазе цветения преобладали микромицеты (рис. 2а), а в фазе созревания — сапротрофные бактерии (рис. 2б). В фазе бутонизация—цветение в ризосфере растений численность микромицетов преобладала в варианте инокуляции штаммом 26Д, не исключено,

что увеличение активности Инв и Фсф могло быть следствием активности грибов.

Численность копиотрофов в почве без растений была больше, чем в ризосфере растений в фазе бутонизации—цветения (рис. 2в). Это можно объяснить высокой аэрацией пахотного слоя свежеработанной почвы, которая активизировала минерализацию органического вещества почвы гидролитическими бактериями (рис. 2б). При этом очевидно, что высвобожденные в результате этой деятельности

микроорганизмов легкодоступные для копиотрофов субстраты в почве без растений не встречали конкуренции со стороны ассимиляции их растениями.

Важно отметить, что в ризосфере растений без инокуляции в фазе бутонизации—цветения численность копиотрофов была меньше, чем в почве без растений, а численность олиготрофов возросла (рис. 2в, г). Очевидно, что в этом варианте опыта наблюдали дефицит легкодоступных соединений, несмотря на повышение в ризосфере протеазной

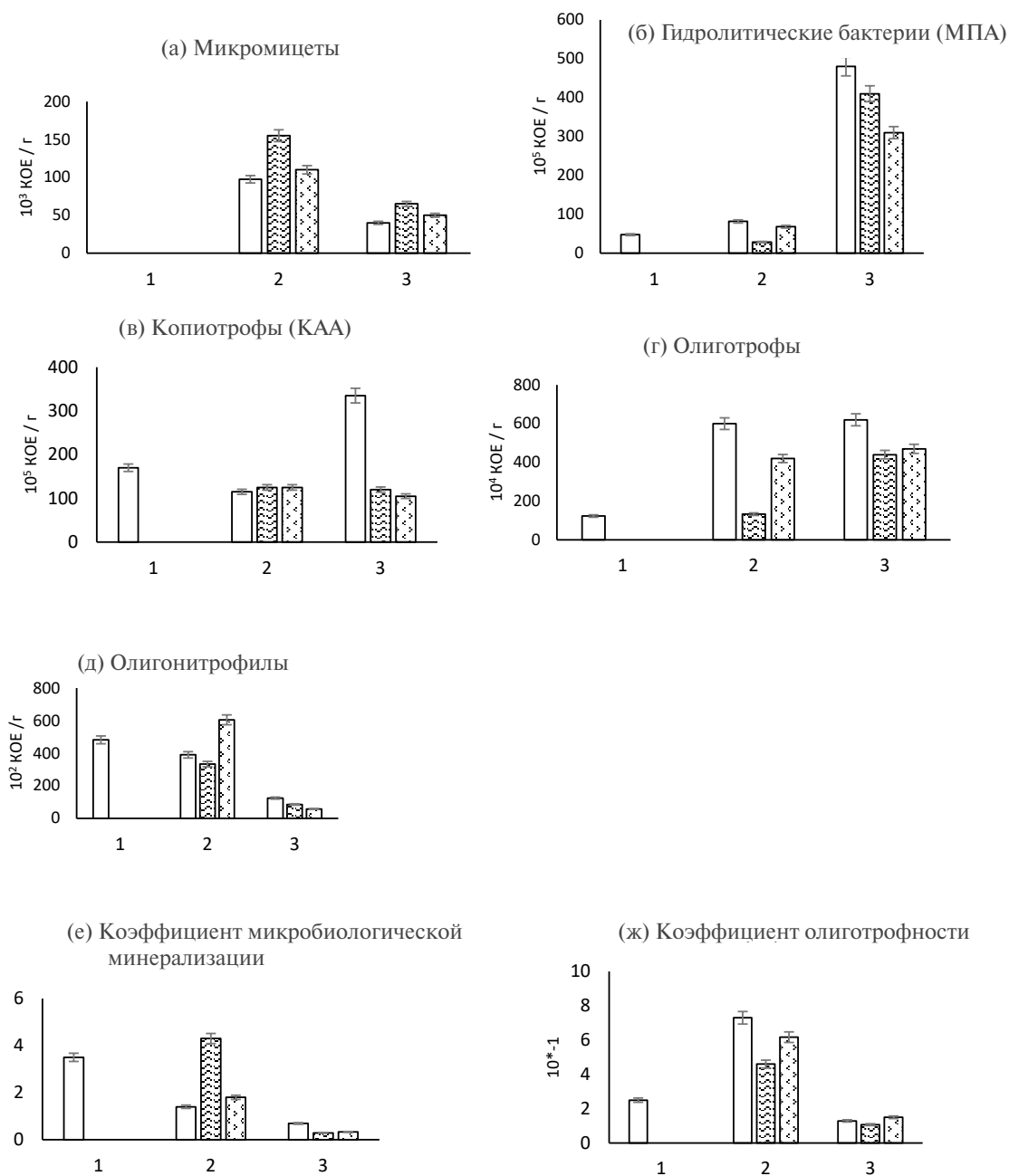


Рис. 2. Численность микроорганизмов в ризосфере картофеля в начале вегетации (1), в фазе бутонизации (2) и в фазе созревании урожая (3): (а) —микровицеты, (б) — гидролитики, (в) — копиотрофы, (г) — олиготрофы, (д) — олигонитрофилы, (е) — коэффициент микробиологической минерализации, (ж) — коэффициент олиготрофности.

и особенно уреазной активности. Предположили, что это происходило за счет активного поглощения продуктов минерализации органических веществ грибами и корнями растений. Возможно, наличие большой численности грибов обусловило связывание ими легкодоступных соединений углерода и азота, не оставляя субстратов для развития копийотрофов. В фазе созревания, когда метаболическая активность корневой системы растений затормозилась (снизилась каталазная активность, рис. 1в) и соответственно уменьшилась конкуренция за продукты минерализации органического вещества, численность копийотрофов и численность гидролитических бактерий синхронно увеличились в 3 и 10 раз (рис. 2 в, г).

При сравнении численности трофических групп микроорганизмов в ризосфере инокулированных и неинокулированных растений в активный период развития выявлены штаммовые различия. Растения, обработанные штаммом 26Д, привлекали в ризосферу большую численность микромицетов, чем обработанные штаммом 10–4 и неинокулированные растения (рис. 2а). Согласно принципу конкурентного исключения, численность гидролитических бактерий в этом варианте опыта была меньше, чем в 2-х названных других (рис. 1б). Примечательно, что численность олиготрофов в варианте инокуляции штаммом 26Д была такой же низкой, как и в почве без растений, а в ризосфере контрольного варианта и варианта обработки штаммом 10–4 их численность увеличилась по отношению к таковой в почве без растений (рис. 1в). Можно предположить, что в ризосфере растений, инокулированных штаммом 26Д, существовал приток доступных питательных веществ. На это указывает более высокая активность инвертазы и фосфатазы в этом варианте опыта по сравнению с другими (рис. 1ж, з). Об интенсивности процессов разложения органических веществ в варианте инокуляции штаммом 26Д свидетельствовал и коэффициент микробной минерализации, который был на 23% больше, чем в свободной почве, и в 3 раза больше, чем в ризосфере растений без инокуляции и инокулированных штаммом 10–4 (рис. 2е). Учитывая повышенный уровень активности Инв и Фсф и пониженный уровень численности олигонитрофилов в варианте инокуляции штаммом 26Д, приходим к предположению, что источником легкодоступных соединений в ризосфере этого варианта опыта были скорее корневые выделения, а не трансформация гумуса.

В отличие от этого варианта опыта, в ризосфере растений без инокуляции была высокая вероятность использования микроорганизмами именно органического вещества почвы, о чем упоминалось выше при анализе условного коэффициента гумусонакопления (ПФО : ПО), повышенной активности протеазы и особенно уреазы (рис. 1д, е), а также более высокой численности олиготрофных бактерий (рис. 1).

Что касается варианта инокуляции штаммом 10–4, то видим возрастание численности олигонитрофилов в ризосфере, отсюда полагаем, что эти растения извлекали азотсодержащие питательные вещества не из гумуса, т.к. коэффициент гумусонакопления был больше, чем в ризосфере небактеризованных растений, а за счет увеличения на 56% численности азотфиксаторов по сравнению с небактеризованными растениями (рис. 2д).

Сопоставляя данные биологической активности почвы в ризосфере инокулированных растений картофеля по сравнению с неинокулированными и по сравнению с почвой без растений до начала вегетации, можно сделать вывод, что формирование более высокой продуктивности клубней картофеля было связано не только с метаболической активностью внесенных с инокуломом эндофитных бактерий, но и с процессами, происходящими в почвенном микробиоме. Растения без инокуляции для пополнения доступных запасов питательных веществ задействовали ресурсы органического вещества почвы, а растения, инокулированные эндофитами, повышали коэффициент гумусонакопления. При этом штаммовые различия при инокуляции проявлялись в том, что растения, инокулированные штаммом 26Д, усиливали ассоциативные или симбиотические связи с микромицетами, повышая уровень инвертазной и фосфатазной активности. Растения, инокулированные штаммом 10–4, влияли на почвенный микробиом усилением численности олигонитрофилов-азотфиксаторов. Высокая каталазная активность в ризосфере наиболее эффективного варианта опыта поддерживала интересную гипотезу ризофагии [31]. Дальнейшая проверка этой гипотезы с привлечением новых данных микробной и ферментативной активности почвы инокулированных эндофитами растений может дополнить наши представления о положительной роли этих бактерий не только на формирование продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных растений к болезням, но и о их вкладе в сохранение почвенного плодородия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh J., Yadav A.N. Natural bioactive products in sustainable agriculture // Springer Nat. 2020. P. 307. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-3024-1>
2. Hafez M., Rashad M., Popov A. The biological correction of agrophotosynthesis of soil plant productivity // J. Plant Nutr. 2020. V. 43. № 19. P. 2929–2980. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1799008>
3. Rani S., Kumar P., Dahiya P., Maheshwari R., Dang A.S., Suneja P. Endophytism: A Multidimensional approach to plant–prokaryotic microbe interaction // Front. Microbiol. 2022. № 13. P. 861235. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.861235>

4. Lastochkina O., Garshina D., Allagulova C., Pusenkova L., Garipova S., Maslennikova D., Fedorova K., Shpirnaya I., Ibragimov A., Koryakov I., Sakhapova A., Yuldasbaeva G., Dmitrieva A., Sobhani M., Aliniaei-fard S. Potential aspects of plant growth promoting bacteria to improve horticultural crop production // International J. Horticult. Sci. Technol. 2021. Т. 8. № 2. С. 103–122.
5. Веселова С.В., Сорокань А.В., Бурханова Г.Ф., Румянцев С.Д., Алексеев В.Ю., Черепанова Е.А., Максимов И.В. Бактерии рода *Bacillus* как перспективный источник для создания биопрепаратов от патогенов и вредителей сельскохозяйственных культур // Тр. КубанГАУ. 2022. № 97. С. 40–45.
6. Devaux A., Goffart J.-P., Petsakos A., Kromann P., Gatto M., Okello J., Suarez V., Hareau G. Global food security, contributions from sustainable potato agro-food systems // The Potato Crop / Eds. Campos H., Ortiz O. Cham: Springer, 2020.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_1
7. Hao J., Ashley K. Irreplaceable role of amendment-based strategies to enhance soil health and disease suppression in potato production // Microorganisms. 2021. V. 9. P. 1660.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9081660>
8. Пусенкова Л.И., Гарипова С.Р., Ласточкина О.В., Федорова К.А., Марданшин И.С. Влияние эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* на урожай, качество клубней и послеуборочные болезни картофеля // Агрохим. вестн. 2021. № 5. С. 73–79.
9. Гергиева Ф.Т., Газданова И.О., Дзедаев Х.Т., Моргоев Т.А., Бекмурзов Б.В. Применение биологических препаратов в производстве картофеля на почвах Северной Осетии // Аграрн. научн. журн. 2021. № 12. С. 4–8.
<http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i12pp4-8>
10. Карамова Н.С., Туама А.А., Сташевски З. Эндофитные микроорганизмы картофеля (*Solanum tuberosum* L.): разнообразие, функции и биотехнологический потенциал // Экол. генет. 2023. Т. 21. № 2. С. 123–135.
11. Пусенкова Л.И., Ильясова Е.Ю., Ласточкина О.В., Максимов И.В., Леонова С.А. Изменение видового состава микофлоры ризосферы и филлосферы сахарной свеклы под влиянием биопрепаратов на основе эндофитных бактерий и их метаболитов // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1205–1213.
12. Масленикова В.С., Цветкова В.П., Нерсисян С.М., Бедарева Е.В., Калмыкова Г.В., Дубовский И.М., Литвина Л.А. Влияние инокуляции клубней картофеля бактериями рода *Bacillus* на популяцию ризосферных микроорганизмов // Вестн. НГАУ. 2022. № 1(62). С. 46–55.
13. Petrushin I.S., Filinova N.V., Gutnik D.I. Potato microbiome: relationship with environmental factors and approaches for microbiome modulation // Inter. J. Mol. Sci. 2024. V. 25. P. 750.
<https://doi.org/10.3390/ijms25020750>
14. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биodeградация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3. С. 83–93.
15. Алексеева А.А., Фомина Н.В. Оценка воздействия фунгицидов на активность гидролитических почвенных ферментов // Вестн. КрасГАУ. 2017. № 3. С. 144–153.
16. Практикум по микробиологии / сост. А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук и др. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 608 с.
17. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
18. Shi W., Su G., Li M., Wang B., Lin R., Yang Y., Wei T., Zhou B., Gao Z. Distribution of bacterial endophytes in the non-lesion tissues of potato and their response to potato common scab // Front. Microbiol. 2021. № 12. P. 616013.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.616013>
19. Boer S.H., Copeman R.J. Endophytic bacterial flora in *solanum tuberosum* and its significance in bacterial ring rot diagnosis // Canad. J. Plant Sci. 1974. V. 54. № 1. P. 115–122.
<https://doi.org/10.4141/cjps74-019>
20. Битов Х.А., Бжеумыхов В.С. Влияние сидеральных культур на ферментативную активность почвы // Вестн. аграрн. науки. 2023. № 2(101). С. 6–11.
<https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.2.6>
21. Зинченко М.К. Система биологических показателей при оценке экологического состояния серой лесной почвы на примере стационарного опыта // Владимир. земледелец. 2022. № 1. С. 9–15.
<https://doi.org/10.24412/2225-2584-2022-1-9-15>
22. Ларикина Ю.С., Волобуева О.Г. Современные представления об эколого-физиологической роли корневых экссудатов растений (обзорная статья) // Зернобоб. и круп. культ. 2021. № 4(40). С. 93–101.
23. Lyu D., Smith D.L. The root signals in rhizospheric inter-organismal communications // Front. Plant Sci. 2022. № 13. P. 1064058.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1064058>
24. Зинченко М.К., Зинченко С.И. Ферментативная активность серой лесной почвы при различных приемах основной обработки // Достиж. науки и техн. АПК. 2021. Т. 35. № 4. С. 17–21.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10402>
25. Самусик Е.А., Головатый С.Е. Ферментативная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2022. № 1. С. 104–113.
26. Jabborova D., Davranov K., Jabbarov Z., Bhowmik S.N., Ercisli S., Danish S., Singh S., Desouky S.E., Elazazy A.M., Nasif O., Datta R. Hydrolysis of tetrafluoroborate and hexafluorophosphate counter ions

- in imidazolium-based ionic liquids // ACS Omega. 2022. № 7(39). P. 34779–34788.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02353>
27. Niewiadomska A., Sulewska H., Wolna-Maruwka A., Ratajczak K., Głuchowska K., Waraczewska Z., Budka A. An Assessment of the influence of co-inoculation with endophytic bacteria and *Rhizobia*, and the influence of PRP SOL and PRP EBV fertilisers on the microbial parameters of soil and nitrogenase activity in yellow lupine (*Lupinus luteus* L.) cultivation // Pol. J. Environ. Stud. 2018. V. 27. № 6. P. 2687–2702.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/78890>
 28. Любимова Н.А., Рабинович Г.Ю. Влияние био-препарата с наночастицами железа на активность почвенных ферментов и урожайность картофеля // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2023. Т. 24. № 3. С. 417–429.
 29. Романов В.Н., Заушишцена А.В., Кожевников Н.В. Применение показателей активности ферментов для оперативной диагностики экологического состояния агрогенных почв // Достиж. науки и техн. АПК. 2019. Т. 33. № 7. С. 44–47.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10711>
 30. Зинченко М.К., Автономова И.Н. Активность ферментов в почвенных разностях серой лесной почвы агроландшафтов // Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса. Суздаль–Иваново, 2022. С. 12–16.
 31. White J.F., Kingsley K.L., Verma S.K., Kowalski K.P. Rhizophagy cycle: An Oxidative process in plants for nutrient extraction from symbiotic microbes // Microorganisms. 2018. V. 6. № 3. P. 95.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms6030095>

Assessment of Enzymative and Microbiological Activity of Soil Rhizosphere *Solanum tuberosum* L. under the Influence of Treatment of Tubers with Endophyte Bacteria *Bacillus subtilis* in the Conditions of the Cis-Ural Region

S. R. Garipova^{a,b,#}, L. I. Pusenkova^a, L. V. Sidorova^c, V. A. Valieva^a, A. V. Chistoedova^a,
 V. D. Matyunina^a, A. S. Grigoriadi^b

^aBashkir Research Institute of Agriculture – Ufa Federal Research Center, RAS
 Research Center of the RAS,

ul. R. Zorge 19, Ufa 450059, Russia,

^bUfa University of Science and Technologies,
 ul. Z. Validi 32, Ufa 450076, Russia

^cInstitute of Biology – , Ufa Federal Research Center, RAS
 prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

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

The effect of inoculation by endophytic bacteria *Bacillus subtilis* 26D and 10-4 on potato yield, its commercial quality, the prevalence of tuber diseases, the number of bacteria in different organs of the plant endosphere, the enzymatic activity of the soil of the rhizosphere of inoculated and non-inoculated (control) plants and the number of different trophic groups of microorganisms in dynamics were studied. Treatment with the *B. subtilis* 10-4 strain led to an increase in the total number of tubers from the bush by 35.4, their weight by 16.5%, and a decrease in the number of diseased tubers with signs of scab and dry rot. Treatment with strain *B. subtilis* 26D contributed to protection against dry rot while maintaining productivity at the control level without inoculation. The number of endophytic bacteria in different organs of the plant varied from 10⁶ to 8×10⁷ CFU/g of crude mass. A larger number of endophytes than in the control and inoculation variant with strain 26D was recorded in the treatment variant with strain 10-4 in the budding phase in the roots, and in the flowering phase in the stems and leaves. According to the ratio of polyphenol oxidase/peroxidase activity in the rhizosphere of the inoculated variants, the humus accumulation coefficient increased from 0.51 in the control without inoculation to 0.56 and 0.57 in the inoculation variants with endophytic bacteria. The intensity coefficient of hydrolysis of organic soil compounds (invertase/catalase activity ratio) it was 2 times less in the variant of inoculation with strain 10-4. The high and prolonged catalase activity in the rhizosphere of plants inoculated with strain 10-4 indicated a positive effect of endophytes not only on the preservation of soil fertility, but also on the effectiveness of biocontrol of phytopathogens. Differences in the microbiome of the rhizosphere of inoculated plants were associated with an increase in the number of micromycetes and a high coefficient of microbial mineralization in the treatment variant with strain 26D and the predominance of the number of oligonitrophils in the treatment with strain 10-4.

Keywords: soil enzymes, trophic groups of microorganisms, potatoes, inoculation, endophytic bacteria, *Bacillus subtilis*.

ВЛИЯНИЕ БАКТЕРИЙ, МЕТАБОЛИЗИРУЮЩИХ АБСЦИЗОВУЮ КИСЛОТУ, НА РОСТ И СОДЕРЖАНИЕ АБК В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ И ПОЧВЕ ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ИХ ПОСАДКИ¹

© 2024 г. Е. В. Мартыненко¹, Л. Ю. Кузьмина¹, Э. Р. Гаффарова¹, А. С. Рябова¹,
Г. Р. Кудоярова¹, Л. Б. Высоцкая^{1,*}

¹Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 71, Россия

*E-mail: vysotskaya@anrb.ru

Изучили влияние метаболизирующих абсцизовую кислоту (АБК) бактериальных штаммов родов *Pseudomonas* и *Arthrobacter* на содержание гормона в побегах и корнях растений пшеницы, а также в песчаном субстрате при плотной посадке. Обнаружена способность бактерий уже через 10 сут после инокуляции, хотя и в разной степени, снижать содержание АБК в среде выращивания и в растениях. При этом для большинства изученных штаммов было характерным снижение в побегах и реже наблюдали уменьшение количества АБК в корнях. Обнаруженное одновременное существенное снижение гормона в побегах и в песчаном субстрате, проявившееся при воздействии штаммов *P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksborgensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, сопровождалось максимальным увеличением массы растений пшеницы по сравнению с неинокулированными растениями. Изученные бактерии в разной степени стимулировали накопление массы побега и корня, а также площади листьев, что, вероятно, могло быть связано с их различной способностью синтезировать другие гормоны, например ИУК, и/или воздействовать на гормональную систему самого растения. Обсуждается перспективность использования бактерий АБК-деструкторов для разработки сельскохозяйственных биопрепаратов, способных смягчать негативные последствия загущенного посева и повышать устойчивость к другим абиотическим факторам.

Ключевые слова: *Triticum durum*, плотность посадки, рост, абсцизовая кислота, рострегулирующие бактерии, АБК-деструкторы.

DOI: 10.31857/S0002188124120096, **EDN:** VURSCH

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение высокотехнологичных методов ведения сельского хозяйства включает рациональное использование пахотных земель. Оптимальная плотность посева растений — один из факторов получения стабильно высоких урожаев. Хотя суммарная урожайность всех растений в определенных пределах увеличивается при повышении плотности их посадки, урожайность отдельных растений снижается [1–4]. Это связано с конкуренцией растений за почвенные ресурсы, необходимые для эффективного использования световой энергии и формирования урожая при повышении плотности посева. Несколько текущих десятилетий в связи с конкуренцией активно изучали негативно влияющие на фотосинтез и урожай изменения морфогенетически-активного излучения,

характеризующегося изменением соотношения красного и дальнего красного света [5]. Несмотря на очевидную перспективность этого направления, особенно для зерновых культур, манипуляции с фитохромной системой оказались неэффективными и пока не дали практических результатов. В то же время накоплено немало сведений относительно роли фитогормонов в реакции растений на затенение [6]. И хотя в этой связи абсцизовой кислоте (АБК) уделялось немного внимания, и роль ее была неочевидной, получены сведения, что она участвует в реакции на световые сигналы [7–9].

В последнее время стало ясно, что растения проявляют реакции на присутствие соседей еще до нехватки питания и до затенения, связанные с водным обменом, прежде всего, с закрытием устьиц, и демонстрируют подавление роста. Эти ранние реакции предвещают будущую конкуренцию за основные ресурсы. Получены также сведения, что при увеличении

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-26-00104.

плотности посадки по меньшей мере у растений салата в побегах довольно быстро накапливается АБК [10], которая может влиять на апертуру устьиц и показатели фотосинтеза [11, 12]. К тому же известно, что растения через корни выделяют этот гормон во внешнюю среду, в результате чего высокие почвенные концентрации абсцизовой кислоты могут негативно влиять на сами растения [13]. Таким образом, в условиях конкуренции, когда растению постоянно необходимо интегрировать одновременно множество сигналов окружающей среды [6], роль АБК может быть одной из определяющих в проявлении ранних реакций на присутствие соседних растений. В этой связи метод регуляции содержания АБК в растениях путем применения недавно описанных бактерий, способных к деградации этого фитогормона [14], мог бы оказаться весьма перспективным для более мягкого прохождения стресса в умеренно загущенных посевах. Важно также контролировать содержание АБК в почве, которая в условиях более плотной посадки может выступать в качестве корневого сигнала, приводящего к ингибированию роста растений [11]. В настоящее время сведения о бактериях, способных метаболизировать АБК, весьма ограничены, буквально известно о нескольких деструкторах АБК, которые снижали содержание этого гормона в растениях и позитивно влияли на их рост [14–16]. Поиск новых штаммов и изучение механизмов их влияния на сельскохозяйственные культуры необходим для получения комплексных эффективных рострегулирующих препаратов, повышающих устойчивость и урожайность сельскохозяйственных культур в условиях умеренного биотического и абиотического стресса. Цель работы – изучение влияния предварительно отобранных бактериальных штаммов родов *Pseudomonas* и *Arthrobacter* [17], способных метаболизировать АБК, на рост растений пшеницы в условиях высокой плотности их посадки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служили растения твердой пшеницы *Triticum durum* Desf., сорта Башкирская 27. Эксперименты проводили на светоплощадке с освещенностью 450 мкмоль/м²/с ФАР, 14-часовым световым периодом, влажностью воздуха 30–50% ОСВ. Плотность посадки растений имитировали разным количеством растений в одном вегетационном сосуде с 0.7 кг стерильного песчаного субстрата, пропитанного питательным раствором Хогланда–Арнона (Х–А). Семена пшеницы после стерилизации смесью этанола с пероксидом водорода проращивали в стерильных чашках Петри. Двухсуточные проростки высаживали в вегетационные сосуды по 5, 10 и 20 шт. в один сосуд.

Растения в течение эксперимента поливали один раз в сутки, в качестве подкормки вносили равные

объемы питательного раствора Х–А, после чего в каждый горшок по весу добавляли воду, в зависимости от транспирационных потерь, до влажности субстрата 80% ПВ. При таком режиме полива влажность субстрата в горшках изменялась в пределах от 80 (после полива) до 50% (перед поливом) ПВ и не предполагала воздействия на растения водного дефицита.

Штаммы использованных для обработки микроорганизмов в основном из рода *Pseudomonas* (*P. plecoglossicida* 2.4-D (KY593189.1), описанные ранее [16, 18], *Pseudomonas* sp. IB TaE2 (PP316703), *P. frederiksbergensis* IB Ta10m (PP316701), *P. veronii* IB K11-1 (PP237770)) и *Arthrobacter* sp. ТаЖ-5 находятся в коллекции Уфимского института биологии УФИЦ РАН [17].

Инокуляцию растений бактериями проводили в день посадки проростков путем внесения в прикорневую зону суспензии отмытых бактериальных клеток до конечной концентрации 10⁸ КОЕ/г субстрата. Бактериальные суспензии получали, выращивая штаммы на средах Кинг Б – род *Pseudomonas* и мясо-пептонный бульон – *Arthrobacte*, как это описано ранее [17, 19].

Для определения содержания абсцизовой кислоты в растительных образцах использовали твердофазный иммуноферментный анализ (ТФИФА), который основан на применении специфичных антител к гормонам. Надежность этого метода обеспечивается не только специфичностью антител, но и оригинальным способом очистки АБК с помощью модифицированного метода экстракции, основанного на уменьшении объема экстрагента на каждом этапе экстракции и реэкстракции, позволяющего уменьшить уровень сопутствующих компонентов [20]. Достоверность ТФИФА гормонов подтверждена путем сопоставления его результатов с данными физико-химического анализа (сочетания хроматографии с масс-спектрометрией) [21, 22].

РЕЗУЛЬТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При выращивании проростков пшеницы в вегетационном сосуде через 13 сут максимально плотная посадка (20 растений/сосуд) приводила к заметному снижению массы одного растения по сравнению с растущими по 5 шт./сосуд (рис. 1).

Растения проявляли признаки недостатка питания, демонстрируя повышение соотношения масс корень/побег, снижение индекса азотного баланса растений (*NBI*), снижение содержания хлорофилла по сравнению с растениями с меньшим количеством в сосудах (по 5 и 10 растений) (рис. 2). *NBI* является показателем изменения соотношения С : N в листьях и может служить индикатором азотного статуса растений.

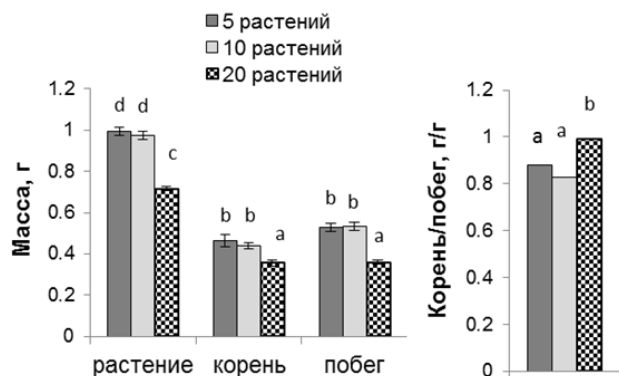


Рис. 1. Масса целого растения, побега и корня, соотношение масс корень/побег растений пшеницы через 13 сут после посадки 5-, 10- и 20-ти проростков в один вегетационный сосуд. Разными буквами обозначены достоверно отличающиеся величины ($n = 30$, $P \leq 0.05$, ANOVA, тест Дункана). То же на рис. 2–5.

Подобранные способ посадки и режим внесения почвенных ресурсов (вода, минеральные соли) позволили выявить зависимость реакции растений от их количества в сосуде и определить, что в течение первых 2-х нед проявлялись негативные последствия конкуренции при выращивании 20-ти растений/сосуд (при высокой плотности посадки), соответственно эта плотность и была выбрана для дальнейшего исследования.

Обработка растений пшеницы, растущих в плотном посеве (20 растений/сосуд) суспензией бактериальных клеток *P. plecoglossicida* 2.4-D, *Pseudomonas* sp. IB TaE2, *P. frederiksborgensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1 и *Arthrobacter* sp. ТаЖ-5, которые являются деструкторами АБК, в большинстве случаев приводила к снижению содержания гормона в песчаном субстрате, в котором выращивали растения, уменьшая концентрацию на 24–37% по сравнению с неинкулированным контролем (рис. 3).

При воздействии *Pseudomonas* sp. IB TaE2 снижение было недостоверным, хотя *in vitro* в минерально-солевой среде бактерия проявляла способность разрушать АБК. Численность ее увеличивалась в присутствии гормона как единственного источника углерода и энергии [17]. Внесение АБК-разрушающих бактерий в прикорневую зону приводило к снижению содержания этого гормона в побегах всех обработанных проростков пшеницы на 34–60%, и только один инокулят *P. veronii* IB K11-1 существенно снижал (на 44%) концентрацию АБК в корнях.

Как показано ранее, АБК можно обнаружить в прилегающей к корням почве разных сельскохозяйственных культур. Со временем содержание ее может меняться, что и было продемонстрировано с помощью радиоактивной метки [13]. Поскольку считается, что между содержанием гормонов в почве и в растении должно в конечном счете достигаться равновесие, обнаруженное нами снижение концентрации гормона в инокулированных растениях могло быть таким проявлением.

Также выявлены особенности влияния штаммов *P. frederiksborgensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, которые снижали содержание АБК в корнях, в дополнение к снижению ее содержания в побегах. При этом для всех инокулятов было характерно, хотя и в разной степени, увеличение массы побега по сравнению с неинкулированными растениями (рис. 4).

Максимальная масса была отмечена как у целого растения, так и у корня при обработке *P. frederiksborgensis* IB Ta10m и *P. veronii* IB K11-1. Соответственно, все изученные деструкторы АБК позитивно влияли на рост растений пшеницы при выбранной высокой плотности посадки.

Штамм *Pseudomonas* sp. IB TaE2 был малоэффективен для стимуляции прорастания семян и поддержания роста проростков пшеницы в чашках Петри [17]

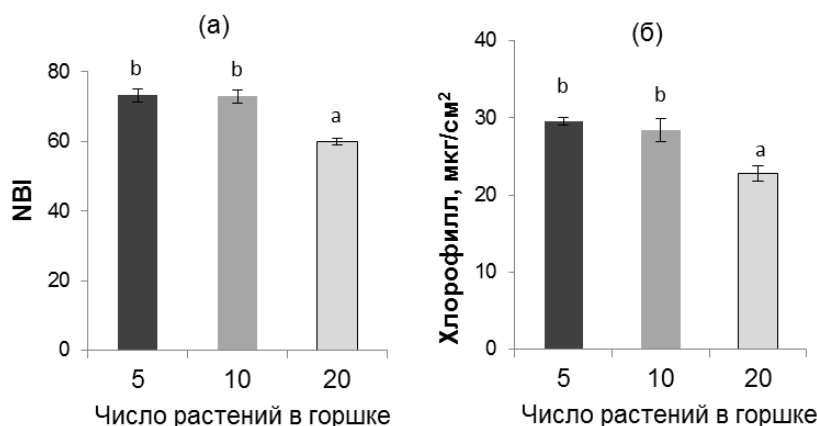


Рис. 2. Индекс азотного баланса *NBI* (а) и содержание хлорофилла (б) растений пшеницы через 13 сут после посадки 5-, 10- и 20-ти проростков в один вегетационный сосуд.

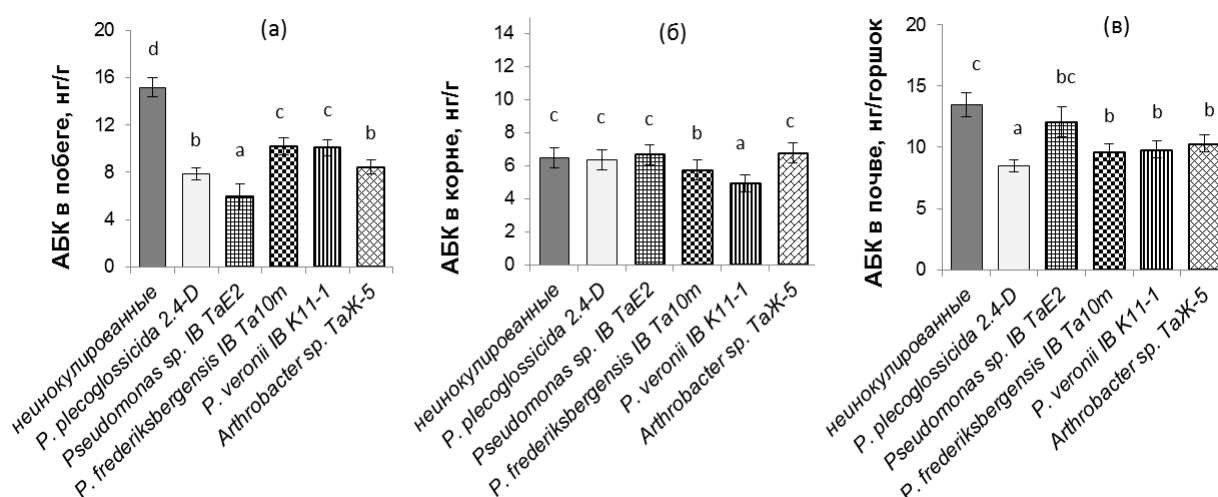


Рис. 3. Содержание АБК в побегах и корнях (нг/г сырой массы) растений пшеницы и в почве (нг/сосуд) через 10 сут после посадки проростков в сосуд и внесения в ризосферу (до 10^8 КОЕ/г субстрата) деструкторов АБК ($n = 9$).

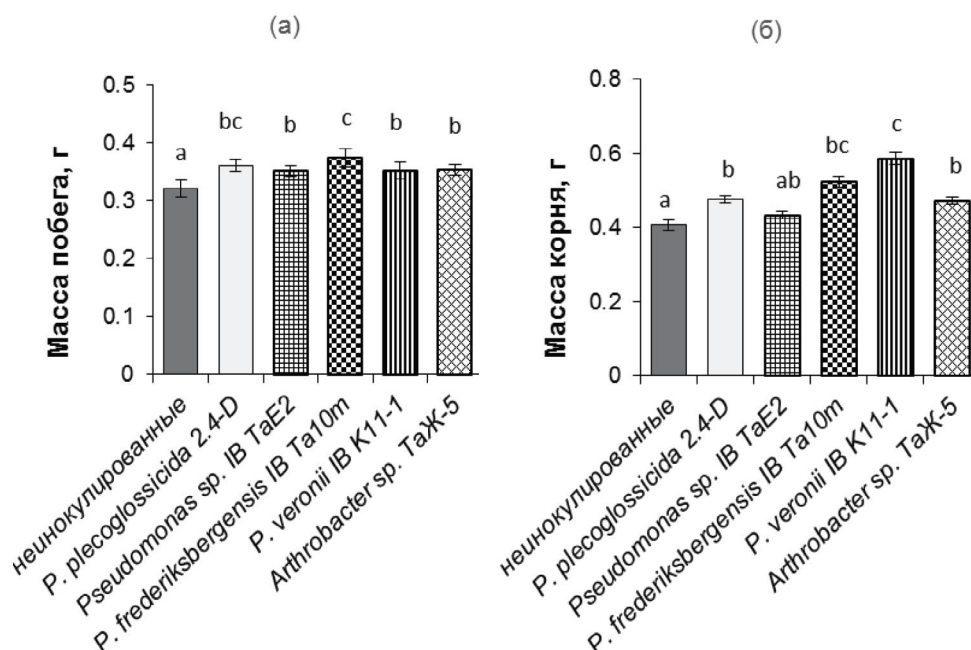


Рис. 4. Масса побегов (а) и корней (б) через 10 сут после посадки в сосуды проростков пшеницы и внесения в ризосферу (до 10^8 КОЕ/г субстрата) деструкторов АБК ($n = 12$).

и в данных экспериментах также незначительно увеличивал массу растений (на 6–9% по сравнению с неинокулированными). Несмотря на снижение концентрации АБК в побегах, которое было максимальным по сравнению с другими бактериями, данный штамм не вызывал достоверного снижения содержания гормона в почве. Как показано еще в классических работах, корневые сигналы АБК (концентрация АБК в ксилеме) влияют на транспирацию и рост растений в определенной ситуации в большей степени, чем содержание гормона в ткани листа [13]. Кроме того, АБК может подавлять рост и ветвление корней [23, 24], что должно отрицательно сказаться

на способности корневой системы поглощать воду и элементы минерального питания. Поскольку в наших опытах содержание АБК снижалось, можно это рассматривать как механизм положительного действия микробов.

Наибольшее увеличение массы растения было характерно для *P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, обработка которыми снижала содержание АБК в почве и побегах растений. Бактерия *P. plecoglossicida* 2.4-D в равной степени стимулировала рост побега и корня, а *P. veronii* IB K11-1 максимально активировала накопление

массы корня на фоне снижения в нем содержания АБК. Соответственно, разным сочетаниям изменений содержания АБК, обнаруженным в почве, корне и побеге, соответствовали разные ростовые ответы проростков пшеницы. Это аргумент в пользу того, что влияние бактерий АБК-деструкторов определяло ростовой ответ растений, учитывая, что выращивали их при одинаковом температурном, водном режиме и снабжали одинаковым количеством питательных элементов. Интересно то, что инокулированные растения, за исключением обработанных *Pseudomonas* sp. IB TaE2, в течение первой недели после обработки демонстрировали более высокие показатели азотного индекса, свидетельствующего об обеспеченности растений минеральным питанием (табл. 1).

Бактериальная обработка не влияла на содержание хлорофилла в пределах наших сроков выращивания

растений в плотной посадке, что было также характерно и для конкурирующих растений салата [25].

Конкурентные отношения между растениями в плотных посадках предполагают ростовой ответ листьев, направленный на захват солнечной энергии, которая в загущенных посевах становится лимитирующим фактором [26]. Возможно поэтому поддержание роста растений в плотных посевах в результате обработки их бактериями-деструкторами АБК не должно ограничиваться увеличением массы побега или корня. В этой связи проанализировали формирование площади листовой поверхности растений пшеницы после инокуляции разными бактериями (рис. 5).

Показано, что бактериальная обработка в разной степени стимулировала увеличение площади листьев в зависимости от штамма. Максимальные величины этого показателя были характерны для

Таблица 1. Динамика содержания хлорофилла (Chl) и индекса азотного баланса (*NBI*) в проростках пшеницы после инокуляции клетками бактерий до 10⁸ КОЕ/г субстрата, *n* = 30

Вариант обработки	Время после инокуляции, сут					
	3		6		10	
	Chl	<i>NBI</i>	Chl	<i>NBI</i>	Chl	<i>NBI</i>
Неинокулированные	17 ±	38 ±	23 ±	64 ±	23 ±	63 ±
<i>P. plecoglossicida</i> 2.4-D	17 ±	44 ±	23 ±	71 ±	23 ±	65 ±
<i>Pseudomonas</i> sp. IB TaE2	17 ±	39 ±	22 ±	61 ±	22 ±	58 ±
<i>P. frederiksbergensis</i> IB Ta10m	16 ±	40 ±	23 ±	68 ±	23 ±	62 ±
<i>P. veronii</i> IB K11–1	17 ±	44 ±	22 ±	66 ±	24 ±	63 ±
<i>Arthrobacter</i> sp. ТаЖ-5	16 ±	40 ±	22 ±	65 ±	23 ±	62 ±

Примечание. *NBI* – усл. ед., Chl – мг/см².

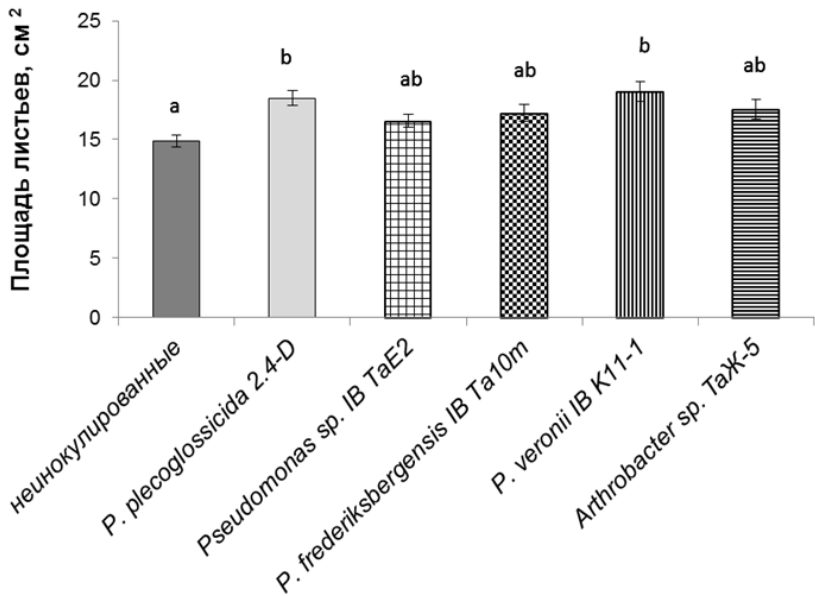


Рис. 5. Суммарная площадь листьев растений пшеницы через 10 сут после посадки и внесения в ризосферу (до 10⁸ КОЕ/г субстрата) деструкторов АБК (*n* = 12).

P. plecoglossicida 2.4-D и *P. veronii* IB K11–1, а у штамма *P. frederiksborgensis* IB Ta10m, для которого также была характерна стимуляция накопления массы растением, эта реакция практически отсутствовала. Возможно, формирование большего листового покрытия у растений пшеницы под воздействием бактерий *P. plecoglossicida* 2.4-D и *P. veronii* IB K11–1 было связано с их способностью к синтезу и выделению во внешнюю среду ауксина [27, 28], участие которого подтверждено в реакции растений на затенение [10, 29]. Несмотря на то, что в литературе сведения о разрушающих АБК бактериальных штаммах ограничиваются несколькими представителями [14], известно, что они позитивно влияли на рост растений, снижая в них эндогенное содержание АБК, но отличались по способности синтезировать другие гормоны и метаболиты [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение особенностей роста проростков пшеницы и содержания в них АБК и в почвенном растворе в ответ на обработку АБК-деструкторами подтвердило наличие связи между способностью бактерий к снижению содержания АБК и стимуляцией или поддержанием ростовых процессов в плотных посадках. Выявленные особенности ответных реакций растения на обработку отдельными метаболитизирующими АБК бактериями предположительно были также связаны с влиянием бактерий на другие гормоны растений или с прямым воздействием бактериальных метаболитов на растения. Таким образом, удалось выявить несколько перспективных для дальнейших исследований бактериальных штаммов-деструкторов АБК, относящихся к роду *Pseudomonas* (*P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksborgensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11–1), применение которых могло бы способствовать поддержанию роста и смягчению стресса у растений пшеницы в загущенных посевах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fang X.Li.Y., Nie J., Wang C., Huang K., Zhang K.Y., Zhang Y., She H., Xi L., Ruan R., Yuan X., Yi Z. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photo-synthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) // Field Crops Res. 2018. № 219. P. 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.001>
2. Jiang X., Tong L., Kang S., Li F., Li D., Qin Y., Shi R., Li J. Planting density affected biomass and grain yield of maize for seed production in an arid region of Northwest China // J. Arid Land. 2018. № 10. P. 292–303. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0098-7>
3. Zhang Y., Xu Z., Jun L., Wang R. Optimum planting density improves resource use efficiency and yield stability of rainfed maize in semiarid climate // Front. Plant Sci. 2021. № 12. P. 752606. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.752606>
4. Romero H., Guataquira S., Forero D. Light interception, photosynthetic performance, and yield of oil palm interspecific OxG hybrid (*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés × *Elaeis guineensis* Jacq.) under three planting densities // Plants. 2022. № 11. P. 1166. <https://doi.org/10.3390/plants11091166>
5. Ballaré C., Pierik R. The shade-avoidance syndrome: Multiple signals and ecological consequences // Plant Cell Environ. 2017. V. 40. P. 2530–2543. <https://doi.org/10.1111/pce.12914>
6. Tang Y.J., Liesche J. The molecular mechanism of shade avoidance in crops — How data from *Arabidopsis* can help to identify targets for increasing yield and biomass production // J. Integr. Agric. 2017. V. 16. P. 1244–1255. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61434-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61434-X)
7. Cagnola J.I., Ploschuk E., Benech-Arnold T., Finlayson S.A., Casal J.J. Stem transcriptome reveals mechanisms to reduce the energetic cost of shade-avoidance responses in tomato // Plant Physiol. 2012. V. 160. P. 1110–1119. <https://doi.org/10.1104/pp.112.201921>
8. Reddy S., Holalu S., Casal J., Finlayson S. Abscisic acid regulates axillary bud outgrowth responses to the ratio of red to far-red light // Plant Physiol. 2013. V. 163. P. 1047–1058. <https://doi.org/10.1104/pp.113.221895>
9. Hayes S., Pantazopoulou C.K., van Gelderen K., Rein-en E., Tween A.L., Sharma A., de Vries M., Prat S., Schuurink R.C., Testerink C., Pierik R. Salinity limits plant shade avoidance // Curr. Biol. 2019. V. 29. P. 1669–1676. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.03.042>
10. Vysotskaya L., Arkhipova T., Kudoyarova G., Veselov S. Dependence of growth inhibiting action of increased planting density on capacity of lettuce plants to synthesize ABA // J. Plant Physiol. 2018. V. 220. P. 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.09.011>
11. Munemasa S., Hauser F., Park J., Waadt R., Brandt B., Schroeder J.I. Mechanisms of abscisic acid-mediated control of stomatal aperture // Curr. Opin. Plant Biol. 2015. V. 28. P. 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.10.010>
12. Chen K., Li G.J., Bressan R.A., Song C., Song C.P., Zhu J.K., Zhao Y. Abscisic acid dynamics, signaling, and functions in plants // J. Integr. Plant Biol. 2020. V. 62. P. 25–54. <https://doi.org/10.1111/jipb.12899>
13. Hartung W., Sauter A., Turner N.C., Fillery I., Heilmeyer H. Abscisic acid in soils: What is its function and which factors and mechanisms influence its concentration? // Plant Soil. 1996. V. 184. P. 105–110. <https://doi.org/10.1007/BF00029279>

14. Сырова Д.С., Шапошников А.И., Юзихин О.С., Белимов А.А. Деструкция и трансформация фитогормонов микроорганизмами // Прикл. биохим. и микробиол. 2022. Т. 58. № 1. С. 3–22. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2021-55-7-60-64>
15. Belimov A., Dodd I., Safronova V., Dumova V., Shaposhnikov A., Ladatko A., Davies W. Absciscic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth // Plant Physiol. Biochem. 2014. V. 74. P. 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.032>
16. Vysotskaya L., Martynenko E., Ryabova A., Kuzmina L., Starikov S., Chetverikov S., Gaffarova E., Kudoyarova G. The growth-inhibitory effect of increased planting density can be reduced by abscisic acid-degrading bacteria // Biomolecules. 2023. V. 13. P. 1668. <https://doi.org/10.3390/biom13111668>
17. Рябова А.С., Кузьмина Л.Ю., Мартыненко Е.В., Четвериков С.П., Мильман П.Ю., Высоцкая Л.Б. Выявление штаммов-деструкторов АБК и их влияние на всхожесть семян и рост проростков пшеницы // Экобиотехнология. 2023. Т. 6. № 3. С. 190–199 <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-3-190-199>
18. Chetverikov S.P., Sharipov D.A., Korshunova T.Y., Loginov O.N. Degradation of perfluorooctanyl sulfonate by strain *Pseudomonas plecoglossicida* 2.4-D // Appl. Biochem. Microbiol. 2017. V. 53. P. 533–538. <https://doi.org/10.1134/S0003683817050027>
19. King E.O., Ward M.K., Raney D.E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein // J. Lab. Clin. Med. 1954. V. 44. P. 301–307. <https://doi.org/10.5555/uri:pii:002221435490222X>
20. Veselov S.Yu., Kudoyarova G.R., Egutkin N.L., Gyulizade V.G., Mustafina A.R., Kof E.K. Modified solvent partitioning scheme providing increased specificity and rapidity of immunoassay for indole 3-acetic acid // Physiol. Plantarum. 1992. V. 86. P. 93–96.
21. Kudoyarova G.R., Melentiev A.I., Martynenko E.V., Arkhipova T.N., Shendel G.V., Kuz'mina L.Yu., Dodd I.C., Veselov S.Yu. Cytokinin producing bacteria stimulate amino acid deposition by wheat roots // Plant Physiol. Biochem. 2014. V. 83. P. 285–291.
22. Veselov S.Yu., Timergalina L.N., Akhiyarova G.R., Kudoyarova G.R., Korobova A.V., Ivanov I.I., Arkhipova T.N., Prinsen E. Study of cytokinin transport from shoots to roots of wheat plants is informed by a novel method of differential localization of free cytokinins bases or their ribosylated forms by means of their specific fixation // Protoplasma. 2018. V. 255. P. 1581–1594. <https://doi.org/10.1007/s00709-018-1248-7>
23. Sun L.R., Wang Y.B., He S.B., Hao F.S. Mechanisms for abscisic acid inhibition of primary root growth // Plant Signal. Behav. 2018. V. 13. e1500069. <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1500069>
24. Akhiyarova G., Veselov D., Ivanov R., Sharipova G., Ivanov I., Dodd I.C., Kudoyarova G. Root ABA accumulation delays lateral root emergence in osmotically stressed barley plants by decreasing root primordial IAA accumulation // Inter. J. Plant Biol. 2023. V. 14. P. 77–90. <https://doi.org/10.3390/ijpb14010007>
25. Vysotskaya L., Martynenko E., Ryabova A., Kuzmina L., Starikov S., Chetverikov S., Gaffarova E., Kudoyarova G. The growth-inhibitory effect of increased planting density can be reduced by abscisic acid-degrading bacteria // Biomolecules. 2023. V. 13. P. 1668. <https://doi.org/10.3390/biom13111668>
26. Yun-jia T., Liesche J. The molecular mechanism of shade avoidance in crops-How data from *Arabidopsis* can help to identify targets for increasing yield and biomass production // J. Integr. Agric. 2017. V. 16(6). P. 1244–1255. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61434-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61434-X)
27. Кузьмина Л.Ю., Высоцкая Л.Б., Галимзянова Н.Ф., Гильванова Е.А., Рябова А.С., Мелентьев А.И. Новые штаммы фосфатмобилизирующих бактерий, продуцирующих ауксин, перспективные для сельскохозяйственной биотехнологии // Изв. УНЦ РАН. 2015. № 1. С. 40–46.
28. Bakaeva M., Kuzina E., Vysotskaya L., Kudoyarova G., Arkhipova T., Rafikova G., Chetverikov S., Korshunova T., Chetverikova D., Loginov O. Capacity of pseudomonas strains to degrade hydrocarbons, produce auxins and maintain plant growth under normal conditions and in the presence of petroleum contaminants // Plants. 2020. V. 9. P. 379. <https://doi.org/10.3390/plants9030379>
29. Pierik R., Ballare C.L. Control of plant growth and defense by photoreceptors: From mechanisms to opportunities in agriculture // Mol. Plant. 2021. V. 14. P. 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.11.021>

Influence of ABA-Metabolizing Bacteria on the Growth and ABA Content in Wheat Plants and Soil in Dense Planting

**E. V. Martynenko^a, L. Yu. Kuzmina^a, E. R. Gaffarova^a, A.S. Ryabova^a, G. R. Kudoyarova^a,
L. B. Vysotskaya^{a, #}**

^a*Ufa Institute of Biology—Ufa Federal Research Center of the RAS,
prosp. Oktyabrya 71, Ufa 450054, Russia*

[#]*E-mail: vysotskaya@anrb.ru*

The influence of abscisic acid (ABA)-metabolizing bacterial strains of the genera *Pseudomonas* and *Arthrobacter* on the hormone content in the shoots and roots of wheat plants, as well as in a sandy substrate during dense planting, has been studied. The ability of bacteria to reduce the ABA content in the growing environments and in plants, albeit to varying degrees, was discovered already 10 days after inoculation. At the same time, most of the studied strains were characterized by decrease of ABA in shoots, and suppression of ABA in the roots was observed less frequently. The simultaneous decrease in the hormone in the shoots and in the sandy substrate, which manifested itself under the influence of strains *P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksborgensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, was accompanied by a maximum increase of wheat weight plants as compared to non-inoculated plants. The studied bacteria to varying degrees stimulated the accumulation of shoot and root mass, as well as leaf area, which could probably be associated with their different ability to synthesize other hormones, such as IAA, and/or influence the hormonal system of the plant itself. The prospects of using ABA-destructor bacteria for the development of agricultural biological products that can mitigate the negative effects of thickened crops and increase resistance to other abiotic factors are discussed.

Keywords: *Triticum durum*, planting density, growth, ABA, plant growth-promoting bacteria, ABA-destructors.

УДК 631.465:631.445.41:632.122.2

ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ЧЕРНОЗЕМОВИДНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

© 2024 г. О. А. Пилецкая*

*Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН**675000 Благовещенск, п. Релочный, 1, Россия***E-mail: olgapiletskaya1988@gmail.com*

В лабораторном опыте изучили влияние нефтяного загрязнения на краткосрочную динамику активности уреазы, фосфатазы, каталазы, пероксидазы и полифенолоксидазы черноземовидной почвы юга Дальнего Востока. Установлено, что при загрязнении почвы нефтью и нефтепродуктами активность уреазы снизилась на 20–44% в конце инкубации, активность пероксидазы повысилась на 39–49% в середине и конце инкубации, активность полифенолоксидазы возросла в 1.6–2.0 раза в середине инкубации. Активность фосфатазы и каталазы была стабильной при разных уровнях загрязнения на протяжении всего эксперимента. Исследуя влияние срока инкубации, установили, что максимальной активность уреазы была на 10-е сут, фосфатазы – на 20-е, пероксидазы – на 20- и 30-е, полифенолоксидазы – на 30-е сут опыта. Активность каталазы была стабильной на протяжении всех сроков инкубации. Показано, что в случае загрязнения черноземовидной почвы нефтью и дизельным топливом в дозах до 5000 мг/кг на ранних этапах ингибирование ферментативной активности не происходило.

Ключевые слова: черноземовидная почва, загрязнение нефтепродуктами, ферментативная активность, срок инкубации, Дальний Восток.

DOI: 10.31857/S0002188124120107, **EDN:** VURFZE

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами влияет на морфологические, физические, физико-химические, биологические свойства почв, определяющие плодородие и экологические функции. Изменения свойств почвы при загрязнении нефтью, а также процессы ее миграции, аккумуляции и метаболизма зависят от физико-химического состава почвы, биологической активности, объема загрязнения, почвенно-климатических, ландшафтных условий, типа почвы, наличия тех или иных биохимических барьеров, каналов миграции и диффузии в почвенном профиле [1, 2]. При этом наиболее быстро и специфично реагируют на нефтяное загрязнение почвы микробиологическая и ферментативная активность – уже на начальных стадиях загрязнения могут изменяться состав, численность микроорганизмов, их метаболизм, активность почвенных ферментов [3].

Попадая в почву нефть и нефтепродукты подвергаются микробиологическому разложению [4]. Это происходит за счет 2-х факторов: наличия сложных ферментов – оксидоредуктаз, осуществляющих окислительно-восстановительные процессы, гидролаз, осуществляющих процессы расщепления высокомолекулярных органических соединений и наличия

в клетках приспособлений, обеспечивающих поглощение гидрофобного субстрата [1, 5]. Учитывая, что окислительно-восстановительные и гидролитические процессы в почве протекают одновременно, и часть энергии, образованной в одних реакциях, используется в других, при биодиагностике загрязнения почв необходимо одновременно проводить определение активности данных групп ферментов.

Основная функция ферментов в загрязненных почвах заключается в трансформации поллютантов до простых и менее токсичных продуктов. Почвенные ферменты активно участвуют в процессах трансформации органических остатков как в течение жизни, так и после отмирания микроорганизмов [6, 7]. Наиболее чувствительны к загрязнению почвы нефтью и нефтепродуктами из оксидоредуктаз – каталаза, пероксидаза, полифенолоксидаза, из гидролаз – ферменты, формирующие азотный режим почвы – уреазы и фосфорный режим – фосфатаза [4, 8–10].

Сельскохозяйственные почвы подвержены загрязнению нефтью и нефтепродуктами в результате использования техники, применения инсектицидов на основе нефтяного масла, удобрения почвы с использованием компостов бытовых отходов, сброса и разливов отработанных масел, дорожных аварий,

при порыве трубопроводов и т.п. В результате загрязнения сельскохозяйственных почв нефтью и нефтепродуктами происходит деградация растительного покрова, наблюдается замедление роста и развития растений, нарушаются функции фотосинтеза и дыхания. Главными причинами таких изменений являются: уменьшение поступления воды и питательных веществ, а также кислородное голодание [11, 12]. Кроме того, тяжелые фракции нефти малодоступны микроорганизмам, поэтому разложение этих веществ идет очень медленно, что в результате также может приводить к замедленному развитию растений. В свою очередь корневые системы растений и комплексы растений и микроорганизмов являются источниками почвенных ферментов. Растения выделяют в почву ферменты, которые трансформируют различные виды загрязняющих веществ (например, полихлорированные бифенолы, полициклические ароматические углеводороды).

Ферментативная активность наиболее сильно изменяется на ранних этапах нефтяного загрязнения. Это связано с первоначальным влиянием на почвенную микрофлору высоких и токсичных концентраций легких фракций нефти и нефтепродуктов [13, 14]. Таким образом, изучение биологической активности почв на ранних этапах загрязнения нефтью и нефтепродуктами необходимо для индикации и диагностики антропогенного воздействия.

Цель работы — определить влияние загрязнения нефтью и дизельным топливом на динамику активности ферментов класса гидролаз и оксидоредуктаз черноземовидной почвы.

Предположили, что 1) чем выше уровень загрязнения почвы нефтью и дизельным топливом, тем сильнее будет выражен эффект ингибирования ферментативной активности и 2) ферментативная активность будет изменяться в зависимости от срока инкубации. В этом исследовании проанализирована временная изменчивость энзиматической активности почвы, загрязненной нефтью и дизельным топливом в сравнении с фоновой почвой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в зоне влияния Восточно-Сибирского тихоокеанского магистрального нефтепровода на участке его прохождения по сельскохозяйственной территории на юге Амурской обл. В данном районе преобладают черноземовидные почвы — Stagnic Phaeozems (WRB, 2014), составляющие основу (40%) пахотного фонда Амурской обл. Эти почвы формируются на плоских водораздельных поверхностях, пологих долинных склонах, обладают высоким потенциальным плодородием и микробиологической активностью [15–17].

Для изучения динамики ферментативной активности почвы, загрязненной нефтью и нефтепродуктами, был заложен лабораторный опыт со следующими вариантами: 1 — контроль, 2 — допустимый уровень содержания нефти и дизельного топлива (1000 мг/кг), 3 — средний уровень содержания нефти и дизельного топлива (2000 мг/кг), 4 — очень высокий уровень содержания нефти и дизельного топлива (5000 мг/кг). Уровни загрязнения устанавливали согласно действующему нормативному документу [18].

Отбор почвенных образцов произведен на полях под зерновыми культурами в Благовещенском р-не в сентябре 2021 г. Географические координаты: N50°11'21.38", E 127°46'19.39". Образцы отобраны площадным методом. На площадке 5 × 5 м отобрано 5 точечных образцов, из которых методом конверта составлена объединенная проба массой 1 кг, глубина отбора — 0–20 см. Почвенные образцы перед закладкой лабораторного опыта высушены до воздушно-сухого состояния, измельчены и просеяны через сито с диаметром отверстий 2 мм.

Масса почвы для анализа — 100 г. Закладка опыта разделена на 3 срока инкубации: 10, 20 и 30 сут. Повторность опыта трехкратная. Почва в пакетах была насыщена водой до оптимальной влагоемкости 60%.

Исследованная черноземовидная почва характеризовалась кислой реакцией среды, высокой емкостью катионного обмена, низким содержанием органического углерода и азота, высокой суммой поглощенных оснований (в составе поглощенных катионов преобладал ион Ca^{2+}), низким содержанием минерального азота, повышенным содержанием подвижного фосфора, очень высоким содержанием обменного калия (табл. 1).

Энзиматическая активность черноземовидной почвы определена по активности ферментов класса оксидоредуктаз (каталазы, пероксидазы и полифенолоксидазы) и класса гидролаз (фосфатазы, уреазы). Активность каталазы определена перманганатометрическим методом по Джонсону–Темпле [19], активность нейтральной фосфатазы — по методу Малахова (гидролиз фенолфталеин фосфата натрия) [20], активность уреазы — методом Галстяна [19], активность ферментов пероксидазы и полифенолоксидазы — методом Галстяна [21].

Статистическая обработка и визуализация результатов выполнены в программе R Studio, версия 4.0.3. Для оценки величины и значимости эффектов применяли метод сравнения в зависимости от распределения данных. Проверку на нормальность распределения данных осуществляли по тесту Шапиро–Уилка. Для нахождения статистически значимых различий с параметрическим распределением данных применяли: для попарного сравнения и сравнения с референтной группой — тест Стьюдента (t -test), для сравнения >3-х групп — дисперсионный анализ

Таблица 1. Физико-химические и агрохимические свойства черноземовидной почвы

Свойства почвы	Показатель
pH _{H2O} , ед. pH	5.9 ± 0.1
pH _{KCl} , ед. pH	5.0 ± 0.1
ЕКО, мг-экв/100 г почвы	34.9 ± 3.2
Водорастворимый углерод, мг/л	18.3 ± 3.2
Общий углерод, %	1.9 ± 0.3
Водорастворимый азот, мг/л	1.1 ± 0.4
Ca ²⁺ , мг-экв/100 г почвы	16.9 ± 1.2
Mg ²⁺ , мг-экв/100 г почвы	5.5 ± 1.2
Σ Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , мг-экв/100 г почвы	22.4 ± 2.16
K ₂ O, мг/кг	392 ± 55
P ₂ O ₅ , мг/кг	102 ± 10
N-NH ₄ , мг/кг	9.1 ± 1.2
N-NO ₃ , мг/кг	3.5 ± 1.2
N _{min} , мг/кг	12.6 ± 0.4

Примечание. Данные в таблице – средние ± стандартное отклонение, $n = 6$.

с последующим попарным сравнением методом Тьюки. Для непараметрических данных применяли: для попарного сравнения – критерий Уилкоксона, для сравнения >3-х групп – тест Краскала–Уоллиса, с последующим попарным Данн-тестом с поправкой Холма–Бонферрони.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что загрязнение почвы различными концентрациями нефти и дизельного топлива оказывало влияние на активность части ферментов. Например, отклик фермента уреазы на загрязнение наблюдали только на 30-е сут инкубации и при загрязнении нефтью: зафиксировано снижение активности фермента на 20–44% относительно контроля ($p < 0.05$) (рис. 1).

Активность пероксидазы повысилась при всех уровнях загрязнения на 20- и 30-е сут инкубации. При этом значимое повышение активности фермента на 20-е сут зафиксировано при очень высоком уровне загрязнения нефтью на 42% ($p = 0.019$) и при допустимом уровне загрязнения дизельным топливом на 49% ($p = 0.001$) относительно контроля, на 30-е сут инкубации при допустимом уровне загрязнения нефтью – на 39% ($p = 0.044$) и при очень высоком загрязнении дизельным топливом – на 39% ($p = 0.043$) относительно контроля.

Активность полифенолоксидазы повысилась при всех уровнях загрязнения на 20-е сут инкубации. При этом значимое повышение активности фермента

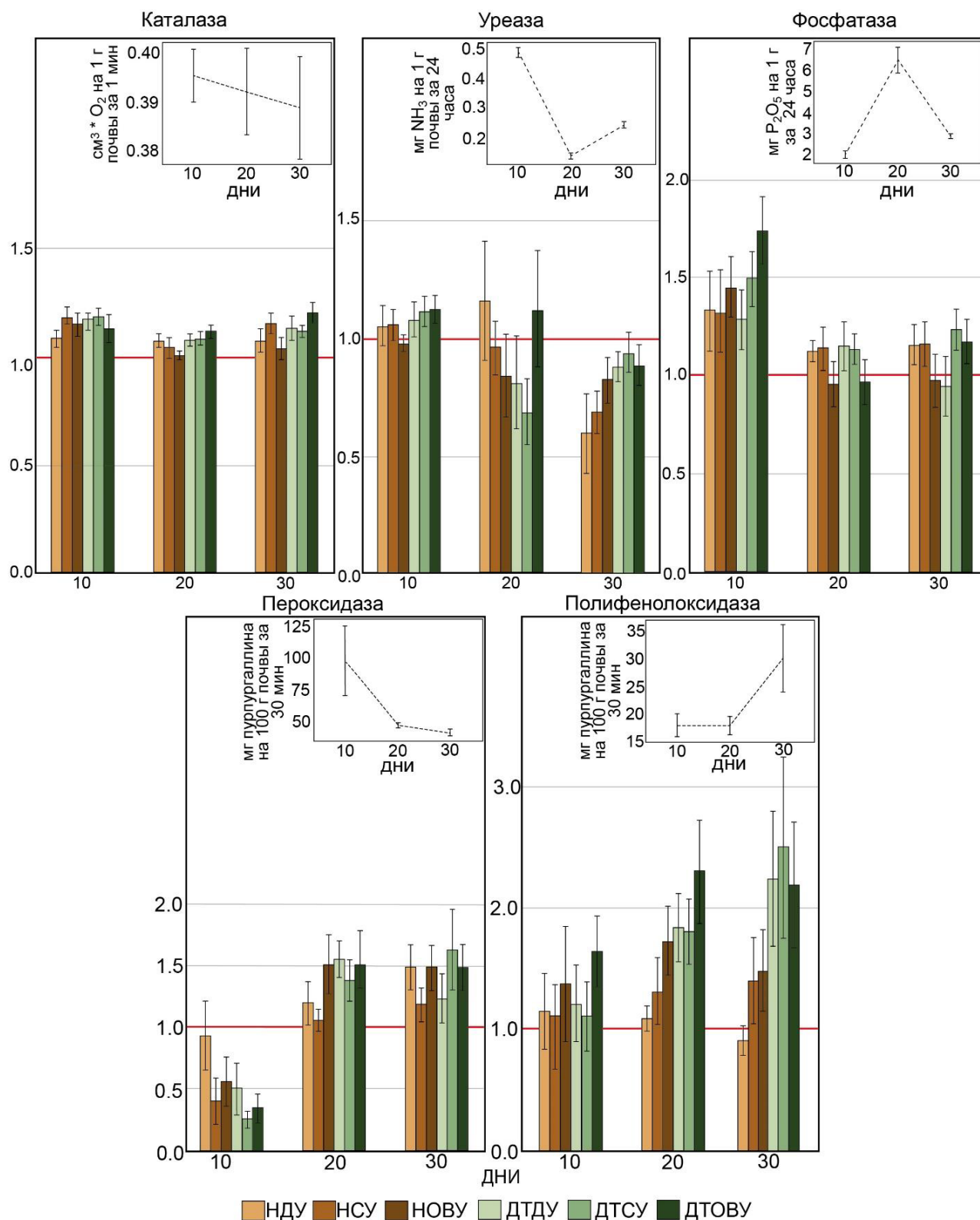
наблюдали при очень высоком уровне загрязнения нефтью и при всех уровнях загрязнения дизельным топливом – в 1.6–2.0 раза ($p < 0.043$) относительно контроля.

Значительного отклика ферментов каталазы и фосфатазы при загрязнении нефтью и дизельным топливом не обнаружено. По чувствительности к загрязнению нефтью и дизельным топливом ферменты располагались в следующем ряду: пероксидаза = полифенолоксидаза > уреазы > каталаза = фосфатаза.

Исследуя влияние срока инкубации, установили, что максимальная активность уреазы наблюдалась на 10-е сут эксперимента, на 20- и 30-е сут зафиксировано ее снижение в 2–6 раз во всех вариантах ($p < 0.001$). Максимальную активность фосфатазы отметили на 20-е сут эксперимента, на 10- и 30-е сут зафиксировано снижение активности этого фермента в 2–3 раза во всех вариантах ($p < 0.001$) (рис. 2).

Активность каталазы была стабильна на протяжении всех сроков инкубации. Максимальную активность пероксидазы отмечали на 20- и 30-е сут эксперимента, на 10-е сут зафиксировали ее снижение в 1.4–3.0 раза ($p < 0.006$). Активность полифенолоксидазы равномерно возрастала к 30-м сут инкубации. При этом значимых различий не было установлено.

Показано, что загрязнение черноземовидной почвы нефтью и дизельным топливом оказывало влияние только на активность уреазы, пероксидазы и полифенолоксидазы. Таким образом, гипотеза 1 подтвердилась не полностью. Не обнаружено



*Горизонтальная линия на графиках показывает контрольный вариант.

** НДУ – нефть допустимый уровень, НСУ – нефть средний уровень, НОВУ – нефть очень высокий уровень, ДТДУ – дизельное топливо допустимый уровень, ДТСУ – нефть средний уровень, ДТОВУ – нефть очень высокий уровень.

Рис. 1. Изменение ферментативной активности черноземовидной почвы при загрязнении нефтью и дизельным топливом относительно контроля.

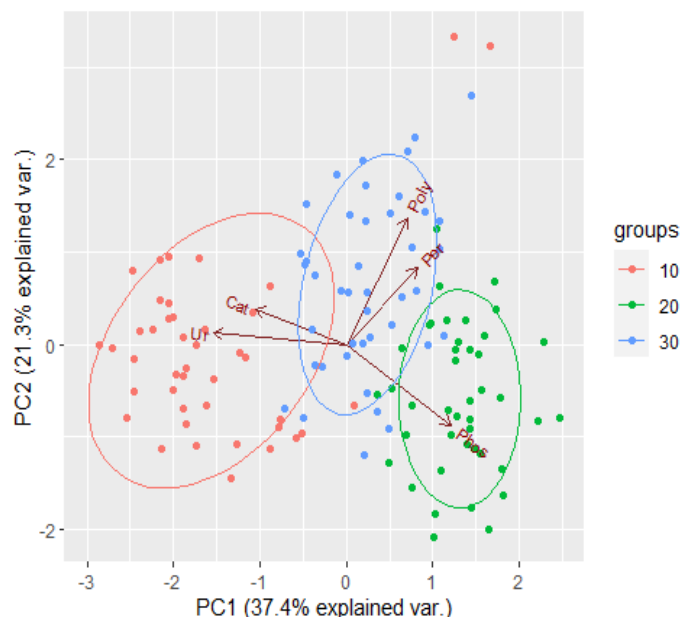


Рис. 2. Результаты применения метода главных компонент (PCA) для изучения влияния срока инкубации на ферментативную активность черноземовидной почвы.

ингибирование энзиматической активности при загрязнении почв, ферменты оказались устойчивыми к выбранным уровням загрязнения, что могло быть связано с физико-химическими свойствами почвы, устойчивостью микробных сообществ к составу и концентрациям загрязнителей и с тем, что нефтяные углеводороды могли послужить не токсикантом, а субстратом.

Нефть и нефтепродукты могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на разложение органических веществ и ферментативную активность. Если нефтяные углеводороды стимулируют микробную и ферментативную активность, обеспечивая лабильный источник углерода, разложение может ускориться [22, 23]. Напротив, если нефть достаточно токсична или добавлена в достаточном количестве, чтобы вызвать гибель биодеструкторов (беспозвоночных или микробов), то разложение может быть заторможено [13]. Кроме того, воздействие нефти может зависеть от абиотических факторов, определяя микробиологическую, энзиматическую активность и скорость разложения органических веществ [24]. К таким факторам относятся содержание питательных веществ, кислорода в почве, температура, кислотность. Нефть и нефтепродукты взаимодействуют с почвенно-поглощающим комплексом и сообществами микроорганизмов, вызывая множество разнообразных реакций [13].

Многочисленные исследования показали, что при добавлении нефтяных углеводородов может усиливаться разложение органических веществ в почве и ферментативная активность, т.к. происходит, как правило, усиление дыхания почвы при увеличении

микробных популяций [9, 22, 23, 25, 26]. Однако некоторыми исследователями показано минимальное воздействие нефти на микробные популяции [13, 27, 28], а также негативное влияние нефти на популяции бактерий и активность ферментов [29–33].

Результаты нашего исследования показали, что наиболее индикаторными к нефтяному загрязнению оказались ферменты пероксидазы и полифенолоксидазы. Эти ферменты участвуют в многостадийных процессах разложения и синтеза органических соединений ароматического ряда: катализируют окисление ароматических соединений и их производных до хинонов, которые в соответствующих условиях конденсируются с аминокислотами и пептидами с образованием первичных молекул гуминовых кислот [34]. Поскольку процессы синтеза и разложения органических веществ происходят в почве одновременно, то по активности полифенолоксидазы и пероксидазы можно условно судить о гумификации. Увеличение активности полифенолоксидазы, участвующей в гумусообразовании в почве, как правило приводит к увеличению гумификации; увеличение пероксидазной активности может способствовать разложению гумуса в почве, что приводит к снижению его содержания в почвах. Кроме того, именно эти ферменты и рекомендуют использовать при биологическом мониторинге и диагностике экологических последствий нефтяного загрязнения почв. Данные ферменты являются чувствительными к нефтяному загрязнению, информативными и менее варьирующими по сравнению с другими показателями биологической активности почвы [35].

Существенным фактором, оказавшим влияние на активность изученных ферментов, оказался срок инкубации, тем самым подтверждая гипотезу 2. Тем не менее, не обнаружили четкой закономерности влияния продолжительности инкубационного периода на активность ферментов, поскольку в опыте был рассмотрен краткосрочный период воздействия нефти и дизельного топлива на ферментативную активность черноземовидной почвы — 10, 20 и 30 сут.

Некоторые исследования показали, что краткосрочное воздействие нефти и нефтепродуктов на микробные комплексы, ферментативную активность, разложение органических веществ значительнее, чем долгосрочное. Это связано с тем, что первоначально нефть и нефтепродукты имеют более высокие концентрации легких фракций, которые обладают повышенной токсичностью для растений [14] и почвенной микрофлоры, но в свою очередь их высокая испаряемость способствует быстрому самоочищению природной среды [13]. Напротив, парафины не оказывают сильного токсического воздействия на почвенную биоту, но благодаря высокой температуре отвердевания существенно влияют на физические свойства почвы.

Комплекс почвенных микроорганизмов отвечает на нефтяное загрязнение после кратковременного ингибирования повышением своей валовой численности и усилением активности. Прежде всего это относится к углеводородоокисляющим микроорганизмам (УОМ), количество которых резко возрастает по сравнению с незагрязненными почвами [36–38]. При загрязнении сообщество микроорганизмов почвы принимает неустойчивый характер, но по мере разложения нефти и нефтепродуктов в почве общее количество микроорганизмов приближается к фоновым количествам, при этом численность нефтеокисляющих бактерий (долго, например, в почвах южной тайги — до 10–20 лет) значительно превышает те же группы в незагрязненных почвах [39].

В нашем исследовании напрямую микроорганизмы не изучали. Микроорганизмы являются основным источником поступления ферментов в почву, при этом работ, посвященных исследованию краткосрочной динамики ферментативной активности почвы при нефтезагрязнении, недостаточно. Гидрофобные вещества на первых стадиях загрязнения преобразуют внеклеточные ферменты, включающие большой диапазон оксидоредуктаз и гидролаз. Они разрушают и трансформируют полимерные вещества в частично разложенные или окисленные продукты, которые могут быть легко поглощены клетками и полностью минерализованы [40]. При этом оксидоредуктазы могут также выполнять защитную функцию, окисляя токсические растворимые соединения в нерастворимые, не доступные для клетки продукты; гидролазы — из-за своей низкой

субстратной специфичности могут играть главную роль в биологическом разложении многих загрязняющих, в том числе, гидрофобных веществ [41].

В нашем исследовании максимальная активность уреазы на 10-е сут опыта могла быть связана с гидролизом мочевины в почве в процессе аммонификации под действием микроорганизмов, синтезирующих уреазу. При достаточном количестве влаги и кислорода в почве мочевина интенсивно разлагается, активируется биологическая деятельность, и, как следствие, — активность уреазы. Уреаза может терять активность с течением времени, поскольку каталитические центры становятся менее доступными из-за диффузии мочевины в почве. Дополнительным объяснением может служить уменьшение количества ризосферных микроорганизмов при инкубации, благодаря которым продуцируется уреазы, вследствие чего происходит снижение активности этого фермента.

При загрязнении нефтью и дизельным топливом максимальная активность уреазы на ранних этапах инкубации, возможно, была связана с увеличением содержания органического углерода в почве, который активизировал азотный обмен и окислительно-восстановительные реакции. Кроме того, нефтяное загрязнение могло снизить pH почвенного раствора, что также приводило к увеличению активности уреазы.

По результатам ряда исследований установлено, что активность уреазы при нефтяном загрязнении повышается, и это связано с ростом численности аммонифицирующих микроорганизмов [1, 42–44]. В нашем исследовании при нефтяном загрязнении на ранних этапах инкубации, возможно, произошло повышение численности аммонифицирующих микроорганизмов и, как следствие, усиление активности уреазы. В остальные сроки инкубации, по мере разложения углеводородов нефти и нефтепродуктов, вероятно, происходила активизация углеводородоокисляющих микроорганизмов (УОМ) и снижение численности аммонифицирующей микрофлоры и, как следствие, снижение активности уреазы.

Значительное увеличение фосфатазной активности в середине инкубации могло быть связано с недостатком фосфора для почвенного сообщества в данный период. Фермент фосфатаза катализирует процесс минерализации органического фосфора, при котором высвобождается фосфорная кислота из органических соединений, поступающих с растительными остатками. Таким образом, одним из факторов, влияющих на фосфатазную активность, является обеспеченность почвы подвижными фосфатами, доступными для микроорганизмов. При недостатке в почве доступного фосфора происходит дополнительное выделение ферментов микроорганизмами

и растениями, что ведет к возрастанию фосфатазной активности. Справедливо и обратное утверждение — при избытке подвижного фосфора активность фосфатазы снижается [45]. В свою очередь, данные процессы зависят и от гидротермических условий [46–48]. Известно, что поступление нефти в почву ведет к инаktivации фосфогидролаз, уменьшению содержания подвижных фосфатов, что затрудняет передвижение фосфора в пищевых цепях, фосфорное питание растений и обеспеченность их доступными формами соединений фосфора [44].

Активность каталазы в нашем исследовании была стабильна в течение всего опыта. Каталаза является важным клеточным антиоксидантным ферментом, который защищает почвенную среду от окислительного стресса и катализирует разложение пероксида водорода на воду и кислород. В свою очередь, основная роль в процессах самоочищения почвы от загрязняющих веществ принадлежит биологическому окислению. Биологическое окисление происходит в результате окислительно-восстановительных ферментных реакций, способствующих разрушению не свойственных почвам веществ. Таким образом, стабильность активности каталазы может отражать потенциальную способность почвенной среды сохранять гомеостаз при антропогенных нарушениях. Кроме того, результатами различных исследований установлено, что каталаза является ферментом, отражающим изменения окислительно-восстановительных условий среды. Поэтому целесообразно использовать активность каталазы как диагностический энзимологический показатель общей биологической активности почв [49].

Повышение активности пероксидазы и полифенолоксидазы в середине и конце инкубации могло быть связано с тем, что к указанному периоду произошла частичная трансформация нефти и нефтепродуктов в процессе окисления в компоненты гумуса, поскольку ферменты катализируют многостадийные процессы разложения и синтеза органических соединений ароматического ряда при гумификации [50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что в случае загрязнения черноземовидной почвы нефтью и дизельным топливом в дозах от 1000 до 5000 мг/кг ингибирования ферментативной активности почвы не произошло. Активность уреазы снизилась при воздействии нефти в конце инкубационного периода, что могло быть связано с диффузией мочевины в почву и снижением количества ризосферных микроорганизмов, продуцирующих уреазу. Активность фосфатазы при загрязнении нефтью и дизельным топливом была стабильной, т.к. загрязнение почвы не привело к дефициту подвижного фосфора на протяжении всего

периода инкубации. Загрязнение нефтью и дизельным топливом не повлияло на активность каталазы за весь период инкубации, отражая стабильность окислительно-восстановительных условий черноземовидной почвы. Активность пероксидазы и полифенолоксидазы повысилась при загрязнении нефтью и дизельным топливом в середине и конце инкубации, что связано с частичной трансформацией нефти и нефтепродуктов в процессе окисления в компоненты гумуса. Таким образом, вероятно нефтяные углеводороды послужили не токсикантом, а субстратом для микроорганизмов.

Автор искренне признательна С.В. Брянину, канд. биол. наук, руководителю лаборатории климатических и углеродных исследований ИГиП ДВО РАН за ценные комментарии к ранним версиям рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шамраев А.В., Шорина Т.С. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды // Вестн. ОГУ. 2009. № 6(100). С. 642–645.
2. Wyszowska J., Kucharski J., Waidowska E. The influence of diesel oil contamination on soil enzymes activity // Rostlinna Vyroba. 2002. V. 48. P. 58–62.
3. Moradi S., Sarikhani Mohammad Reza, Ale-Agha Ali Beheshti, Hasanpur Karim, Shiri Jalal. Effects of natural and prolonged crude oil pollution on soil enzyme activities // Geoderma Region. 2024. V. 36. P. e00742.
4. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биodeградация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3. С. 83–93.
5. Габбасова И.М. Дeградация и рекультивация почв Башкортостана. Уфа: Гилем, 2004. 284 с.
6. Bai W., Wang Genxu, Shang Guanglie, Xu Lei, Wang Zilong. Effects of experimental warming on soil enzyme activities in an alpine swamp meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau // Pedobiol. J. Soil Ecol. 2023. V. 101. P. 150910.
7. Lemanowicz J., Brzezinska Małgorzata, Siwik-Ziomek Anetta, Koper Jan. Activity of selected enzymes and phosphorus content in soils of former sulphur mines // Sci. Total Environ. 2020. V. 708. Iss. 13. P. 134545.
8. Колесников С.И., Спивакова Н.А., Везденева Л.С., Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. Влияние модельного загрязнения нефтью на биологические свойства почв сухих степей и полупустынь юга России // Аридные экосист. 2013. Т. 19. № 2(55). С. 58–63.
9. Dindar E., Olcay Topac Sagban F., Baskaya Huseyin S. Variations of soil enzyme activities in petroleum-hydrocarbon contaminated soil // Inter. Biodeteriorat. Biodegradat. 2015. V. 105. P. 268–275.
10. Guo H., Yao J., Cai M., Qian Y., Guo Y., Richnow H.H., Blake R.E., Doni S., Ceccanti B. Effects of petroleum contamination on soil microbial numbers, metabolic

- activity and urease activity // *Chemosphere*. 2012. V. 87. № 11. P. 1273–1280.
11. Байчоров Р.А. Действие нефти и нефтепродуктов на свойства почв и продуктивность растений // *E-Scio*. 2020. Электр. ресурс, режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/deystvie-nefti-i-nefteproduktov-na-svoystva-pochv-i-produktivnost-rasteniy?ysclid=lpkx6byrc7720051773>
 12. Вержбицкий В.В., Андрианов И.И., Полтавская М.Д. Охрана окружающей среды в нефтегазовом деле: уч. пособ. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2014. 97 с.
 13. Mendelsohn I.A., Slocum M.G. Relationship between soil cellulose decomposition and oil contamination after an oil spill at Swanson Creek, Maryland // *Marine Polluti. Bul.* 2004. V. 48. P. 359–370.
 14. Pezeshki S.R., Hester M.W., Lin Q., Nyman J.A. The effects of oil spill and clean-up on dominant US Gulf coast marsh macrophytes: a review // *Environ. Pollut.* 2000. V. 108. P. 129–139.
 15. Голов Г.В. Почвы и экология агрофитоценозов Зейско-Буреинской равнины. Владивосток: Дальнаука, 2001. 162 с.
 16. Ивлев А.М., Дербенцева В.И., Голов В.И., Трегубова В.Г. Агрохимия почв юга Дальнего Востока. М.: Круглый год, 2001. 104 с.
 17. Пилецкая О.А. Биологическая активность черноземовидной почвы при использовании различных систем удобрений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: ДФУ, 2015. 24 с.
 18. Документ (Письмо) Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ от 27.12.93 № 61-5678 «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель» // Техэксперт: [сайт]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9033369>
 19. Муртазина С.Г., Гайсин И.А., Муртазин М.Г. Практикум по почвоведению. Казань: КазанГСХА, 2006. 225 с.
 20. Малахов С.Г. Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв. М.: Моск. отд-е гидрометеоздата, 1984. 40 с.
 21. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Ин-т биологии Уфим. НЦ, Наука, 2005. 252 с.
 22. Griffiths B.S., Bonkowski M., Roy J., Ritz K. Functional stability, substrate utilisation and biological indicators of soils following environmental impacts // *Appl. Soil Ecol.* 2001. V.16. Iss. 1. P. 49–61.
 23. Siddiqui S., Adams W.A. The fate of diesel hydrocarbons in soils and their effect on the germination of perennial ryegrass // *Environ. Toxicol* 2002. V. 17. Iss. 1. P. 49–62.
 24. Blakely J.K., Neher D.A., Spongberg A.L. Soil invertebrates and microbial communities, and decomposition as indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination // *Appl. Soil Ecol.* 2002. V. 21. Iss. 1. P. 71–88.
 25. Li Y., Morris J.T., Yoch D.C. Chronic low level hydrocarbon amendments stimulate plant growth and microbial activity in saltmarsh microcosms // *J. Appl. Ecol.* 1990. V. 27. № 1. P. 159–171.
 26. Li M., Horsman B., Wang N., Lan Wu C.Q. Effects of nitrogen sources on cellgrowth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans* // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2008. V. 81. P. 629–636.
 27. Allen C.A., Wagner W.C. Rhizosphere activity of cattail (*Typha latifolia*) and spike rush (*Eleocharis tuberculosa*) inhabiting an oil spill // *Texas J. Sci.* 2000. V. 52. P. 335–344.
 28. Delaune R.D., DeLaune R.D., Patrick Jr. W.H., Burresh R.J. Effects of crude oil on a Louisiana *Spartina alterniflora* salt marsh // *Environ. Pollut.* 1979. V. 20. Iss. 1. P. 21–31.
 29. Сергаменко С.Н., Федорова И.Л., Игнатова Т.Д. Влияние нефтяного загрязнения на активность почвенных ферментов классов оксидоредуктаз и гидролаз // *Вестн. Ульян. ГСХА*. 2022. № 3. С. 83–88.
 30. Achuba F.I., Peretiemo-Clarke B.O. Effect of spent engine oil on soil catalase and dehydrogenase activities // *Inter. Agrophysics*. 2008. V. 22. P. 1–4.
 31. Uzoiye A.P., Agunwamba J.C. Physiochemical properties of soil in relation to varying rates of crude oil pollution // *J. Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 4. Iss. 3. P. 313–323.
 32. Walker J.D., Seesman P.A., Colwell R.R. Effect of south Louisiana crude oil and no. 2 fuel oil on growth of heterotrophic microorganisms, including proteolytic, lipolytic, chitinolytic and cellulolytic bacteria // *Environ. Pollut.* 1975. V. 9. Iss. 1. P. 13–33.
 33. Wang S., Xu Yan, Lin Zhaofeng, Zhang Jishi, Norbu Namkha, Liu Wei. The harm of petroleum-polluted soil and its remediation research // *AIP Conf. Proceed.* 2017. V. 1864. Iss.1. P. 1–8.
 34. Раськова Н.В. Активность и свойства пероксидазы и полифенолоксидазы в дерново-подзолистых почвах под лесными биоценозами // *Почвоведение*. 1995. № 11. С. 25–30.
 35. Гулько А.Е., Хазиев Ф.Х. Фенолоксидазы почв: продуцирование, иммобилизация, активность // *Почвоведение*. 1992. № 11. С. 145–148.
 36. Коршунова Т.И., Четвериков С.П., Бакаева М.Д., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Четверикова Д.В., Логинов О.Н. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор) // *Прикл. биохим. и микробиол.* 2019. Т. 55. № 4. С. 338–349.
 37. Мязин В.А., Фокина Н.В. Использование биоремедиации для очистки почв от нефтезагрязнения в условиях Кольского Севера // *Сб. научн. тр. «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства»* Краснодар: Кубан.ГАУ им. И.Т. Трубилина, 2017. С. 70–75.
 38. Назаров А.В., Ананьина Л.Н., Ястребова О.В., Плотникова Е.Г. Влияние нефтяного загрязнения на

- бактерии дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1489–1493.
39. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практ. руково. 2-е изд. (эл.). М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2015. 273 с.
 40. Руденко Е.Ю. Биоремедиация нефтезагрязненных почв органическими компонентами отходов пищевой (пивоваренной) промышленности: Дис. ... д-ра биол. наук. Самара, 2015. 352 с.
 41. Gianfreda L., Rao M.A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: a review // Enzyme Microb. Technol. 2004. V. 35. P. 339–354.
 42. Исмаилов Н.М. Микробиология и ферментативная активность нефтезагрязненных почв // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 42–57.
 43. Киреева Н.А., Новоселова Е.И., Хазиев Ф.Х. Ферменты азотного обмена в нефтезагрязненных почвах // Изв. РАН. Сер. биол. 1997. С. 755–759.
 44. Новоселова Е.И. Ферментативная активность почв в условиях нефтяного загрязнения и ее биодиагностическое значение // Теор. и прикл. экол. 2009. № 2. С. 4–12.
 45. Безуглова О.С., Наими О.И., Полиенко Е.А., Лыхман В.А., Дубинина М.Н., Поволоцкая Ю.С., Патрикеев Е.С. Ферментативная активность чернозема обыкновенного при разложении соломы в почве // Усп. совр. естествознания. 2019. № 12. С. 199–204.
 46. Лабутова Н.М., Банкина Т.А. Основы биогеохимии. СПб.: Изд. дом СПбГУ, 2013. 239 с.
 47. Пилецкая О.А., Ячная Д.А. Влияние сроков и способов хранения на изменение активности ферментов черноземовидной почвы Зейск-Буреинской равнины // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2022. Вып. 112. С. 48–72. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-48-72
 48. Турусов В.И., Гармашов В.М., Дьячкова Т.И. Ферментативная активность чернозема обыкновенного в различных севооборотах при разных способах обработки почвы // Агрохимия. 2012. № 9. С. 21–25.
 49. Русанов А.М., Мисетов И.А., Шорина Т.С. К вопросу диагностики и оценки загрязненных нефтью черноземов // Вестн. ТомскГУ. 2012. № 364. С. 219–224.
 50. Воронин А.А., Протасова Н.А., Беспалова Н.С. Динамика ферментативной активности чернозема обыкновенного в условиях полевого стационарного опыта федерального полигона «Каменная степь» // Вестн. ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2006. № 2. С. 122–127.

Effect of Oil and Diesel Fuel Pollution on Enzymatic Activity of Meadow Chernozem-like Soil

O. A. Piletskaya

*Institute of Geology and Nature Management FEB RAS,
Relochny per. 1, Blagoveshchensk 675000, Russia,
E-mail: olgapiletskaya1988@gmail.com*

In the laboratory experiment, the effect of oil pollution on the short-term dynamics of the activity of urease, phosphatase, catalase, peroxidase and polyphenol oxidase of the chernozem soil of the south of the Far East was studied. It was found that when soil was contaminated with oil and petroleum products, urease activity decreased by 20–44% at the end of incubation, peroxidase activity increased by 39–49% in the middle and end of incubation, polyphenol oxidase activity increased 1.6–2.0 times in the middle of incubation. The activity of phosphatase and catalase was stable at different levels of contamination throughout the experiment. Examining the effect of the incubation period, it was found that the maximum activity of urease was on the 10th day, phosphatase – on the 20th, peroxidase – on the 20th and 30th, polyphenol oxidase – on the 30th day of the experiment. Catalase activity was stable throughout all incubation periods. It was shown that in the case of contamination of chernozem-like soil with oil and diesel fuel in doses up to 5000 mg/kg, inhibition of enzymatic activity did not occur in the early stages.

Keywords: chernozem soil, pollution with petroleum products, enzymatic activity, incubation period, Far East.

УДК 631.461.73:632954:632.122.1:546.74

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ШТАММЫ ФОСФАТМОБИЛИЗИРУЮЩИХ РИЗОБАКТЕРИЙ, УСТОЙЧИВЫХ К ГЛИФОСАТУ И НИКЕЛЮ

© 2024 г. Л. Р. Хакимова^{1,2,*}, О. В. Чубукова^{1,3}, Е. С. Акимова¹, З. Р. Вершинина^{1,3}¹Институт биохимии и генетики — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 71, лит. 1Е, Россия²Башкирский государственный медицинский университет Минздрава РФ
450000 Уфа, ул. Ленина, 3, Россия³Уфимский государственный нефтяной технический университет
450044 Уфа, ул. Первомайская, 14, Россия

*E-mail: lili-nigmatullina@bk.ru

Осуществили поиск фосфатрастворяющих ризобактерий, способных расти в присутствии разных концентраций гербицида глифосата и ионов тяжелого металла никеля (Ni^{2+}). С помощью среды Муромцева определена фосфатмобилизующая активность лишь у 3-х из 20-ти штаммов *Rhizobium* spp. — с низким индексом солиubilизации (IS). Напротив, все штаммы *Pseudomonas* spp. показали положительный результат, а самый высокий IS был у *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 и GOR 4.17. Наиболее высокую активность роста при стрессовых условиях показали 4 штамма *Pseudomonas* spp.: OBA 2.4.1, OBA 2.9, 4.17 и STA 3, их рост заметно угнетался при увеличении концентрации глифосата в среде до 10.0 мг/мл. Активность роста штаммов *Rhizobium* spp. характеризовалась как средняя. При росте на среде с NiCl_2 штаммы *Pseudomonas* sp. 65 НМ и 67 НМ росли до концентрации 9 мМ NiCl_2 в среде, при концентрации 11 мМ штамм 67 НМ давал рост в виде единичных колоний. Данные штаммы были выделены из образцов почв, взятых из мест, загрязненных химическими стоками. Возможно, в такой почве уже были хлориды никеля в больших концентрациях, превышающих норму, поэтому именно данные штаммы имели такую высокую устойчивость к ионам никеля. Таким образом, штаммы *Rhizobium* spp. обладали не самыми активными PGPR свойствами, а разные штаммы *Pseudomonas* sp. проявили высокую устойчивость к глифосату и хлориду никеля. Тем самым *Pseudomonas* sp. показали свою высокую способность адаптации к стрессовым условиям. Именно такие PGPR-бактерии (Plant Growth Promoting Rhizo bacteria) можно рассматривать в качестве биологических агентов для повышения эффективности биоремедиации сельскохозяйственных почв.

Ключевые слова: ризобактерии PGPR, *Pseudomonas* sp., *Rhizobium* sp., глифосат, никель.

DOI: 10.31857/S0002188124120116, **EDN:** VUQITA

ВВЕДЕНИЕ

Ризобактерии, способствующие росту растений (PGPR) — это полезные ризосферные свободноживущие микроорганизмы, которые участвуют в стимулировании роста растений. PGPR обитают в ризосфере и корнях растений, благоприятно влияя на их рост и развитие и способствуя антагонизму с фитопатогенами. Такие ризобактерии используют для повышения урожайности сельскохозяйственных культур при нормальных и стрессовых условиях [1]. Они усиливают рост растений за счет создания индуцированной системной устойчивости (ISR), высокой конкурентоспособности, защиты растений от биотических агентов и др. [2]. Ризосфера представляет собой сложную и гетерогенную зону вокруг корней растений, колонизированную многими микроорганизмами, включая

бактерии родов *Pseudomonas* и *Rhizobium*. *Pseudomonas* sp. являются широко распространенными бактериями в ризосферной зоне и обладают многими характеристиками PGPR, включая быстрый рост *in vitro*, высокую конкурентоспособность и колонизацию корневых волосков растений, синтез биологически активных метаболитов, устойчивость к стрессовым ситуациям [3]. *Rhizobium* sp. имеют уникальную способность к азотфиксации в симбиозе с бобовыми растениями [4].

Кроме вышеперечисленных свойств у PGPR-бактерий имеется способность солиubilизировать фосфаты. Описаны штаммы ризобий, включая *R. leguminosarum*, которые способны синтезировать низкомолекулярные органические кислоты, которые действуют на неорганический фосфор [5].

Биоремедиация подразумевает использование способности микроорганизмов разлагать органические загрязнители, в том числе и остатки гербицидов, присутствующие в загрязненных пахотных почвах, и параллельно повышать плодородие почв и урожайность сельскохозяйственных культур [4, 6]. В настоящее время чрезмерное использование гербицидов угрожает равновесию почвенных экосистем и может негативно влиять на рост растений [7]. Глифосат (N-(фосфонометил) глицин) является наиболее эффективным и широко используемым гербицидом во всем мире, и его использование растет с каждым годом [8–10]. Остатки глифосата обнаруживают в воде, почве, воздухе и грунтовых водах, а также в продуктах питания [11]. Согласно многим исследованиям, глифосат воздействует на репродуктивную систему лабораторных крыс, при этом негативное влияние проявляется в поколениях F2 и F3, на которых не было прямого воздействия глифосата [12, 13]. Известно, что этот гербицид вызывает нарушение в почвенной экосистеме и микробиоте кишечника млекопитающих, домашних птиц, рептилий, а также медоносных пчел [14–17]. Наиболее перспективной и экологичной стратегией удаления таких гербицидов из окружающей среды является микробная деградация [18]. Например, показано, что некоторые бактерии могут превращать пестициды в биохимические строительные блоки, необходимые для цикла Кребса и гликолиза [6].

Кроме гербицидов большую опасность для окружающей среды представляют и тяжелые металлы (ТМ). Поиск штаммов PGPR, устойчивых к ТМ, является наиболее актуальным вопросом в биоремедиации. Такие бактерии способны смягчать токсическое воздействие ТМ на растения путем различных механизмов, таких как внутриклеточная и внеклеточная секвестрация, биоаккумуляция, биоаугментация и т.д. [19, 20]. Таким образом, улучшение взаимодействия растений и PGPR может способствовать успешной фиторемедиации за счет усиления роста растений и производства биомассы в неблагоприятных условиях окружающей среды [21].

Цель работы – поиск фосфатрастворяющих ризобактерий, способных расти в присутствии глифосата и загрязнения никелем.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Все исследованные штаммы взяты из коллекции ризосферных бактерий «Симбионт» (ИБГ УФИЦ РАН, Уфа). Бактериальные штаммы из рода *Rhizobium*: TRe 1 TRe 3, TRe 5, TRe 7, TRe 14, GOR3, GOR18, GOR7, GOR23, GOR25, TMe 9, TPr 6 были выделены из клубеньков корней растений видов семейства Бобовые (Fabaceae). Бактериальные штаммы рода *Pseudomonas*: *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 и *Pseudomonas* sp.

OBA 2.9 выделены из ризосферы растений Южного Урала – остролодочника башкирского (*Oxytropis baschkirensis*), *Pseudomonas* sp. GOR4.17 – из ризосферы козлятника восточного (*Galega orientalis*), *Pseudomonas* sp. STA 3 – из ризосферы стальника колючего (*Ononis spinosa*) [22]. Бактериальные штаммы *Pseudomonas* sp. 17 НМ, 65 НМ и 67 НМ выделены из образцов почв, взятых из мест, загрязненных химическими стоками.

Определение минимальной ингибирующей концентрации глифосата для исследованных штаммов определяли путем постановки *in vitro* экспериментов в 3-х повторностях на твердой питательной среде *LB* для *Pseudomonas* spp. (масс.% в водном растворе: бактотриптон – 1, дрожжевой экстракт – 0.5, NaCl – 0.5, агар – 1) и *YM* для *Rhizobium* spp. (масс.% в водном растворе: маннитол – 1, дрожжевой экстракт – 0.04, NaCl – 0.01, MgSO₄–0.01, K₂HPO₄·3H₂O – 0.05, CaCl₂– 0.03). Глифосат готовили из гербицида «Торнадо-500» («Август», Россия), в качестве исходного раствора использовали 50%-ный стерильный разведенный препарат. Затем культуру клеток выращивали в чашках Петри с добавлением глифосата в конечных концентрациях 3.0, 6.0, 8.0, 10.0 мг/мл. После инкубации в термостате в течение 24–48 ч при 28 °C рассматривали рост бактериальных клеток.

Способность ризобактерий к росту в присутствии NiCl₂ исследовали также на средах *LB* и *YM* при концентрациях 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 мМ (до 11.0 мМ для отдельных штаммов). После инкубации в термостате в течение 24–48 ч при 28 °C рассматривали рост бактериальных колоний.

Способность штаммов ризобактерий к мобилизации неорганического фосфора оценивали по образованию зоны просветления вокруг колоний, выросших в чашках Петри со средой Муромцева (глюкоза 10 г/л, аспарагин 1 г/л, K₂SO₄ 0.2 г/л, MgSO₄ 0.2 г/л, кукурузный экстракт 0.02 г/л, агар 20 г/л, pH 6.8), содержащей нерастворимый фосфат. В качестве нерастворимых фосфатов использовали Ca₃(PO₄)₂ или AlPO₄, которые в качестве единственного источника фосфора добавляли в среду в концентрации 5 г/л [23]. Суточную культуру бактерий наносили в виде капли на поверхность агаризованной среды, инкубировали при температуре 28 °C и оценивали результат через 3 сут для *Pseudomonas* spp., для *Rhizobium* spp. – через 5 сут. Затем измеряли индекс солюбилизации (*IS*) с помощью формулы $IS = \frac{\text{Ø гало (мм)}}{\text{Ø колоний (мм)}}$.

Эксперименты проводили в 3-х биологических и 3-х аналитических повторностях. Результаты обрабатывали с использованием пакета Microsoft Office Excel 2010. Представленные данные имеют соответствующие доверительные интервалы при уровне доверительной вероятности равной 0.95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованные бактериальные штаммы были выделены из совершенно разных источников: *Rhizobium* spp. — из клубеньков разных бобовых растений, 4 штамма *Pseudomonas* spp. — из ризосферы разных видов растений, 3 штамма *Pseudomonas* spp. — из образцов почв, взятых из мест, загрязненных химическими стоками.

Использование фосфатсолюбилизирующих ризобактерий, повышающих доступность почвенного фосфора для сельскохозяйственных культур, может рассматриваться как экологически чистая альтернатива чрезмерному использованию минеральных удобрений [24].

На начальных этапах исследования были проведены все исследованные штаммы на способность солифицировать неорганический фосфор. Показали, что практически все штаммы *Pseudomonas* spp. могут растворять фосфат кальция. Однако ни один из исследованных штаммов ризобактерий не был способен растворять фосфат алюминия (рис. 1). Соответственно бактериальные штаммы могут расщеплять не все нерастворимые фосфаты.

Для ризобактерий был посчитан индекс солюбилизации фосфата кальция (табл. 1).

В результате лишь у 3-х штаммов *Rhizobium* spp. обнаружена солюбилизация фосфата кальция с низким *IS*, а штаммы *Pseudomonas* spp. показали положительную фосфатмобилизующую активность, самый высокий *IS* отмечен у *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 и GOR4.17.

Устойчивость ризобактерий к гербициду глифосату. При культивировании *in vitro* на средах с возрастающими концентрациями глифосата было отмечено, что многие фосфатрастворяющие ризобактерии были способны расти в присутствии гербицида до концентрации 8.0 мг/мл в среде (табл. 2, рис. 2).

Наиболее высокий рост в стрессовых условиях показали 4 штамма *Pseudomonas* spp.: OBA 2.4.1, OBA 2.9, 4.17 и STA 3, все они выделены из ризосферы разных видов растений. Их рост заметно угнетался лишь при увеличении концентрации глифосата до 10.0 мг/мл в среде. Активность роста штаммов *Rhizobium* spp. можно охарактеризовать как среднюю.

Хотя в нашем случае штаммы *Rhizobium* spp. не показали высокую устойчивость к глифосату,

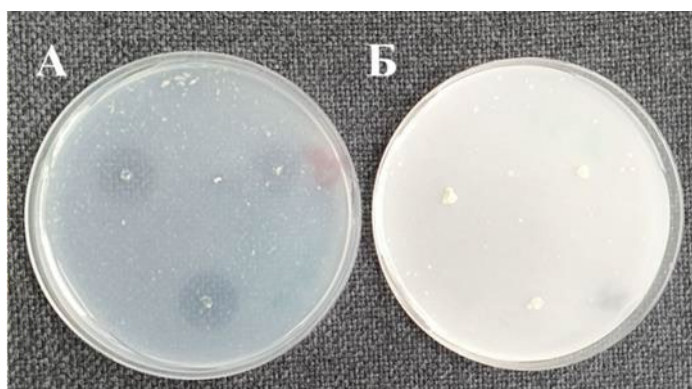


Рис. 1. Определение фосфатмобилизующей активности штамма на среде Муромцева с разными фосфатами: (а) — с добавлением $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, (б) — с добавлением AlPO_4 .

Таблица 1. Индекс солюбилизации (*IS*) фосфата кальция разными штаммами ризобактерий

Штамм	Индекс солюбилизации (<i>IS</i>)
<i>Pseudomonas</i> sp. OBA 2.4.1	3.7 ± 0.3
<i>Pseudomonas</i> sp. OBA 2.9	1.9 ± 0.2
<i>Pseudomonas</i> sp. GOR4.17	3.58 ± 0.12
<i>Pseudomonas</i> sp. STA 3	1.5 ± 0.3
<i>Pseudomonas</i> sp. 17 HM	2.9 ± 0.2
<i>Pseudomonas</i> sp. 65 HM	1.3 ± 0.1
<i>Pseudomonas</i> sp. 67 HM	1.1 ± 0.1
<i>R. leguminosarum</i> TPr 6	2.9 ± 0.2
<i>R. leguminosarum</i> G3	1.3 ± 0.1
<i>R. leguminosarum</i> Г15.2	1.1 ± 0.1
<i>R. leguminosarum</i> Л4	1.2 ± 0.3

Таблица 2. Показатели роста ризобактерий в зависимости от содержания глифосата в среде

Штамм	Концентрация глифосата в питательной среде, мг/мл				
	1.5	3.0	6.0	8.0	10.0
<i>Pseudomonas</i> sp. OBA 2.4.1	+++*	+++	++	+	—
<i>Pseudomonas</i> sp. OBA 2.9	+++	+++	++	+	—
<i>Pseudomonas</i> sp. GOR4.17	+++	+++	++	+	—
<i>Pseudomonas</i> sp. STA 3	+++	+++	++	+	—
<i>Pseudomonas</i> sp. 17 HM	+++	++	—	—	—
<i>Pseudomonas</i> sp. 65 HM	++	+	—	—	—
<i>Pseudomonas</i> sp. 67 HM	+	+	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 1	+++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 3	+++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 5	+++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 7	+++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 14	++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR3	+	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR7	+	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR18	++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR23	++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR25	++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> TMe 9	++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> TPr 6	+	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> Thy 6	++	++	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> MLu 30	++	+	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> G3	++	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> K14	+	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> K25	+	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> Г15.2	++	+	+	—	—
<i>R. leguminosarum</i> Л4	+	+	+	+	—
<i>R. leguminosarum</i> Л6	+	+	+	—	—

* +++ хороший рост, ++ средний рост, + слабый рост, прочерк – нет роста. То же в табл. 3.

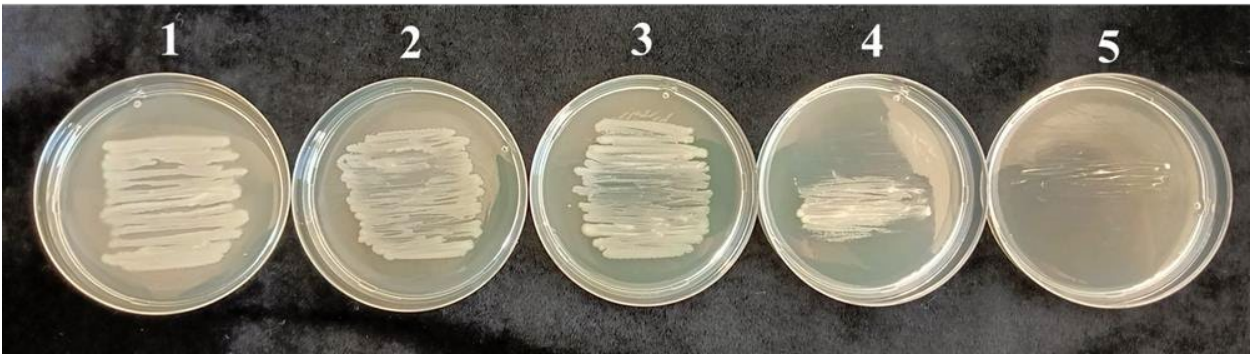


Рис. 2. Рост штаммов ризобактерий на примере *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 при стрессовом воздействии глифосата: 1 – контроль, 2–3.0, 3–6.0, 4–8.0, 5–10.0 мг/мл.

в литературе, например, описан штамм *Rhizobium* sp. P44RR-XXIV из ризосферы *Lotus corniculatus* L., способный метаболизировать глифосат в высоких концентрациях [25]. Однако многочисленные исследования показали, что бесконтрольное применение

глифосата отрицательно влияет на процесс фиксации азота растениями за счет уменьшения популяции бактерий *Rhizobium* sp., т.к. рост ризобий ингибируется даже при рекомендуемых концентрациях гербицида в почве [26, 27].

Бактерии рода *Pseudomonas*, напротив, относят к микроорганизмам, способным эффективно разлагать глифосат и различные ТМ [28, 29]. Например, показана возможность *Pseudomonas* sp. QJX-1 [30] и других штаммов *Pseudomonas* sp. (GA07, GA09 и GC04) использовать глифосат в качестве источников питания для своего роста [31]. Штаммы *P. nitroreducens* FY43 и FY47 показали устойчивость к глифосату в концентрации до 32 раз больше, чем при внесении в землю при обработке. Они были выделены из почвы, в которую в течение длительного времени вносили данный гербицид [32]. Все это дает возможность полагать, что использование псевдомонад для биодegradации глифосата может быть эффективным методом утилизации токсичных соединений из окружающей среды.

Рост ризобактерий в присутствии никеля. В литературе описаны фосфатрастворяющие штаммы, резистентные к ТМ. Были выделены *P. fluorescens* TL97

и *P. putida* TL80, устойчивые к AsNaO_2 и *R. radiobacter* TL52, который был устойчив к высоким концентрациям хлорида ртути [33]. Показано, что бактерии рода *Rhizobium* способны расти в присутствии разных ТМ, включая цинк, свинец и кадмий [34]. Поэтому было решено рассмотреть рост исследованных штаммов ризобактерий на средах, содержащих различные концентрации NiCl_2 (табл. 3).

Наибольшую устойчивость к ТМ показали штаммы *Pseudomonas* spp., выделенные из образцов почв, взятых из мест, загрязненных химическими стоками: 17 НМ, 65 НМ и 67 НМ (рис. 3).

Минимальное ингибирование роста этих штаммов наблюдали при концентрации хлорида никеля 7 мМ, штаммы 65 НМ и 67 НМ росли до 9 мМ NiCl_2 в среде, при концентрации хлорида никеля 11 мМ штамм 67 НМ показал рост в виде единичных колоний. Скорее всего, в такой почве уже были хлориды никеля в больших концентрациях, превышающих

Таблица 3. Показатели роста ризобактерий в зависимости от содержания NiCl_2 в среде

Исследованный штамм	Концентрация NiCl_2 в питательной среде, мМ				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
<i>Pseudomonas</i> sp. OBA 2.4.1	+++*	+++	++	+	—
<i>Pseudomonas</i> sp. OBA 2.9	+++	++	+	—	—
<i>Pseudomonas</i> sp. GOR4.17	+++	++	+	—	—
<i>Pseudomonas</i> sp. STA 3	+++	++	+	—	—
<i>Pseudomonas</i> sp. 17 НМ	+++	+++	++	++	++
<i>Pseudomonas</i> sp. 65 НМ	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Pseudomonas</i> sp. 67 НМ	+++	+++	+++	+++	+++
<i>R. leguminosarum</i> TRe 1	+	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 3	+	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 5	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 7	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> TRe 14	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR3	+	+	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR7	+	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR18	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR23	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> GOR25	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> TMe 9	+	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> TPr 6	++	+	+	+	+
<i>R. leguminosarum</i> Thy 6	+	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> MLu 10	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> G3	+	+	+	+	+
<i>R. leguminosarum</i> K14	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> K25	—	—	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> Г15.2	+	+	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> Л4	+	+	—	—	—
<i>R. leguminosarum</i> Л6	—	—	—	—	—

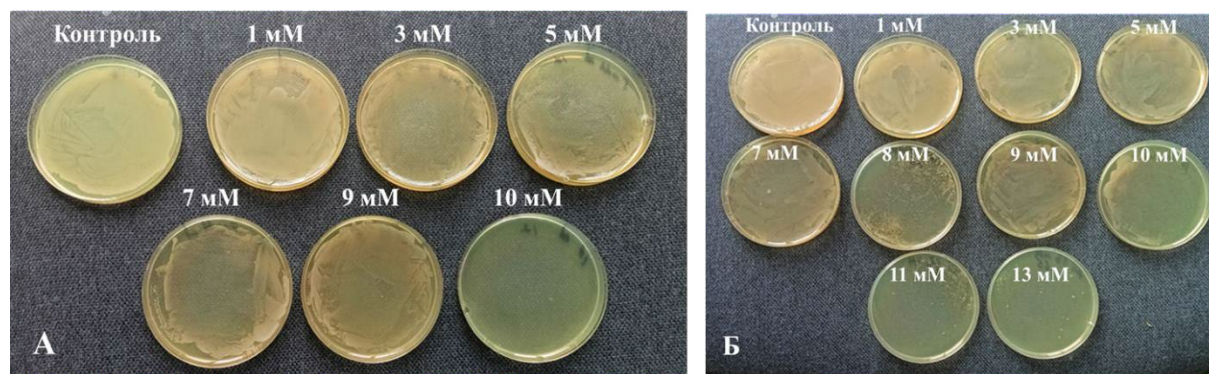


Рис. 3. Рост штаммов *Pseudomonas* sp. 65 HM (а) и 67 HM (б) на среде с добавлением NiCl_2 .

норму, поэтому именно данные штаммы имели такую высокую устойчивость к ионам никеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время агрохимикаты, в частности, глифосат, а также тяжелые металлы (ТМ) являются одними из основных экологических проблем в аграрной сфере. В будущем снижения объемов применения гербицидов в сельском хозяйстве не намечается, а аккумуляция ТМ в почве только возрастет. Поэтому необходимы способы разработки биотехнологического инструмента для эффективной биodeградации гербицидов и ТМ в сельскохозяйственных почвах.

В нашем исследовании рассмотрели 27 ризосферных штаммов бактерий, выделенных из разных источников, относящихся к родам *Rhizobium* и *Pseudomonas*. Показано, что именно *Pseudomonas* spp. обладали фосфатмобилизующей активностью, тогда как у *Rhizobium* spp. положительной активностью обладали лишь несколько штаммов с низким индексом солубилизации. Высокую устойчивость к хлориду никеля показали именно штаммы *Pseudomonas* sp. 17 HM, 65 HM и 67 HM, выделенные из образцов почв, взятых из мест, загрязненных химическими стоками. Таким образом, ризосферные бактерии, имеющие PGPR свойства и устойчивые к различным ТМ и агрохимикатам, могут защищать растения от токсичности окружающей среды и стимулировать их рост даже при неблагоприятных условиях. Поскольку такие бактерии как *Pseudomonas* sp. хорошо адаптированы к таким стрессовым условиям, их можно использовать в качестве биоинкулянтов почв, загрязненных ТМ, что представляет собой биологическую альтернативу для повышения эффективности фиторемедиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ali B., Wang X., Saleem M. H., Sumaira, Hafeez A., Afridi M.S., Khan S., Zaib-Un-Nisa, Ullah I., Amaral Júnior A.T. PGPR-mediated salt tolerance in maize by modulating plant physiology, antioxidant defense, compatible solutes accumulation and bio-surfactant producing genes // *Plants*. 2022. V. 11. P. 345. <https://doi.org/10.3390/plants11030345>
2. Afridi M.S., Ali S., Salam A., César Terra W., Hafeez A., Sumaira, Ali B., S. AlTami M., Ameen F., Ercisli S., Marc R.A., Medeiros F.H.V., Karunakaran R. Plant microbiome engineering: Hopes or hypes // *Biology*. 2022. V. 11. P. 1782. <https://doi.org/10.3390/biology11121782>
3. Morris C.E., Lamichhane J.R., Nikolić I., Stanković S., Moury B. The overlapping continuum of host range among strains in the *Pseudomonas syringae* complex // *Phytopathol. Res.* 2019. V. 1. P. 4. <https://doi.org/10.1186/s42483-018-0010-6>
4. Motamedi M., Zahedi M., Karimmojeni H., Baldwin T.C., Motamedi H. Rhizosphere-associated bacteria as biofertilizers in herbicide-treated alfalfa (*Medicago sativa*) // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2023. V. 23. P. 2585–2598. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01214-6>
5. Gopalakrishnan S., Sathya A., Vijayabharathi R., Varshney R.K., Gowda C.L., Krishnamurthy L. Plant growth promoting rhizobia: challenges and opportunities // *Biotechnology*. 2015. V. 5(4). P. 355–377. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0241-x>
6. Akbar S., Sultan S. Soil bacteria showing a potential of chlorpyrifos degradation and plant growth enhancement // *Brazil. J. Microbiol.* 2016. V. 47. P. 563–570. <https://doi.org/10.1016/J.BJM.2016.04.009>
7. Bocker T., Mohring N., Finger R. Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production // *Agric. Syst.* 2019. V. 173. P. 378–392. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.03.001>
8. Tang F.H.M., Lenzen M., McBratney A., Maggi F. Risk of pesticide pollution at the global scale // *Nat. Geosci.* V. 2021. № 14. P. 206–210. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5>
9. Maggi F., la Cecilia D., Tang F.H.M., McBratney A. The global environmental hazard of glyphosate

- use // Sci. Total. Environ. 2020. V. 717. P. 137167.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137167>
10. Wang L., Deng Q., Hu H., Liu M., Gong Z., Zhang S., Xu-Monette Z.Y., Lu Z., Young K.H., Ma X., Li Y. Glyphosate induces benign monoclonal gammopathy and promotes multiple myeloma progression in mice // J. Hematol. Oncol. 2019. V. 12. № 70. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1186/s13045-019-0767-9>
11. Zoller O., Rhyh P., Rupp H., Zarn J. A., Geiser C. Glyphosate residues in Swiss market foods: monitoring and risk evaluation // Food Addit. Contam. Part B. 2018. V. 11. № 2. P. 83–91.
<https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1419509>
12. Li J., Chen W. J., Zhang W., Zhang Y., Lei Q., Wu S., Huang Y., Mishra S., Bhatt P., Chen S. Effects of free or immobilized bacterium *Stenotrophomonas acidaminiphila* Y4B on glyphosate degradation performance and indigenous microbial community structure // J. Agric. Food Chem. 2022. V. 70. № 43. P. 13945–13958.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c05612>
13. Kubsad D., Nilsson E.E., King S.E., Sadler-Rigglesman I., Beck D., Skinner M.K. Assessment of glyphosate induced epigenetic transgenerational inheritance of pathologies and sperm epimutations: generation-al toxicology // Sci. Rep. 2019. V. 9. № 1. P. 6372.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-42860-0>
14. Aitbali Y., Ba-M'hamed S., Elhidar N., Nafis A., Sora N., Bennis M. Glyphosate based-herbicide exposure affects gut microbiota, anxiety and depression-like behaviors in mice // Neurotoxicol. Teratol. 2018. V. 67. P. 44–49.
<https://doi.org/10.1016/j.ntt.2018.04.002>
15. Kittle R.P., McDermid K.J., Muehlstein L., Balazs G.H. Effects of glyphosate herbicide on the gastrointestinal microflora of Hawaiian green turtles (*Chelonia mydas*) Linnaeus // Mar. Pollut. Bull. 2018. V. 127. P. 170–174.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.030>
16. Blot N., Veillat L., Rouz, R., Delatte H. Glyphosate, but not its metabolite AMPA, alters the honeybee gut microbiota // PLoS One. 2019. V. 14. № 4. e0215466.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215466>
17. Zhang F., Qiao Z., Yao C., Sun S., Liu W., Wang J. Effects of the novel HPPD-inhibitor herbicide QYM201 on enzyme activity and microorganisms, and its degradation in soil // Ecotoxicology. 2021. V. 30. P. 80–90.
<https://doi.org/10.1007/s10646-020-02302-4>
18. Castrejón-Godínez M.L., Tovar-Sánchez E., Valencia-Cuevas L., Rosas-Ramírez M.E., Rodríguez A., Mus-sali-Galante P. Glyphosate pollution treatment and microbial degradation alternatives, a review // Microorganisms. 2021. V. 9. № 11. P. 2322.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9112322>
19. Jayaram S., Ayyasamy P.M., Aishwarya K.P., Devi M.P., Rajakumar S. Mechanism of microbial detoxification of heavy metals: A review // J. Pure Appl. Microbiol. 2022. V. 16(3). P. 1562–1574.
<https://doi.org/10.22207/JPAM.16.3.64>
20. El Alaoui A., Raklami A., Bechtaoui N., El Ghar-mali A., Ouhammou A., Imzilen B., Achouak W., Pajue-lo E., Oufdou K. Use of native plants and their associated bacteria rhizobionomes to remediate-restore Draa Sfar and Kettara mining sites // Environ. Monitor. Assess., Morocco. 2021. V. 193(4). P. 232.
<https://doi.org/10.1007/s10661-021-08977-4>
21. Madline A., Benidire L., Boularbah A. Alleviation of salinity and metal stress using plant growth-promoting rhizobacteria isolated from semiarid Moroccan copper-mine soils // Environ. Sci. Pollut. Res. 2021. V. 47. P. 67185–67202.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-15168-8>
22. Чубукова О.В., Хакимова Л.Р., Акимова Е.С., Вер-шинина З.Р. Филогения и свойства новых штам-мов *Pseudomonas* sp. из ризосферы бобовых рас-тений Южного Урала // Микробиология. 2022. Т. 91. № 5. С. 537–546 .
<https://doi.org/10.31857/S0026365622100196>
23. Егоришина А.А., Хайруллин Р.М., Лукьянцев М.А., Курамышина З.М., Смирнова Ю.В. Фосфатмоби-лизующая активность эндофитных штаммов *Bacil-lus subtilis* и их влияние на степень микоризации корней пшеницы // Журн. СибирФУ. Биология. 2011. Т. 4. № 2. С. 172–182.
24. Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Коршунова Т.Ю. Фосфатсольюбилизирующие бактерии рода *Pseudomonas* и эффективность их применения для увеличения доступности фосфора // Изв. УфНЦ РАН. 2021. № 3. С. 11–16.
<https://doi.org/10.31040/2222-8349-2021-0-3-11-16>
25. Massot F., Gkorezis P., Van Hamme J., Marino D., Tri-funovic B.S., Vukovic G., d'Haen J., Pintelon I., Gi-ulietti A.M., Merini L., Vangronsveld J., Thijs S. Iso-lation, biochemical and genomic characterization of glyphosate tolerant bacteria to perform microbe-as-sisted phytoremediation // Front Microbiol. 2021. V. 11. P. 598507.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.598507>
26. Aynalem B., Assefa F. Effect of glyphosate and man-cozeb on the rhizobia isolated from nodules of *Vicia faba* L. and on their N₂-fixation, North Showa, Am-hara Regional State, Ethiopia // Adv. Biol. 2017.
<https://doi.org/10.1155/2017/5864598>
27. Asrat A., Sitotaw B., Dawoud T.M., Nafidi H.A., Bourhia M., Mekuriaw A., Wondmie G.F. Effect of glyphosate on the growth and survival of rhizobia isolated from root nodules of grass pea (*Lathyrus sativus* L.) // Sci. Rep. 2023. V. 13(1). P. 21535.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-48424-7>
28. Masotti F., Garavaglia B.S., Piazza A., Burdisso P., Alt-abe S., Gottig N., Ottado J. Bacterial isolates from Ar-gentine Pampas and their ability to degrade glypho-sate // Sci. Total. Environ. 2021. V. 774. P. 145761.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145761>

29. Oleńska E., Małek W., Wójcik M., Szopa S., Swiecicka I., Aleksandrowicz O., Włostowski T., Zawadzka W., Sillen W.M.A., Vangronsveld J., Cholakova I., Langill T., Thijs S. Bacteria associated with Zn-hyperaccumulators *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis arenosa* from Zn–Pb–Cd waste heaps in Poland as promising tools for bioremediation // *Sci. Rep.* 2023. V. 13(1). P. 12606.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-39852-6>
30. Yu J., Jin B., Ji Q., Wang H. Detoxification and metabolism of glyphosate by a *Pseudomonas* sp. via biogenic manganese oxidation // *J. Hazard Mater.* 2023. V. 448. P. 130902.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130902>
31. Zhao H., Tao K., Zhu J., Liu S., Gao H., Zhou X. Bioremediation potential of glyphosate-degrading *Pseudomonas* spp. strains isolated from contaminated soil // *J. Gen. Appl. Microbiol.* 2015. V. 61. № 5. P. 165–170.
<https://doi.org/10.2323/jgam.61.165>
32. Tan X.L., Othman R.Y., Teo C.H. Isolation and functional characterization of 5-enolpyruvylshikimate 3-phosphate synthase gene from glyphosate-tolerant *Pseudomonas nitroreducens* strains FY43 and FY47 // *Biotechnology.* 2020. V. 10(4). P. 183.
<https://doi.org/10.1007/s13205-020-02176-7>
33. Rojas-Solis D., Larsen J., Lindig-Cisneros R. Arsenic and mercury tolerant rhizobacteria that can improve phytoremediation of heavy metal contaminated soils // *PeerJ.* 2023. V. 11. e14697.
<https://doi.org/10.7717/peerj.14697>
34. Oleńska E., Małek W., Sujkowska-Rybikowska M., Szopa S., Włostowski T., Aleksandrowicz O., Swiecicka I., Wójcik M., Thijs S., Vangronsveld J. An alliance of *Trifolium repens*–*Rhizobium leguminosarum* bv. trifolii-mycorrhizal fungi from an old Zn–Pb–Cd rich waste heap as a promising tripartite system for phytostabilization of metal polluted soils // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. P. 853407.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.853407>

Promising Strains of Phosphate-Mobilizing Rhizobacteria Resistant to Glyphosate and Nickel

L. R. Khakimova^{a,b,#}, O. V. Chubukova^{a,c}, E. S. Akimova^a, Z. R. Vershinina^{a,c}

^a*Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center, RAS,
prosp. Oktyabrya 71, Ufa 450054, Russia*

²*Ufa State Petroleum Technological University,
ul. Kosmonavtov 1, Ufa 450062, Russia*

^c*Ufa State Petroleum Technical University,
ul. Pervomaiskaya 14, Ufa 450044, Russia,*

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

A search was carried out for phosphate-soluble rhizobacteria capable of growing in the presence of different concentrations of the herbicide glyphosate and nickel heavy metal ions (Ni²⁺). Using the Muromtsev medium, the phosphate-mobilizing activity was determined only in 3 out of 20 strains of *Rhizobium* spp. – with a low solubilization index (*IS*). On the contrary, all strains of *Pseudomonas* sp. showed a positive result, and the highest *IS* was in *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 and GOR 4.17. The highest growth activity under stressful conditions was shown by 4 strains of *Pseudomonas* spp.: OBA 2.4.1, OBA 2.9, 4.17 and STA 3, their growth was noticeably inhibited with an increase in the concentration of glyphosate in the medium to 10.0 mg/ml. The growth activity of *Rhizobium* spp. strains was characterized as average. When growing on a medium with NiCl₂, *Pseudomonas* strains sp. 65 HM and 67 HM grew to a concentration of 9 mM NiCl₂ in the medium, at a concentration of 11 mM, strain 67 HM gave growth in the form of single colonies. These strains were isolated from soil samples taken from sites contaminated with chemical effluents. It is possible that nickel chlorides were already present in such soil in high concentrations exceeding the norm, that is why these strains had such high resistance to nickel ions. Thus, *Rhizobium* sp. strains did not have the most active PGPR properties, but different strains of *Pseudomonas* sp. showed high resistance to glyphosate and nickel chloride. Thus, *Pseudomonas* sp. they demonstrated their high ability to adapt to stressful conditions. It is such PGPR bacteria (Plant Growth Promoting Rhizo bacteria) that can be considered as biological agents to increase the efficiency of bioremediation of agricultural soils.

Keywords: rhizobacteria PGPR, *Pseudomonas* sp., *Rhizobium* sp., glyphosate, nickel.

УДК 631.85:631.421.1

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ РОССИИ, ВЕЛИКОБРИТАНИИ И КИТАЕ¹

© 2024 г. А. Н. Налиухин^{1,*}, Н. А. Кирпичников², С. П. Бижан², Ю. Е. Гусева¹¹ *Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
127434 Москва, ул. Прянишникова, 6, Россия*² *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия***E-mail: naliuhin@yandex.ru*

Представлены результаты исследований в длительных полевых опытах по изучению эффективности фосфорных удобрений. Все эксперименты были заложены по классической схеме и включали в себя помимо контрольного варианта (без удобрений) азотно-калийный фон, на котором изучали эффективность фосфорных удобрений. При этом в каждом опыте учитывали региональную специфику: известкование – на опытной станции Всероссийского НИИ агрохимии (Россия), эффективность фосфорных удобрений при возрастающих дозах азота N100–300 – на Ротамстедской опытной станции (Великобритания), сочетание фосфорных удобрений с навозом на Китайской национальной базе мониторинга плодородия почв. В длительных опытах представлена динамика изменения содержания подвижного фосфора, а также отдельных фракций с учетом складывающегося баланса P_2O_5 . Показано, что перераспределение фосфора между различными фракциями почв носит обратимый характер, а направленность процессов зависит от складывающегося баланса P_2O_5 . Фосфор, накопленный в более прочно удерживаемых формах, впоследствии может высвободиться и поглощаться выращиваемыми сельскохозяйственными культурами. Во всех полевых опытах наблюдали увеличение разрыва в урожайности между вариантами НК и НК + P с течением времени. С одной стороны, это обусловлено значительным уменьшением содержания фосфора в фоновом варианте НК (в кислых почвах – еще и увеличением подвижности Al), в котором вынос фосфора значительно превосходит контроль (без удобрений), с другой – существенным повышением содержания P_2O_5 в почве при положительном балансе. В длительном эксперименте на опытной станции ВНИИ агрохимии разностный коэффициент использования фосфора из удобрений составил 25–27, Ротамстедской станции – 25–41, Китайской национальной базы мониторинга плодородия почв – 45%. Обращает на себя внимание высокая окупаемость фосфорных удобрений в опытах на Ротамстедской опытной станции (Великобритания) – 22–39 кг зерна/кг P_2O_5 (при возделывании озимой пшеницы в севообороте). Главным приемом повышения окупаемости в этом случае было применение высоких доз азота – до 200 кг N/га. Исследования показали, что существенными приемами повышения эффективности фосфорных удобрений является известкование кислых почв до слабокислой реакции, использование цинковых микроудобрений, а также фосфатмобилизирующих микроорганизмов.

Ключевые слова: фосфорные удобрения, длительный полевой опыт, фосфатный режим почв, баланс фосфора, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188124120128, **EDN:** VUJQJX

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор, наряду с азотом и калием, считается наиболее важным питательным элементом для роста и развития растений, определяющим величину и качество урожая сельскохозяйственных культур.

¹Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

В вегетирующих растениях большая часть фосфора сосредоточена в молодых тканях и органах, а по мере созревания наибольшее его количество накапливается в товарной части урожая. Фосфор входит в состав органических соединений: нуклеиновых кислот, АТФ, многочисленных фосфорных эфиров углеводов, липидов, липопротеидов, фитина и других. Небольшая его часть содержится в минеральной форме. В целом, фосфор играет ключевую роль в передаче

наследственной информации, метаболизме, структуре и преобразовании энергии в растениях [1].

Проблемы оптимизации фосфатного режима и физико-химических свойств почв являются ключевыми не только для земледелия России, но и всех стран мира. Суммарные разведанные запасы фосфатного сырья в России на сегодняшний день составляют 1 млрд 213 млн т P_2O_5 , что с учетом добычи фосфатов на уровне 13–14 млн т/год хватит на 89 лет [2]. В среднем в мире при сохраняющихся объемах добычи фосфатных руд разведанных запасов хватит на 320-летний период [3].

Ввиду низких коэффициентов использования фосфора из удобрений, их высокой стоимости, а также ограниченности запасов фосфатных руд, необходимо увеличивать эффективность фосфорных удобрений, которая зависит от почвенно-климатических условий, свойств удобрений, биологических особенностей сельскохозяйственных культур.

Фосфорные удобрения обладают длительным последействием, особенно при внесении в дозах, превышающих вынос P_2O_5 урожаем. Именно поэтому изменение эффективности удобрений со временем можно выявить только в длительных стационарных полевых опытах [4]. Несомненным представляется интерес сравнение эффективности фосфорных удобрений в различных странах мира, изучение современных подходов к оценке фосфатного режима почв.

Именно поэтому в настоящем обзоре рассмотрены 4 длительных эксперимента, заложенных в России (опытная станция ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова), Великобритании (Ротамстедская опытная станция) и Китае (Национальный центр мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений черноземных почв (Black Soil)). Следует отметить, что все рассмотренные опыты имеют контроль (без удобрений) и азотно-калийный фон, что особенно важно для оценки эффективности фосфорных удобрений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ

Российская Федерация. Несмотря на большой объем выпускаемых фосфорных удобрений (4.4 млн т P_2O_5 в 2022 г.), в России под сельскохозяйственные культуры ежегодно вносят порядка 0.8 млн т P_2O_5 , что составляет всего 18% от производства [5]. За последние 30 лет (1991–2020 гг.) превышение выноса фосфора урожаем над поступлением с удобрением составило 14 млн т д.в. или 6 кг P_2O_5 /га пашни. Возмещение выноса составляет всего 65%. При ежегодном отрицательном балансе фосфора отмечена тенденция к увеличению доли низкообеспеченных

фосфором почв. Только в Нечерноземной зоне площади с низким содержанием подвижного фосфора возросли на 30% [6, 7].

С учетом планируемого дальнейшего роста урожайности сельскохозяйственных культур вынос фосфора будет увеличиваться с 10–12 до 20–22 кг/га пашни, что с учетом научно обоснованной потребности в компенсации выноса P_2O_5 на 100% и площади пашни 85.0 млн га потребует ежегодного внесения 1.7–1.9 млн т P_2O_5 . Таким образом, 40% производимых в России фосфорных удобрений должно быть использовано на внутреннем рынке.

Ввиду того, что 1/3 пахотных почв России имеет кислую реакцию среды, неблагоприятную для возделывания сельскохозяйственных культур, и низкую обеспеченность подвижным фосфором, исследования ученых-агрохимиков были сосредоточены на изучении возможности сочетания известкования с применением фосфорных удобрений.

В длительном полевом опыте Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии (год закладки – 1966 г.) изучили влияние фосфорных удобрений и периодического известкования разными дозами $CaCO_3$ на урожайность зерновых культур и фосфатный режим слабоокультуренной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (подстилаящая порода – покровная глина). Исходные агрохимические показатели были следующими: pH_{KCl} 4.0 ед., H_r – 4.4 мг-экв/100 г, сумма оснований – 7.5–8.2 мг-экв/100 г, содержание подвижных форм P_2O_5 и K_2O (по Кирсанову) – 39–42 и 110–115 мг/кг соответственно, гумуса – 1.64–1.67% [8].

В 1-й и 2-й ротациях севооборот был следующим: вико-овсяная смесь – озимая пшеница с подсевом клевера – клевер 1-го года пользования – картофель – ячмень. С 3-й и до 6-й ротации севооборот был следующим: озимая пшеница – картофель – ячмень + клевер, – клевер 2-х лет пользования. В 6-й ротации картофель был исключен из севооборота. В настоящее время (с 12-й ротации) ведется следующий севооборот: озимая пшеница – ячмень – горох. Схема опыта включала следующие варианты: 1 – контроль (без удобрений), 2 – NK – фон, 3 – NK + АФ, 4 – NK + известь 1.5 г.к., 5 – NK + известь 1.5 г.к. + АФ, 6 – NK + известь 2.5 г.к. (в 1-, 3- и в 8-й ротациях), 7 – NK + известь 2.5 г.к. + АФ [9].

В опыте применяли аммиачную селитру (N_{aa}), аммофос (АФ), хлористый калий (K_x). Под озимую пшеницу вносили $N120P60K90$, ячмень – $N90P60K90$ под предпосевную культивацию, под озимую пшеницу – $N60$ –90 весной в подкормку. Опыт заложен на двух полях, размеры делянок $16.5 \times 6 = 100 \text{ м}^2$. Учет урожайности проводили сплошным методом. Почвенные образцы отбирали осенью после уборки урожая. В опыте возделывали озимую пшеницу сорта Московская 56, яровой ячмень сорта Владимир.

За 55-летний период ежегодное одностороннее применение азотно-калийных удобрений, несмотря на смену сортов на более интенсивные, не обеспечило последовательный рост их урожайности (рис. 1).

Наоборот, в 10–13-й ротациях наметилась тенденция к снижению продуктивности зерновых культур вследствие подкисления почвы физиологически кислыми азотными и калийными удобрениями, а также из-за значительного возрастания содержания подвижного алюминия >120 мг/кг почвы. Внесение фосфорных удобрений на азотно-калийном фоне способствовало стабилизации урожайности в последние годы на уровне 38–39 ц зерна/га. При внесении извести в дозе по 1.5 и 2.5 H_T прибавка от фосфорных удобрений увеличивалась на 11 и 20 ц/га или на 29–53%.

По данным работы [10], применение цинковых микроудобрений повышало эффективность фосфорных удобрений, обеспечивая дополнительную прибавку урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя в зависимости от кислотности почвы на 2.0–5.4 ц/га или 10–14%. Наибольшая окупаемость 1 кг P_2O_5 прибавкой урожайности зерна (12.4–14.6 кг) достигалась при слабокислой реакции почвенной среды (pH_{KCl} 5.4 ед.) с совместным внесением аммофоса (N14P60) и сернокислого цинка (5 кг ZnO /га) на фоне N106K90.

Известкование, значительно снижая кислотность почвы, способствует существенному уменьшению содержания подвижного алюминия. Отмечена тесная взаимосвязь содержания Al с величиной обменной кислотности. Наши расчеты показали, что

уменьшение $H_{обм}$ на 0.1 ммоль приводит к снижению содержания подвижного алюминия на 9 мг/кг почвы (рис. 2а).

Именно поэтому при оценке парных коэффициентов корреляции наиболее сильная взаимосвязь урожайности сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы и ярового ячменя) была обусловлена обменной и гидролитической кислотностью (табл. 1, рис. 2б). Например, с возрастанием показателя H_T на 1 ммоль урожайность зерновых культур снижалась на 4.9 ц/га.

Известкование способствовало повышению степени подвижности фосфатов — отношению P_2O_5 в вытяжке по Кирсанову к концентрации P_2O_5 в $CaCl_2$ -вытяжке. Например, этот показатель при внесении 1200 кг P_2O_5 /га в варианте без извести составлял ≈ 60 , с известью — 48, т.е. темпы накопления легкоподвижных фосфатов в известкованной почве шли более интенсивно по сравнению с неизвесткованной [11].

В кислых почвах при высоком содержании подвижного алюминия для уменьшения его токсичности требуется более высокое содержание P_2O_5 . При взаимодействии P_2O_5 с алюминием образуются малорастворимые фосфаты, что значительно снижает его подвижность и токсичность для растений, что также подтверждается ростом урожайности зерновых культур при внесении АФ на фоне НК на неизвесткованном фоне (рис. 1). Именно поэтому оптимальный уровень содержания подвижного фосфора

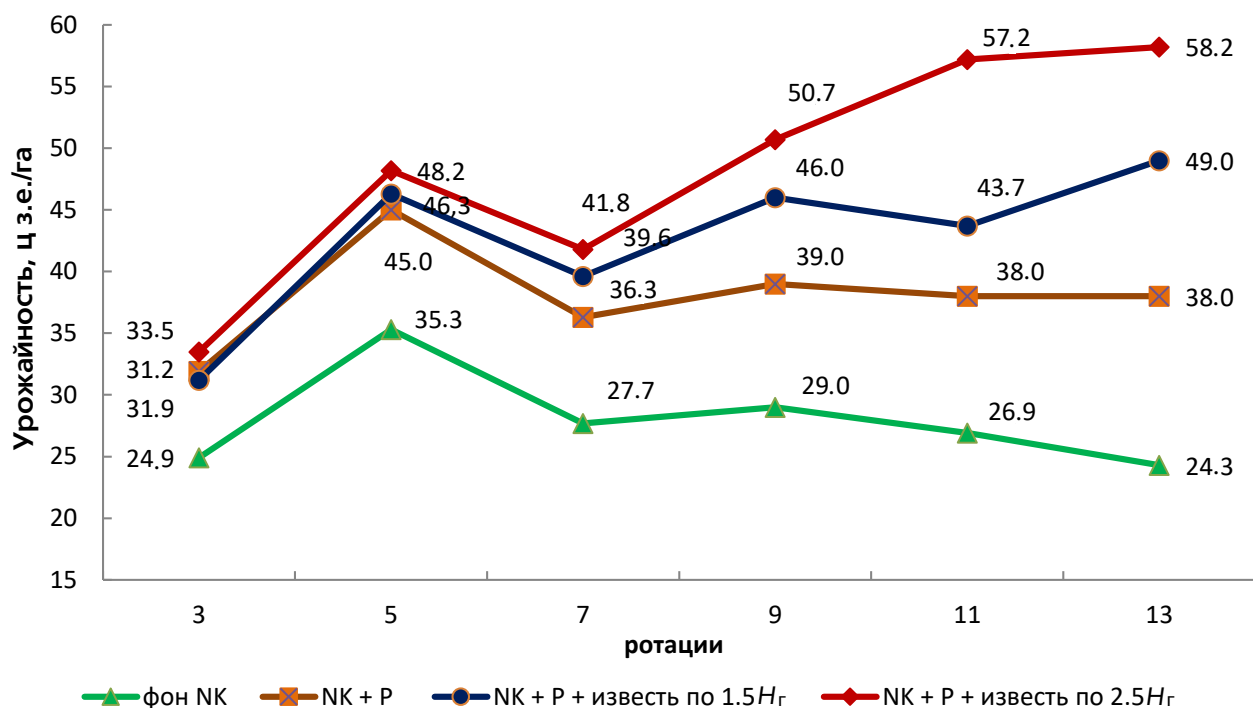


Рис. 1. Влияние фосфорных удобрений и периодического известкования разными дозами $CaCO_3$ дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы на урожайность зерновых культур в ротациях севооборота, ц з.е./га.

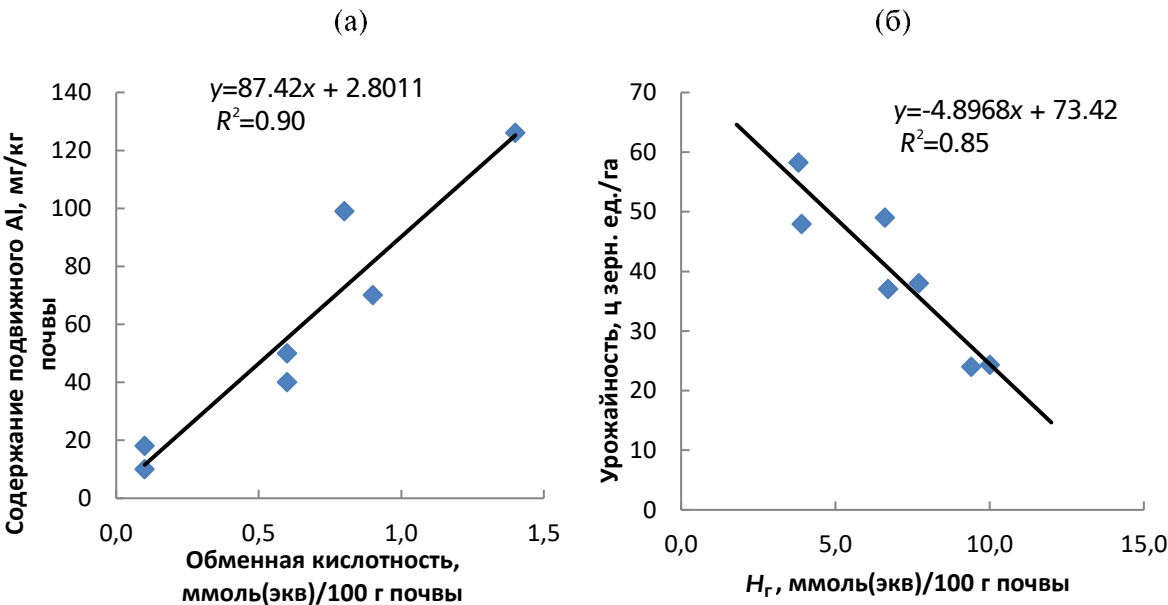


Рис. 2. Зависимость содержания подвижного алюминия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве от величины обменной кислотности (а), урожайности культур от величины гидролитической кислотности (б).

Таблица 1. Парные коэффициенты корреляции между различными агрохимическими показателями дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы и урожайностью сельскохозяйственных культур

Показатель	Урожай-ность	pH _{KCl}	H _{обм}	H _г	S	V	Al _{подв}	P ₂ O ₅ (по Кирсанову)	P ₂ O ₅ (по Скофилду)
Урожайность	1.00								
pH _{KCl}	0.86	1.00							
H _{обм}	−0.87	−0.91	1.00						
H _г	−0.92	−0.94	0.97	1.00					
S	0.87	0.99	−0.91	−0.92	1.00				
V	0.88	0.98	−0.96	−0.97	0.98	1.00			
Al _{подв}	−0.82	−0.87	0.95	0.89	−0.89	−0.93	1.00		
P ₂ O ₅ (по Кирсанову)	0.58	0.21	−0.24	−0.26	0.25	0.19	−0.16	1.00	
P ₂ O ₅ (по Скофилду)	0.40	0.22	−0.40	−0.30	0.26	0.26	−0.23	0.71	1.00

в зависимости от кислотности почвы может существенно повышаться.

В этом отношении весьма точно высказывание Н.А. Кирпичникова [11] о том, что «... Действие извести, как и фосфорных удобрений, направлено в сторону улучшения обеспеченности растений фосфором. За счет использования этих двух факторов можно регулировать оптимальное питание растений фосфором», ... т.е. отмечен сопряженный эффект взаимодействия фосфорных и известковых удобрений – внесение одних удобрений снижает потребность в других.

В рассмотренном опыте при ежегодном внесении Р60 на азотно-калийном фоне при известковании СаСО₃ в дозе по 2.5 H_г складывался слабopоложительный баланс фосфора. Урожайность зерновых культур 60 ц/га достигалась при содержании подвижного фосфора на уровне 100 мг/кг почвы (по Кирсанову) и степени его подвижности 0.11–0.15 мг/л (по Скофилду). Коэффициент использования фосфора за 10-летний период (2018–2023 гг.) составил 27%. Следует отметить, что такое содержание подвижного фосфора находится на верхней границе средней–нижней границе повышенной обеспеченности (3–4-я группы). На наш взгляд, содержание подвижного фосфора

100–125 мг/кг для кислых дерново-подзолистых почв Нечерноземья при возделывании зерновых можно считать оптимальным как с агрономической, так и с экономической точки зрения [9, 10].

Конечно, оптимальный фосфатный режим дерново-подзолистых почв зависит не только от содержания подвижного фосфора, а также других его форм, но и от таких факторов, как величина почвенной кислотности, содержание гумуса, емкость поглощения, степень насыщенности основаниями, гранулометрический состав. Эти факторы в значительной степени влияют на питание растений фосфором, поэтому для каждой культуры существует свой оптимальный уровень содержания фосфора в почве, который связан с взаимным влиянием ее свойств [12–15].

По данным [16], урожайность зерновых культур 35–50 ц/га достигается при содержании 100–120 мг P_2O_5 /кг почвы, картофеля – порядка 120–150 мг P_2O_5 /кг почвы. Поэтому оптимальным следует считать такой уровень содержания подвижного фосфора в почве, при котором достигается не менее 90–95% от максимальной урожайности, а недостающие 5–10% компенсируются за счет внесения фосфорных удобрений, обеспечивающих возмещение выноса P_2O_5 урожаем.

В длительном стационарном опыте ВНИИ льна максимальная урожайность льнопродукции на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве отмечена при содержании подвижного фосфора ≈ 200 мг/кг [17]. При оптимальной обеспеченности льна фосфором увеличивалась урожайность льноволокна, улучшались его физико-механические свойства [18, 19]. По нашим данным, наиболее высокая урожайность льносоломы льна-долгунца получена при pH 5.1–6.0 ед. и повышенной и высокой обеспеченности почв фосфором. Изменение реакции почвенной среды как в сторону подкисления, так и в нейтральную сторону, вело к снижению урожайности и ее прибавки от эквивалентных доз фосфорных удобрений [20].

В Белоруссии дозы фосфорных удобрений рассчитывают с учетом обеспеченности почв P_2O_5 , уровнем планируемой урожайности и биологических особенностей культур. В 2006–2015 гг. применение минеральных удобрений на пахотных почвах Белоруссии составляло 262 кг д.в./га, в том числе 43 кг P_2O_5 /га. Это способствовало повышению содержания подвижного фосфора в почве до 188 мг/кг. В 2016–2020 гг. на 1 га пашни было внесено 173 кг NPK, в том числе 18 кг фосфора. Снижение применения фосфорных удобрений привело к уменьшению содержания подвижного фосфора за 4 года на 11 мг/кг почвы. Все это свидетельствовало о том, что созданный высокий уровень содержания фосфора поддерживается только при бездефицитном балансе этого элемента [21].

Фосфатный режим почв. Ввиду химического, физико-химического и биологического связывания

фосфатов, коэффициент использования P_2O_5 из водорастворимых фосфорных удобрений не превышает 30–35%, а в некоторых случаях он гораздо меньше.

Для более детальной оценки фосфатного режима почв в зависимости от их свойств (в первую очередь величины pH) определяют различные фракции фосфатов, проводя для этого последовательное экстрагирование почвы различными по составу, концентрации и кислотно-основным свойствам растворами. Наиболее распространенные в мире методы – Чанга–Джексона [22], Хедли–Стюарта–Чаухана [23], Тиссена–Мойра [24], в России наиболее часто применяют метод Гинзбург–Лебедевой [25].

Последовательная экстракция позволяет судить о количестве фосфора, адсорбированного или поглощенного минеральными компонентами почвы, а также о фосфоре, содержащемся в более или менее дискретных химических соединениях. Следует отметить, что процесс трансформации фосфатов – многоступенчатый и длительный. Опыты с созданными искусственными фосфатными фонами показали, что внесение высоких доз фосфорных удобрений приводит к существенному повышению содержания подвижных, а также легкоподвижных, соединений, доступных для растений.

По данным работы [26], при высоких дозах фосфорных удобрений, не использованными растениями фосфаты переходили в основном в наиболее растворимые фракции кальция. Под действием известкования по 1.5 H_t доля Ca-P_I увеличилась с 39 до 50, Ca-P_{II} – с 16 до 27%. Скорость образования Al-P была в 3 раза больше, чем Fe-P.

Фракционно-групповой состав минеральных фосфатов существенно зависит от химического состава материнской почвообразующей породы. По данным [27], в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, сформированной на желто-бурой некарбонатной покровной глине, в условиях Предуралья установлено, что фракционный состав минеральных фосфатов на 40–62% был представлен фосфатами железа и на 31–48% – фосфатами кальция, что было связано с характерными особенностями почвообразующей породы.

В работе [28] в орошаемой светло-каштановой тяжелосуглинистой почве в условиях Саратовского Заволжья отмечено высокое (в сравнении с почвами этого типа других регионов) содержание 2-й и 3-й фракций «активных» минеральных фосфатов. За 12-летний период содержание этих форм фосфатов в почве без внесения фосфорных удобрений снизилось на 52% от исходного уровня. По мнению автора, это свидетельствовало о пополнении за счет них фракции подвижного фосфора, что объясняет длительное сохранение содержания его на уровне, близком к исходному.

Создание высокого фосфатного уровня значительно повышает эффективность азотных и калийных удобрений, обеспечивает получение более стабильной урожайности, что важно в условиях меняющегося климата. Неудачно названное «зафосфачивание» почв, связанное со значительным превышением внесения фосфора над выносом его урожаем, приводит к значительному увеличению содержания подвижного фосфора (600–1000 мг/кг почвы). При резком снижении или даже прекращении внесения фосфорных удобрений в таких почвах ранее не использованный «остаточный» фосфор хорошо доступен для растений в течение многих десятилетий. Одновременно происходит трансформация труднорастворимых фосфатов в более подвижные формы [26].

При изучении последствий остаточных фосфатов среднегодовая продуктивность культур в севообороте картофель–ячмень–многолетние травы 2-х лет использования–озимая пшеница была на уровне 30–33 ц з.е./га, что сопоставимо с периодом прямого 10-летнего действия фосфорных удобрений (40–48 ц з.е./га). При этом скорость снижения содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистой почве (по Кирсанову) зависела от количества внесенного фосфора сверх выноса P_2O_5 урожаями культур, гранулометрического состава почвы и известкования. Авторами показано, что известкование умеренными дозами снижало скорость перехода фосфатов удобрений в менее растворимые формы [26].

Великобритания. Зарубежные исследователи считают, что определение фракционно-группового состава фосфатов одного образца почвы дает данные, которые представляют собой не более чем «снимок времени» [29–31].

Только при наличии архивных образцов почвы изменение содержания фосфора в различных фракциях почвы можно связать с балансом фосфора.

В работе [32], используя архивные и текущие образцы почвы, оценили изменение фракционно-группового состава фосфатов в истощающих экспериментах на Ротамстедской опытной станции в Великобритании. В этом сверхдлительном полевом опыте, заложенном в 1856 г., можно выделить 3 различных периода: 1 – без применения фосфорных удобрений, 2 – внесение суперфосфата (1856–1901 гг.) и органических удобрений (1876–1901 гг.), 3 – прекращение внесения фосфорных удобрений (с 1901 г.) и изучение их последствий.

Пробы почвы отбирали из верхнего 23-см слоя почвы, в почвенном банке имелись образцы за 1856, 1903 и 1993 гг. В качестве экстрагентов использовали (последовательно) анионообменные мембраны, 0.5M $NaHCO_3$, 0.1M $NaOH$, 1M $NaOH$, 0.5M H_2SO_4 [30].

Результаты исследования показали, что до 1901 г., когда баланс фосфора был положительным (за счет применения суперфосфата и навоза), происходило накопление P в почве. При этом наблюдали увеличение содержания всех первых 5-ти фракций фосфора. В период истощения фосфором (1901–1993 гг. во всех вариантах) отмечены отрицательные изменения также во всех фракциях (табл. 2).

На эти положительные и отрицательные изменения приходилось почти 90% увеличения или уменьшения количества общего почвенного фосфора. Изменение содержания фосфора, экстрагируемого анионообменными мембранами, внесло наибольший вклад (25%) в изменение общего содержания фосфора. При этом сумма изменения P во всех 5-ти фракциях (выраженная в кг/га) не учитывала весь баланс фосфора. Вероятно, это было связано с тем, что авторы рассчитывали разницу между аналитическими показателями, и любая небольшая ошибка в определении фосфора в каждой фракции увеличивала общую ошибку опыта [31].

Таблица 2. Взаимосвязь между балансом фосфора и изменением запасов в различных фракциях фосфора в почве («Истощающий эксперимент», Ротамстедская опытная станция [31])

Вариант	Баланс P_2O_5 , кг/га	Изменение запасов фосфора в различных фракциях, кг P/га					
		Анионит-обменные мембраны	0,5M $NaHCO_3$	0,1M $NaOH$	1M $NaOH$	0,5M H_2SO_4	Сумма P во всех фракциях
1. Без удобрений (1903–1993 гг.)	–300	–49	–20	–195	–82	–19	–365
2. Навоз 1-й период (внесение 1876–1901 гг.)	1035	193	129	133	107	335	917
2-й период (последствие 1903–1993 гг.)	–752	–259	–123	–159	–112	–164	–817
3. Суперфосфат 1-й период (внесение 1856–1901 гг.)	1222	158	126	79	7	270	640
2-й период (последствие 1903–1993 гг.)	–644	–234	–138	–114	45	–253	–694

Данные эксперимента свидетельствовали об обратимом перераспределении фосфора между различными фракциями. Таким образом, фосфор, накопленный в более прочно удерживаемых формах, впоследствии может высвободиться и поглощаться выращиваемыми культурами.

В Великобритании оптимальные показатели содержания подвижного фосфора находятся на уровне 2-го класса — 16–25 мг/кг почвы (по Олсену). При этих показателях или меньше рекомендуют вносить фосфорные удобрения, чтобы поддерживать или повышать содержание подвижного фосфора в почве. В последние годы методические подходы были пересмотрены. Сейчас они основаны на принципе «кормить урожай, а не почву» [30]. Это включает в себя допущение снижения нижней границы оптимального содержания подвижного фосфора со 2-го (16–25 мг/кг) до 1-го класса (10–15 мг/кг почвы) [29]. Конечно, такой подход вряд ли приемлем для России, т.к. он требует ежегодного мониторинга плодородия почв.

Весьма интересные данные были получены в длительном полевом опыте на Ротамстедской опытной станции в Англии [32]. Эксперимент проводили в 1985–2000 гг. на тяжелосуглинистой почве с нейтральной реакцией среды. Схема опыта включала в себя контроль (без удобрений), азотно-калийный фон (N100K110), внесение фосфорных удобрений в дозе P80 с возрастающими дозами азота: 100, 200 и 300 кг N/га (табл. 3).

При возделывании озимой пшеницы как бесменно, так и в севообороте, наблюдали четкую взаимосвязь содержания подвижного фосфора в почве (по Олсену) с балансом P_2O_5 . В то же время снижение содержания подвижного фосфора при бесменном возделывании озимой пшеницы происходило сильнее, чем в севообороте, даже при более низких (в 2.3 раза) показателях величины отрицательного баланса P_2O_5 . По нашим расчетам, снижение содержания подвижного фосфора на 10 мг/кг происходило при превышении выноса P_2O_5 урожаем над его внесением с удобрениями на 120–130 кг/га при бесменной культуре пшеницы и 400–500 кг/га при возделывании в севообороте. По-видимому, культуры из разных агробиологических групп способствуют более равномерному потреблению фосфатов из почвы. По данным [34], для снижения содержания подвижного фосфора в очень кислой почве с низкой обеспеченностью P_2O_5 необходимо, чтобы превышение выноса фосфора урожаем было больше 900 кг P_2O_5 /га, тогда как при высокой обеспеченности и слабокислой реакции почвенной среды он должен быть в несколько раз меньше (100–200 кг/га).

В той же дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве для увеличения содержания P_2O_5 на 10 мг/кг при pH 5.5 необходимо внести 100 кг фосфора/га сверх выноса его урожаем, при pH 4.5

требуется значительно больше — 150–160 кг/га. Это также во многом согласуется с работой [34]. В опыте на нейтральной тяжелосуглинистой почве Ротамстедской опытной станции для увеличения содержания подвижного фосфора на 10 мг/кг требуется внести 40–50 кг P_2O_5 сверх выноса его урожаем. Таким образом, несмотря на разные методические подходы к определению содержания подвижного фосфора в почве общие закономерности увеличения/уменьшения его содержания весьма близки.

Стоит отметить, что при определении коэффициента использования фосфора из внесенных удобрений разностным методом, величины коэффициента использования удобрений (КИУ) при бесменном возделывании озимой пшеницы были больше — 35–51 против 25–41% в севообороте. Это было связано с увеличением урожайности озимой пшеницы в севообороте как в контрольном, так и фоновом вариантах. С увеличением доз азотных удобрений увеличивалось и количество использованного из удобрений фосфора. Наоборот, при расчете коэффициента использования фосфора балансовым методом (по отношению поступления к выносу фосфора урожаем) он был больше в севообороте (63–79%), чем при бесменном возделывании пшеницы (50–65%). Все это указывало на то, что разные методы могут дать противоположные результаты, и полученные выводы необходимо трактовать с учетом примененных подходов [33].

В опытах, проведенных на Ротамстедской опытной станции, обращает на себя внимание высокая окупаемость 1 кг фосфорных удобрений прибавкой урожайности зерна: 36–60 кг при бесменном возделывании озимой пшеницы и 22–39 кг — в севообороте. Главным приемом повышения окупаемости является увеличение доз азота до 200 кг/га. По-видимому, и в наших опытах не нужно ограничиваться дозой азота 120 кг/га, необходимо изучить влияние и более высоких доз. Тем более, что это будет способствовать не только дальнейшему росту урожайности, окупаемости фосфорных и калийных удобрений, но и повышению содержания белка в зерне.

Kumai. Длительный полевой опыт с бесменной кукурузой был заложен в 1990 г. на Китайской национальной базе мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений для черноземных почв (Black Soil) [35]. Почва опытного участка тяжелосуглинистая, по классификации ФАО относится к Luvic Phaeozem. Агрохимические показатели были следующими: рН_{H2O} составляла 7.6 ед., содержание почвенного органического углерода — 2%, подвижного фосфора (по Олсену) — 27, калия — 228 мг/кг почвы. Схема опыта включала следующие варианты: 1 — контроль (без удобрений), 2 — N50K82, 3 — N50K82 + P82, N50K82 + P82 + навоз (свиной — с 1990–2004 гг., КРС — с 2005–2018 гг.). С навозом поступало: азота — 115, фосфора — 89 и калия — 92 кг/га (табл. 4).

Таблица 3. Урожайность озимой пшеницы и содержание подвижного фосфора (по Олсену) в зависимости от баланса P_2O_5 на фоне возрастающих доз азота (Брудбалк, Ротамстед, Великобритания, 1985–2000 гг. [33])

Показатель	Вариант				
	Контроль (без удобрений)	N100K110	N100K110 + P80	N200K110 + P80	N300K110 + P80
1. Озимая пшеница бессменно					
Содержание P_2O_5 (по Олсену), мг/кг	16	9	267	174	167
Урожайность зерна, ц/га	11.7	24.6	53.2	65.8	72.9
Баланс P_2O_5 за 16 лет:	0	0	1280	1280	1280
1. Поступление с удобрениями, кг/га					
2. Вынос с урожаем (зерно + солома), кг/га	136	183	638	755	835
3. Баланс, кг/га	–136	–183	642	525	445
Коэффициенты использования P_2O_5 , %					
Разностный метод	—	—	35	45	51
Балансовый метод	—	—	50	59	65
Эффективность использования P_2O_5					
Кг зерна/кг потребленного P_2O_5	138	215	134	139	140
Кг зерна/кг внесенного P_2O_5	—	—	66	82	91
Окупаемость 1кг P_2O_5 , кг	—	—	36	52	60
2. Озимая пшеница в севообороте					
Содержание P_2O_5 (по Олсену), мг/кг	21	14	197	183	176
Урожайность зерна, ц/га	22.5	55.3	72.6	87.6	86.7
Баланс P_2O_5 за 16 лет:	0	0	1280	1280	1280
1. Поступление с удобрениями, кг/га					
2. Вынос с урожаем (зерно + солома), кг/га	245	484	802	982	1008
3. Баланс, кг/га	–245	–484	478	298	272
Коэффициенты использования P_2O_5 , %					
Разностный метод	—	—	25	39	41
Балансовый метод	—	—	63	77	79
Эффективность использования P_2O_5					
Кг зерна/кг потребленного P_2O_5	147	183	145	143	138
Кг зерна/кг внесенного P_2O_5	—	—	91	109	108
Окупаемость 1кг P_2O_5 , кг	—	—	22	40	39

В качестве минеральных удобрений использовали карбамид, аммофос, сульфат калия. Всю дозу фосфора и калия, а также 1/3 азота вносили под предпосевную культивацию и 2/3 азота — в подкормку, заделывая удобрения в междурядья. Площадь делянок составляла 400 м², размещение рандомизированное, повторность трехкратная. Кукурузу высевали в апреле из расчета 60 тыс. семян/га [35].

Применение N50K82 в период с 1990–2000 гг. способствовало повышению урожайности кукурузы на 48 ц/га по сравнению с контролем, а дополнительное внесение фосфора и навоза не способствовало дальнейшему существенному росту урожайности. В последующие периоды действие фосфора

существенно возрастало, обеспечивая прибавку урожайности 12–34 ц/га к фону N50K82. Увеличение разрыва в урожайности, с одной стороны, было обусловлено значительным уменьшением содержания фосфора в контрольном и фоновом вариантах, с другой — существенному повышению P_2O_5 в почве при внесении P82 и дополнительном поступлении фосфора с навозом (в сумме 171 кг/га). При этом отмечен значительный рост окупаемости примененных фосфорных удобрений. Например, если в первый период окупаемость 1 кг фосфора прибавкой урожайности зерна кукурузы равнялась 6 кг, во 2-й — 14, то в 3-й — уже 41 кг. Разностный коэффициент использования фосфора из удобрений планомерно увеличивался с 4

Таблица 4. Урожайность кукурузы и содержание подвижного фосфора в почве в зависимости от баланса P_2O_5 (длительный полевой опыт с бессменной кукурузой Китайской национальной базы мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений на черноземах (Black Soil) [35])

Вариант	Баланс фосфора (P ₂ O ₅), кг/га			Содержание подвижного фосфора по Олсену, мг/кг	Урожайность зерна кукурузы (прибавка от фосфора*), ц/га
	поступ-ление	вынос	+/-		
1990–2000 гг.					
1. Контроль (без удобрений)	0	41	–41	19	39
2. N50K82	0	89	–89	23	87
3. N50K82 + P82	82	92	–10	37	92 (+5)
4. N50K82 + P82 + навоз (N115P89K92)	171	87	84	44	86
2001–2010 гг.					
1. Контроль (без удобрений)	0	32	–32	12	31
2. N50K82	0	82	–82	14	81
3. N50K82 + P82	82	94	–12	67	93 (+12)
4. N50K82 + P82 + навоз (N115P89K92)	171	101	70	314	99
2011–2018 гг.					
1. Контроль (без удобрений)	0	34	–34	10	34
2. N50K82	0	73	–73	14	73
3. N50K82 + P82	82	110	–28	109	107 (+34)
4. N50K82 + P82 + навоз (N115P89K92)	171	119	52	398	115

*Прибавка от внесения P82 указана в скобках по отношению к варианту N50K82.

до 45%. Обеспечение положительного баланса фосфора при органо-минеральной системе удобрения с превышением выноса P_2O_5 урожаем в 1.4–1.7 раза способствовало повышению содержания в почве подвижного фосфора (по Олсену) с 27 до 398 мг/кг, или в 14 раз. Конечно, столь значительное содержание подвижного фосфора, превышающее оптимальное для данных почв (16–25 мг P/кг или 37–57 мг P_2O_5 /кг) не сопровождалось дальнейшим ростом урожайности кукурузы [36]. По нашему мнению, внесение 90 кг P_2O_5 /га являлось достаточным для обеспечения бездефицитного баланса и сохранения содержания подвижного фосфора на уровне 2–3-го класса, а также реализации генетического потенциала культуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты длительных полевых опытов свидетельствовали о необходимости дальнейшего углубления исследований в области оптимизации фосфатного режима почв и повышения эффективности фосфорных удобрений. Вполне очевидно, что в каждом длительном опыте необходимо создавать

архив почвенных образцов, который позволит более надежно оценивать изменение фракционно-группового состава фосфатов, физико-химических свойств почвы, что, в свою очередь, даст возможность для объективной оценки динамики фосфатного режима почв с учетом складывающегося баланса P_2O_5 .

Данные большинства экспериментов свидетельствовали об обратимом перераспределении фосфора между различными фракциями. Фосфор, накопленный в более прочно удерживаемых формах, впоследствии может высвобождаться и поглощаться выращиваемыми сельскохозяйственными культурами. При этом содержание подвижного фосфора на уровне 100–125 мг/кг и степени подвижности 0.12–0.15 мг/л при pH_{KCl} 5.3–5.5 для тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почв Нечерноземья можно считать оптимальным для получения урожайности зерновых культур на уровне 60 ц/га. При таких агрохимических показателях дозы фосфорных удобрений можно рассчитывать по величине его выноса урожаем.

Разностный коэффициент использования фосфора из удобрений при возделывании озимой пшеницы в севообороте в условиях опытной станции ВНИИ

агрохимии составил 25–27, Ротамстедской станции – 25–41%. В опыте на Китайской национальной базе мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений на черноземах (Black Soil) КИУ фосфора кукурузой составил 45%.

Обращает на себя внимание высокая окупаемость фосфорных удобрений в опытах на Ротамстедской опытной станции (Великобритания) – 22–39 кг зерна/кг P_2O_5 (при возделывании озимой пшеницы в севообороте). Главным приемом повышения окупаемости в этом случае было применение высоких доз азота – до 200 кг/га. По-видимому, и в наших опытах не нужно ограничиваться дозой азота 100–120 кг/га, необходимо изучать влияние и более высоких доз. К тому же это будет способствовать не только росту урожайности, но и повышению содержания белка в зерне.

Во всех длительных полевых опытах наблюдали увеличение разрыва в урожайности между вариантами НК и НК + P с течением времени. С одной стороны, это обусловлено значительным уменьшением содержания фосфора в фоновом варианте НК, в котором вынос фосфора значительно превосходил контроль (без удобрений), с другой, – существенным повышением содержания P_2O_5 в почве при положительном балансе. В таком случае необходимо разграничивать роль вклада фосфора почвы (остаточных фосфатов) и фосфорных удобрений в формирование продуктивности культур.

Существенными приемами повышения эффективности фосфорных удобрений является известкование кислых почв до слабокислой реакции, использование цинковых микроудобрений, а также фосфатмобилизующих микроорганизмов [37]. Кроме того, важнейшей задачей является совершенствование существующих методов определения подвижного фосфора для различных типов почв страны ввиду их низкой схожимости с эффективностью фосфорных удобрений.

Необходимо шире использовать новые методы определения доз минеральных удобрений. Наиболее перспективным является подход, разработанный в работе [38], который учитывает комплекс агрохимических показателей почвы с учетом планируемой урожайности, позволяющий установить границу окупаемости удобрений и выбрать оптимальную дозу для конкретных условий производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков Н.Н. Биохимия растений. М: ЛЕНАНД, 2022. 680 с.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 г. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) / Под ред. Д.Д. Тетенькина, Е.И. Петрова. М., 2022. 622 с.
- Geological U.S. Survey. Mineral commodity summaries. Available at USGS website (NMIC, National Minerals Information Center) on January, 2022.
- Налиухин А.Н. 80 лет Географической сети полевых опытов с удобрениями // Плодородие. 2021. № 3(120). С. 6–8.
- Росстат. Внесение удобрений под урожай 2022 г. и проведение работ по химической мелиорации земель. http://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Vnesen_udobren
- Сычев В.Г., Шафран С.А. О балансе питательных веществ в земледелии России // Плодородие. 2017. № 1. С. 1–4.
- Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., Семенова А.И. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование // Агрохимия. 2021. № 5. С. 14–20. DOI: 10.31857/S0002188121050100
- Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Влияние последнего действия извести и систематического применения удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность зерновых культур // Агрохимия. 2023. № 4. С. 39–43. DOI: 10.31857/S0002188123040063
- Кирпичников Н.А. Влияние извести на фосфатный режим слабокультуренной дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2016. № 12. С. 3–8.
- Налиухин А.Н., Бижан С.П., Старостина Е.Н. Эффективность применения микроудобрений при возделывании зерновых культур на тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почвах Центрального Нечерноземья // Изв. ТСХА. 2022. № 4. С. 5–15. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-4-5-15
- Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленев Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. С. 105–300.
- Ельников И.И., Пивоварова И.А. О варьировании относительного оптимума содержания подвижного фосфора в почве в условиях Нечерноземной зоны // Агрохимия. 1985. № 2. С. 113–124.
- Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М., 1990. 218 с.
- Кирпичников Н.А., Мергель С.В., Черных И.Н., Черных Н.А. К вопросу об оптимизации фосфатного режима дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв // Агрохимия. 1993. № 8. С. 12–20.
- Чумаченко И.Н., Сушеница Б.А., Алиев Ш.А., Капранов В.Н., Дышко В.Н., Прудников П.В. Закономерности формирования фосфатного фонда почв при применении биогенных веществ в составе нетрадиционного минерального сырья и продуктивность

- их использования // Бюл. ВНИИА, 2003. № 117. С. 134–136.
16. Касицкий Ю.И. Об оптимальном содержании подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны СССР // Агрохимия. 1991. № 6. С. 107–125.
17. Петрова Л.И., Анюшина Т.Г. Оптимальные параметры агрохимических свойств окультуренной дерново-подзолистой почвы в льняном севообороте // Сб. научн. тр. ВНИИЛ. Вып. XXIII. 1986. С. 92–101.
18. Сорокина О.Ю. Оптимизация агрохимических характеристик почвы — основа улучшения качества льнопродукции // Мат-лы Всерос. совещ. «Экологические функции агрохимии в современном земледелии». М.: ВНИИА, 2008. С. 189–192.
19. Тихомирова В.Я. Урожайность и качество волокнистой льнопродукции при разной обеспеченности почвы фосфором и калием // Плодородие. 2010. № 1. С. 9–10.
20. Налиухин А.Н., Шафран С.А. Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожая льна-долгунца на дерново-подзолистых почвах // Плодородие. 2014. № 3. С. 2–4.
21. Сычев В.Г., Лапа В.В., Цыганов А.Р., Цыганова А.А., Тарасевич А.Г. Фосфор в почвах и системе удобрения сельскохозяйственных культур в республике Беларусь // Плодородие. 2023. № 5(134). С. 47–50. DOI: 10.25680/S19948603.2023.134.12
22. Chang S.C., Jackson M.L. Fractionation of soil phosphorus // Soil Sci. 1957. V. 84. P. 133–144.
23. Hedley M.J., Stewart J.W.B., Chauhan B.S. Changes in inorganic and organic phosphorus induced by cultivation practices and laboratory incubations // Soil Sci. Soc. Am. J. 1982. V. 46. P. 970–976.
24. Tiessen H., Moir J.O. Characterization of available P by sequential extraction. // Soil sampling and methods of analysis / Ed. M.R. Carter. Can. Soil Sci. Soc., Boca Raton, FL.: Lewis Publ., 1993. P. 75–86.
25. Гинзбург К.Е., Лебедева Л.С. Методика определения минеральных форм фосфатов почвы // Агрохимия. 1971. № 1. С. 125–136.
26. Кирпичников Н.А., Адрианов С.Н. Действие и последствие фосфорных удобрений на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве при различной степени известкования // Агрохимия. 2007. № 10. С. 14–23.
27. Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агрофитоценозов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 92–115. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-92-115
28. Конончук В.В. Оптимизация системы удобрения в зернокармном севообороте на светло-каштановой почве Поволжья при орошении: Автореф. ... д-ра с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2004. 35 с.
29. Blackwell M.S.A., Darch T., Haslam R. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements // Front. Agr. Sci. Eng. 2019. V. 6(4). P. 332–340. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019274>
30. Withers P.J.A., Sylvester-Bradley R., Jones D.L., Healey J.R., Talboys P.J. Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain // Environ. Sci. Technol. 2014. V. 48(12). P. 6523–6530.
31. Johnston A.E., Poulton P.R. Phosphorus in agriculture: A Review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK // J. Environ. Qual. 2019. V. 48(5). <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0078>
32. Blake L., Johnston A.E., Poulton P.R., Goulding K.W.T. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods // Plant Soil. 2003. V. 254. P. 245–261.
33. Syers J.K., Johnston A.E., Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Rome: FAO, 2008. P. 37–38.
34. Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., Семенова А.И. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование // Агрохимия. 2021. № 5. С. 14–20. DOI: 10.31857/S0002188121050100
35. Wang Q., Qin Zhen-han, Zhang Wei-wei, Chen Yan-hua, Zhu Ping, Peng Chang, Wang Le, Zhang Shu-xiang, Colinet G. Effect of long-term fertilization on phosphorus fractions in different soil layers and their quantitative relationships with soil properties // J. Integrat. Agricult. 2022. V. 21. DOI: 10.1016/j.jia.2022.07.018
36. Wu Q.H., Zhang S.X., Feng G., Zhu P., Huang S.M., Wang B.R., Xu M.G. Determining the optimum range of soil Olsen P for high P use efficiency, crop yield, and soil fertility in three typical cropland soils // Pedosphere. 2020. V. 30. № 6. P. 832–843.
37. Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Приемы повышения эффективности фосфорных удобрений в зависимости от известкования при возделывании зерновых культур на дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2022. № 7. С. 33–39. DOI: 10.31857/S0002188122070079. EDN JIVLVU
38. Шафран С.А. Научные основы и современные методы определения доз применения минеральных удобрений. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2022. 236 с. DOI: 10.25680/VNIIA.2019.25.58.108

Efficiency of Phosphorus Fertilizers: Research Results in Long-Term Field Experiments in Russia, Great Britain and China

A. N. Naliukhin^{a, #}, N. A. Kirpichnikov^b, S. P. Bizhan^b, Yu. E. Guseva^a

^a*Russian State Agrarian University—Timiryazev Moscow Agricultural Academy,
ul. Pryanishnikova 6, Moscow 127434, Russia*

^b*D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry,
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia,*

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

The results of research in long-term field experiments on the effectiveness of phosphorus fertilizers are presented. All experiments were based on the classical scheme and included, in addition to the control variant (without fertilizers), a nitrogen-potassium background, on which the effectiveness of phosphorus fertilizers was studied. At the same time, regional specifics were taken into account in each experiment: liming at the Experimental Station of the All-Russian Research Institute of Agrochemistry (Russia), the effectiveness of phosphorus fertilizers at increasing doses of nitrogen N100–300 at the Rothamsted Experimental Station (Great Britain), a combination of phosphorus fertilizers with manure at the Chinese National Soil Fertility Monitoring Base. In long-term experiments, the dynamics of changes in the content of mobile phosphorus, as well as individual fractions, taking into account the emerging balance of P_2O_5 , are presented. It is shown that the redistribution of phosphorus between different soil fractions is reversible, and the direction of the processes depends on the emerging balance of P_2O_5 . Phosphorus accumulated in more firmly held forms can subsequently be released and absorbed by cultivated crops. In all field experiments an increase in the yield gap between NK and NK + P variants was observed over time. On the one hand, this is due to a significant decrease in the phosphorus content in the background NK variant (in acidic soils – also an increase in Al mobility), in which phosphorus removal significantly exceeds control (without fertilizers), on the other – a significant increase in the content of P_2O_5 in the soil with a positive balance. In a long-term experiment at the Experimental Station of the Institute of Agrochemistry, the difference coefficient of phosphorus utilization from fertilizers was 25–27, at the Rothamsted station – 25–41, at the Chinese National Soil Fertility Monitoring Base – 45%. Attention is drawn to the high payback of phosphorus fertilizers in experiments at the Rothamsted experimental station (Great Britain) – 22–39 kg of grain/kg of P_2O_5 (when cultivating winter wheat in crop rotation). The main method of increasing payback in this case was the use of high doses of nitrogen – up to 200 kg N/ha. Studies have shown that liming acidic soils to a slightly acidic reaction, the use of zinc micronutrients, as well as phosphate-mobilizing microorganisms, are essential methods to increase the effectiveness of phosphorus fertilizers.

Keywords: phosphorus fertilizers, long-term field experience, phosphate regime of soils, phosphorus balance, yield.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Журналу «Агрохимия» — 60 лет

А. П. Глинушкин, В. Н. Кудяров № 1, с. 3–11

Научное обоснование определения потребности Российской Федерации в минеральных удобрениях

С. А. Шафран № 6, с. 3–12

Роль биологического азота в земледелии России

А. А. Завалин, Л. А. Свиридова № 8, с. 3–8

Пути повышения эффективности использования карбамида

А. А. Завалин, Л. А. Свиридова № 11, с. 3–11

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Влияние сидерального удобрения на содержание гумуса в почве

А. Г. Дзюин № 1, с. 12–16

Влияние особенностей динамики запасов подвижных форм азота в серой лесной почве и применения удобрений на урожайность овса при различных погодных условиях

В. В. Окорков, Л. А. Окоркова, В. И. Шукина № 2, с. 3–16

Оценка влияния приемов биологизации агроценоза яблони (*Malus domestica* Borkh.) на плодородие почвы и продуктивность растений

О. Е. Клименко, А. И. Сотник, А. И. Попов № 2, с. 17–28

Динамика рН_{KCl} произвесткованной дерново-подзолистой супесчаной почвы мелиорантами различной химической природы

А. В. Литвинович, П. С. Манаков, А. В. Лаврищев, Ю. В. Хомяков, К. М. Нельсон, В. М. Буре № 2, с. 29–35

Значение обеспеченности почв подвижным калием в повышении урожайности и эффективности азотных удобрений

С. А. Шафран № 3, с. 3–13

Влияние минеральных удобрений на биологическую активность почв при использовании технологии прямого посева

А. Н. Федоренко, Г. В. Мокриков, К. Ш. Казеев, М. С. Нижельский, В. В. Вилкова, С. И. Колесников № 3, с. 14–22

Миграция нитратного азота по профилю почвы

О. В. Волюнкина, А. Н. Копылов № 4, с. 3–7

Динамика гумусного состояния чернозема южного при длительном применении минеральных удобрений в условиях степного Поволжья

Д. Ю. Журавлев, Т. М. Ярошенко, Н. Ф. Климова, Л. Б. Сайфуллина № 4, с. 8–13

Трансформация органических соединений углерода и азота агрочерноземов при применении безотвальных технологий обработки в Красноярской лесостепи

Е. Н. Белоусова, А. А. Белоусов № 5, с. 3–12

Влияние сидеральных бинарных смесей с участием подсолнечника на качество и плодородие типичных черноземов

А. М. Гребенников № 5, с. 13–20

Влияние подсолнечниковых сидеральных агрообобществ на агрофизические свойства черноземов

А. М. Гребенников № 6, с. 13–19

Влияние гуминовых кислот на генерацию разности потенциалов в биоэлектрохимической системе

З. А. Гасиева, А. С. Галушко, Ю. В. Хомяков, Г. Г. Панова, Т. Э. Кулешова № 6, с. 20–28

Оценка информативности результатов наблюдений за почвой в стационарном опыте

О. В. Волюнкина № 7, с. 3–9

Агрохимическая оценка продукционного потенциала почв прибрежных понижений пульсирующих высокоминерализованных хлоридных озер Улзда-Торейского бессточного бассейна

Л. Л. Убугунов, Т. А. Аюшина, В. И. Убугунова, А. Д. Жамбалова, В. Л. Убугунов, О. В. Вишнякова № 8, с. 9–18

Продуктивность растений биоценозов и процессы гумусонакопления в эродированных лугово-черноземных почвах

В. М. Назарюк, Ф. Р. Калимуллина № 9, с. 3–14

Азотный режим агросерой почвы вишневого сада и урожайность деревьев при применении удобрений

Т. А. Роева, Е. В. Леоничева, Л. И. Леонтьева № 9, с. 15–27

Динамика физических параметров почв лугового ряда Каменной степи

Ю. И. Чевердин, Т. В. Титова, И. Ф. Поротиков № 10, с. 3–14

Десорбция калия и магния серой лесной почвой

В. Н. Якименко № 10, с. 15–22

Агромелиоративные приемы сохранения плодородия черноземных почв плодовых насаждений в условиях орошения минерализованными водами

Т. Г. Фоменко, В. П. Попова, О. В. Ярошенко, Ж. В. Арутюнян № 10, с. 23–31

Влияние возрастающих доз азотных удобрений на продуктивность полевых культур и калийный режим дерново-подзолистой почвы

М. Т. Васбиева № 11, с. 12–18

Влияние удобрения, предшественника и срока посева на продуктивность яровой пшеницы в трехпольных севооборотах

О. В. Волынкина, А. Н. Притчин № 11, с. 19–25

Влияние длительного применения минеральных удобрений и последствий извести на продуктивность агроценозов европейского Севера

Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова, А. М. Турлакова № 11, с. 26–31

Динамика содержания минеральных элементов и эффективное плодородие аллювиальной луговой почвы в овощном севообороте

И. Ю. Васючков, О. Н. Успенская, А. А. Коломиец № 12, с. 5–15

Изменение агрохимических свойств луговой черноземовидной почвы при длительном воздействии агрогенных факторов в зерно-соевом севообороте

В. Т. Синеговская, Е. Т. Наумченко, Е. В. Банецкая № 12, с. 16–21

Удобрения

Урожайность культур и продуктивность зерносвекловичного севооборота как результат 85-летнего применения удобрений в условиях ЦЧР

О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина, В. М. Вилков № 1, с. 17–25

Эффективность родентицидов на основе бромadiолона против обыкновенной полевки *Microtus arvalis* Pall. в лабораторных условиях

Н. В. Бабич № 1, с. 26–32

Привлечение трипсов солевыми формами алкил никотинатов и изоникатинатов

А. Ю. Лобур, Н. Г. Тодоров, М. И. Ушкова № 1, с. 33–38

Сравнительная эффективность применения минеральных и органических удобрений при выращивании лука репчатого в однолетней культуре

О. Н. Успенская, В. А. Борисов, И. Ю. Васючков, А. А. Коломиец, Л. В. Кривенков, Т. Е. Шевченко, А. В. Молчанова № 2, с. 36–42

Влияние систем удобрения и способов обработки почвы на формирование ассимиляционного аппарата и продуктивность фотосинтеза озимой пшеницы и сахарной свеклы в Центрально-Черноземном регионе

О. А. Минакова, П. А. Косякин, О. К. Боронтов, Е. Н. Манаенкова № 3, с. 23–29

Влияние многолетнего применения минеральных удобрений и навоза на агрохимические свойства серой лесной почвы, продуктивность культур и секвестрацию углерода

Н. Б. Зинякова, Д. А. Соколов, Т. Н. Лебедева, С. Н. Удальцов, В. М. Семенов № 4, с. 14–34

Агрономическая эффективность мочевины пролонгированного действия при выращивании яровой пшеницы

В. М. Лапушкин, М. А. Волкова, А. А. Лапушкина, С. П. Торшин, Ф. Г. Игралиев, А. М. Норов, Д. А. Пагалешкин, П. С. Федотов, В. В. Соколов, И. М. Кочетова, Е. А. Рыбин № 4, с. 35–40

Эффективность и продолжительность действия частиц отсева доломита, используемого для мелиорации кислых почв, эмпирические модели процесса подкисления дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (по данным полевого опыта)

А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, А. О. Ковлева, Ю. В. Хомяков, В. И. Дубовицкая, В. М. Буре № 4, с. 41–48

Влияние некорневых подкормок органо-минеральными удобрениями на содержание хлорофилла в листьях ячменя и его связь с показателями качества зерна

Е. Н. Носкова, Е. М. Лисицын № 4, с. 49–59

Влияние разных способов внесения лигногумата на качество продукции зеленных культур и лекарственных растений

Е. Б. Пашкевич, Г. Е. Ларина, М. В. Парахина № 4, с. 60–68

Влияние фосфорных и магниевых удобрений на минеральное питание и урожайность озимой пшеницы в зависимости от известкования дерново-подзолистой почвы

Н. А. Кирпичников, С. П. Бижан, В. В. Трибельгорн № 6, с. 29–33

Влияние различных систем удобрения на продуктивность яровой пшеницы в длительном стационарном опыте

О. В. Волынкина № 6, с. 34–41

Исследование эффективности действия калийсодержащих добавок на основе минерального сырья и промышленных отходов на качество и урожайность картофеля

О. В. Броварова, Д. А. Шушков № 6, с. 42–48

Зависимость фотосинтетической деятельности и урожайности сортов сливы от применения некорневых подкормок в аридной зоне северного Прикаспия

Т. И. Александрова № 7, с. 10–13

Оптимальные дозы фосфорных удобрений для зерновых агроценозов Приобья

С. А. Колбин, А. А. Данилова, А. Г. Рахленко № 8, с. 19–26

Урожайность яровой пшеницы и качество зерна при эффективном применении минеральных удобрений

О. В. Волынкина № 8, с. 27–36

Эффективность минеральной системы удобрения с разной насыщенностью в звене льняного севооборота

Н. Н. Кузьменко № 8, с. 37–41

Управление продуктивностью льна-долгунца путем оптимизации минерального питания

О. Ю. Сорокина № 8, с. 32–49

Применение различных удобрений для повышения урожайности кукурузы в Ставропольском крае

В. Н. Багринцева, И. Н. Иващенко, В. В. Дридигер, О. Д. Серова № 9, с. 28–35

Влияние возрастающих доз азотных удобрений на продуктивность полевых культур и калийный режим дерново-подзолистой почвы

М. Т. Васбиева № 11, с. 12–18

Влияние удобрения, предшественника и срока посева на продуктивность яровой пшеницы в трехпольных севооборотах

О. В. Волынкина, А. Н. Притчин № 11, с. 19–25

Влияние длительного применения минеральных удобрений и последствий извести на продуктивность агроценозов европейского Севера

Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова, А. М. Турлакова № 11, с. 26–31

Усиление действия фосфорных удобрений с учетом известкования при выращивании озимой пшеницы на дерново-подзолистой почве

С. П. Бижан № 12, с. 22–29

Регуляторы роста растений

Эффективность предпосевной обработки регуляторами роста растений для улучшения продуктивности *Astragalus babatagi* и *A. Xanthomeloide*

Э. Р. Курбанова, Р. П. Закирова, Н. С. Умарова, С. С. Халиков, Н. Д. Чкаников № 2, с. 43–49

Использование биостимулятора grow-b для повышения всхожести семян табака, биометрических показателей рассады, урожайности и качества табачного сырья

Е. М. Тютюнникова, Т. В. Плотникова № 3, с. 30–36

Применение серосодержащего регулятора роста Тиатон для укоренения микрочеренков винограда в культуре *in vitro*

Э. М. Фарахат, С. Л. Белопухов, И. И. Серегина № 7, с. 14–20

Оценка урожайности тритикале при воздействии пероксида водорода в присутствии катализаторов окислительного характера

Е. К. Барнашова, С. Н. Сергеев, М. И. Будник, К. А. Тараскин, С. С. Деревягин, О. Т. Касаикина, Л. М. Апашева,

Е. Н. Овчаренко, А. В. Лобанов, А. В. Грудзинский № 7, с. 21–28

Биологическая активность гуминовых веществ торфа в качестве ростстимулирующих препаратов

О. В. Броварова № 8, с. 50–56

Изменение антиоксидантной системы прорастающих семян и проростков гороха при использовании мицелиарно-субстратного экстракта вешенки

С. С. Тарасов, Е. В. Михалёв, Е. К. Крутова № 10, с. 32–41

Пестициды

Действие фунгицидов на возбудителей фузариозной сухой гнили картофеля

А. С. Орина, О. П. Гаврилова, И. И. Трубин, Т. Ю. Гагкаева № 3, с. 37–42

Активность и некоторые кинетические параметры карбоксилэстераз у модельных насекомых в зависимости от субстрата фермента

А. Г. Кинарейкина, Е. А. Силиванова № 3, с. 43–49

Динамика деградации остаточных количеств пропинаба и его метаболита пропилендиомочевина в плодах яблони

Т. Д. Черменская, М. О. Петрова, А. С. Комарова № 5, с. 21–26

Значение страховых гербицидов в стабилизации эффективности и качества борьбы с сорняками при применении бетаналов-дженериков на сахарной свекле

Е. А. Дворянкин № 6, с. 49–58

Возможность совместного применения тимола и карвакрола для контроля численности персиковой тли *Muzus persicae* (Sulzer, 1776)

Е. А. Степаньчева, М. О. Петрова, Т. Д. Черменская № 7, с. 29–35

Эффективность пеларгоновой кислоты в качестве гербицида в посевах подсолнечника, сои и кукурузы

А. С. Голубев № 8, с. 57–62

Экспериментальная и теоретическая оценка фунгицидной и бактерицидной активности 3-алкилзамещенных 1*h*-фосфолан оксидов

Т. В. Тюмкина, К. А. Булатова, Д. Н. Исламов, А. Л. Махаматханова, М. И. Маллябаева, Д. Ш. Сабиров

№ 8, с. 63–74

Биологическая эффективность баковых смесей пестицидов и микроудобрений при защите озимой пшеницы и их влияние на урожайность и качество зерна

Л. М. Власова, О. В. Попова № 9, с. 36–42

Ольфакторные реакции оранжерейной белокрылки *Trialeurodes vaporariorum* Westwood и ее паразитоида энкарзии *Encarsia formosa* Gahan на летучие соединения энтомопатогенных грибов рода *Lecanicillium*

Г. В. Митина, О. С. Кириллова, А. А. Чоголова, М. А. Черепанова № 10, с. 42–49

Особенности молекулярного связывания циклоксида с ацетил-КоА карбоксилазой культурной сои и сорных растений

П. Д. Тимкин, А. А. Иваний, М. П. Михайлова, У. Е. Штабная, А. Е. Гретченко, Ю. О. Серебренникова,

А. А. Пензин № 10, с. 50–56

Чувствительность возбудителя карликовой ржавчины ячменя (*Puccinia hordei* G.H. Otth.) к фунгицидам – производным триазолов и стробилуринов

М. С. Гвоздева, А. В. Данилова, О. А. Кудинова, В. Д. Руденко, Г. В. Волкова № 11, с. 32–38

Моделирование механизмов блокирования ферментов, разрушающих пиретроиды, веществами-синергистами из группы бензодииоксоланов

П. П. Муковоз, Р. И. Александров, В. Л. Семенов, С. А. Пешков, А. Н. Сизенцов, Л. Р. Валиуллин, В. П. Муковоз,

Ю. И. Мешков № 11, с. 39–46

Влияние стимулирующей рост бактерии *Pseudomonas protegens* DA1.2 и ее метаболитов на повреждение рапса почвенными остатками метсульфурон-метила

М. Д. Бакаева, А. А. Кенджиева, С. Н. Стариков, С. П. Четвериков, Д. В. Четверикова № 12, с. 30–35

Оценка эффективности биологических фунгицидов в различных системах защиты подсолнечника

А. К. Лысов, Н. И. Наумова, Д. О. Морозов, В. В. Букреев № 12, с. 36–42

Инсектицидные композиции природных пиретринов и замещенных бензодииоксоланов из растительных масел

П. П. Муковоз, Р. И. Александров, В. Л. Семенов, С. А. Пешков, А. Н. Сизенцов, Л. Р. Валиуллин, В. П. Муковоз,

Н. В. Птицына, Ю. И. Мешков № 12, с. 43–47

Агроэкология

Макроэлементы и их соотношения в разных видах растений, произрастающих на приозерных солончаках Западного Забайкалья

М. Г. Меркушева, Л. Н. Болонева, И. Н. Лаврентьева, С. Б. Сосорова № 1, с. 39–49

Микоценозы картофеля на полях Новозыбковского района Брянской области с разным уровнем радиоактивного загрязнения и хозяйственного использования

С. Н. Михалева, Л. Н. Ульяненко, Н. И. Будынков, А. П. Глинушкин № 1, с. 50–60

Йод в почвах бассейна внутреннего стока Кулундинской равнины

Г. А. Конарбаева, Б. А. Смоленцев, Н. В. Елизаров, В. В. Попов, В. В. Демин № 1, с. 61–69

Влияние минимизации способов почвообработки и прямого посева на биогенность почвы и развитие азотобактера в почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР

В. М. Гармашов, Л. В. Гармашова № 1, с. 70–75

Влияние эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* на микоризацию корней пшеницы при солевом стрессе

З. М. Кураמיшина, Р. М. Хайруллин, А. А. Ямалеева № 1, с. 76–81

Изучение феромонов основных насекомых-вредителей отряда чешуекрылых (Lepidoptera)

Т. Джумакулов, Ж. Э. Турдибаев, Л. Т. Юлдашев, М. Ш. Мосидиков, О. Х. Холбеков, Г. С. Шакирзянова, Э. Ш. Торениязов, Р. Э. Юсупов № 1, с. 82–91

Сорбционные свойства силикатных материалов из соломы риса и вермикулитов

А. Е. Панасенко, С. А. Терминов, Н. П. Шапкин, А. Н. Холомейдик № 1, с. 94–100

Особенности структуры микоценозов ячменя ярового и свойства грибов с отчужденных радиоактивно загрязненных территорий Новозыбковского района Брянской обл.

С. Н. Михалева, Л. Н. Ульяненко, Н. И. Будынков, А. П. Глинушкин № 2, с. 50–59

Основные и дополнительные экологические ниши почвенных фитопатогенов на сортах яровой пшеницы в Западной Сибири

Е. Ю. Торопова, Г. Я. Стецов, И. Г. Воробьева, Р. И. Трунов № 2, с. 60–69

Трансформация микробного сообщества лесной подстилки при ее внесении в почву агроценоза

С. К. Стеценко, Е. М. Андреева, Г. Г. Терехов № 3, с. 50–60

Влияние удобрения, норм высева бобового компонента и погодных условий на урожайность и накопление растительных остатков люпино-злаковых смесей на зерно в центре Нечерноземья

В. В. Конончук, С. М. Тимошенко, Т. О. Назарова, В. Д. Штырхунов, Е. А. Тулинова, Т. В. Смолина, Г. Б. Морозова, Е. А. Комиссарова № 4, с. 69–77

Элементный состав и структурные особенности гуминовых кислот пойменных почв дельты реки Селенги

Е. Ю. Мильхеев, Н. Д. Балданов № 4, с. 78–85

Влияние селена на урожай и аминокислотный состав зерна яровой пшеницы в оптимальных условиях водоснабжения и при засухе

И. И. Серегина № 4, с. 86–94

Грибные возбудители плесени зерна озимой пшеницы в Ростовской области

Н. И. Будынков, С. Н. Михалева, Л. Н. Ульяненко, А. П. Глинушкин № 5, с. 27–36

Влияние удобрений и мелиорантов на величину почвенной кислотности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, урожайность и химический состав зелёной массы ярового рапса (по данным лабораторно-вегетационного опыта)

А. В. Литвинович, К. М. Нельсон, А. В. Лаврищев, П. С. Манаков № 5, с. 37–44

Эмиссия CO₂ из пахотных черноземов западного Забайкалья

Э. О. Чимитдоржиева, Ю. Б. Цыбенков, Г. Д. Чимитдоржиева № 5, с. 45–53

Влияние применения удобрений на баланс основных элементов питания и эмиссию парниковых газов в Германии

С. В. Митрофанов, Е. В. Серова, Н. В. Орлова № 5, с. 54–63

Влияние пролонгированного действия минеральных удобрений в условиях температурного стресса на урожайность кукурузы на силос в степной зоне Южного Урала

В. Ю. Скороходов № 6, с. 59–65

Влияние сорта на потребление и вынос питательных веществ зерновыми культурами

С. А. Шафран, С. Б. Виноградова № 7, с. 36–47

Фотосинтетическая и углерод секвестрирующая способность левзеи сафлоровидной и накопление органического углерода в дерново-подзолистой почве

Н. Е. Завьялова, Г. П. Майсак, И. В. Казакова, О. В. Иванова № 7, с. 48–56

Влияние возрастающих доз отходного мела на содержание цинка в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и его накопление растениями. Эмпирические модели транслокации цинка в растения семейств злаковых, бобовых и капустных

А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, В. М. Буре, А. О. Ковлева № 8, с. 75–82

Эффективность микроэлементов и регуляторов роста растений в сочетании с минеральными удобрениями при возделывании озимой пшеницы и ярового ячменя на дерново-подзолистой почве

Е. Н. Старостина, Г. А. Иващенко № 8, с. 83–87

Протеазная активность мучнисто-карбонатных черноземов при разных типах землепользования

Э. О. Чимитдоржиева № 8, с. 88–94

Влияние длительного последствия известкования дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой на микроэлементный состав растений ячменя

С. Е. Витковская № 9, с. 43–50

Влияние ризосферных бактерий, способных к биосинтезу и/или деструкции фитогормонов на ростовые характеристики и гормональный статус растений пшеницы в условиях дефицита воды

М. Д. Тимергалин, А. В. Феоктистова, Т. В. Рамеев, М. Д. Бакаева, С. Н. Стариков, З. Р. Султангазин, С. П. Четвериков № 9, с. 51–57

Экологически безопасные методы и технологии биоконверсии органических отходов агропромышленного комплекса для производства новых видов органических удобрений

Т. Ю. Анисимова, С. И. Тарасов № 9, с. 58–69

Почвенная и листовая диагностика содержания азота при выращивании разных сортов различных экотипов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.)

Т. Г. Голова, Л. А. Ершова, С. А. Кузьменко № 10, с. 57–57

Влияние умеренного и сильного натрий-хлоридного засоления на рост и фотосинтетический аппарат растений ячменя и пшеницы

К. Б. Таскина, Н. М. Казнина, А. Ф. Титов № 11, с. 47–55

Секвестрация углерода экосистемами холодных территорий Забайкалья

Г. Д. Чимитдоржиева, Э. О. Чимитдоржиева, Е. Ю. Мильхеев, Ю. Б. Цыбенков, Ц. Д.-Ц. Корсунова № 12, с. 48–53

Оценка ферментативной и микробиологической активности почвы ризосферы *Solanum tuberosum* L. под влиянием обработки клубней эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* в условиях Предуралья

С. Р. Гарипова, Л. И. Пусенкова, Л. В. Сидорова, В. А. Валиева, А. В. Чистоедова, В. Д. Матюнина, А. С. Григориади № 12, с. 54–63

Влияние бактерий, метаболизирующих абсцизовую кислоту, на рост и содержание АБК в растениях пшеницы и почве при высокой плотности их посадки

Е. В. Мартыненко, Л. Ю. Кузьмина, Э. Р. Гаффарова, А. С. Рябова, Г. Р. Кудоярова, Л. Б. Высоцкая № 12, с. 64–71

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

Изменение целлюлозолитической активности и микробного дыхания почв разных типов в условиях загрязнения их тяжелыми металлами

О. А. Золотарева, И. О. Плеханова № 2, с. 70–78

Зоокомпост – решение проблемы органических отходов и материал для ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами

Е. А. Пендюрин, Л. М. Смоленская, Ж. А. Сапронова, И. В. Бомба № 2, с. 79–83

Исследование численности и ферментативной активности микроорганизмов в почвах, загрязненных пестицидами

С. И. Наджафова, Ф. Ш. Кейсерухская № 3, с. 61–65

Элементный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в районе золоторудного месторождения Забайкалья

В. П. Макаров, Р. А. Филенко, И. Е. Михеев, Т. В. Желибо, Е. А. Банщикова № 4, с. 95–104

Влияние тяжелых металлов на микоризацию корней бобово-ризобияльной симбиосистемы гороха посевного (*Pisum sativum* L.)

Н. И. Воробьев, Я. В. Пухальский, Т. С. Азарова, С. И. Лоскутов, Ю. В. Лактионов, Ю. В. Косильников, А. И. Ковальчук, А. П. Кожемяков № 5, с. 64–70

Плодородие и экотоксикологическое состояние светло-серых лесных почв Ивановской области

А. А. Уткин, И. Б. Нода № 5, с. 71–78

Скрининг активных нефтеструктуров из различных зон городских почв (на примере г. Баку)

С. И. Наджафова, Н. М. Исмаилов № 6, с. 66–70

Оценка модифицирующего влияния цинка и меди на токсический стресс растений ячменя, вызванный кадмием

А. В. Дикарев, Д. В. Дикарев, Д. В. Крыленкин № 7, с. 57–72

Содержание и распределение радионуклидов в профиле светло-серой лесной почвы и растениях агроценозов
А. А. Уткин, И. Б. Нода № 7, с. 73–81

Динамика показателей фитотоксичности чернозема обыкновенного при его загрязнении наночастицами серебра

Н. И. Цепина, С. И. Колесников, Т. В. Минникова, А. С. Русева № 7, с. 82–87

Нитраты и тяжелые металлы в агроценозах при длительном применении органических удобрений

Г. Е. Мерзлая № 8, с. 95–104

Повышение устойчивости растений яровой пшеницы к токсичности меди при применении ростстимулирующих ризосферных бактерий на загрязненной металлом почве

В. П. Шабает, В. Е. Остроумов № 9, с. 70–77

Сортовая дифференциация ярового ячменя по устойчивости к кадмию на основе морфометрических, биохимических показателей и продуктивности

А. В. Дикарев, Д. В. Дикарев, Д. В. Крыленкин № 10, с. 68–82

Содержание химических элементов в листьях ивы миабэ (*Salix miyabeana* Seemen), произрастающей в районе хвостохранилища дарасунского месторождения золота

В. П. Макаров № 10, с. 83–93

Ферментативная активность черноземовидной почвы при загрязнении нефтью и дизельным топливом

О. А. Пилецкая № 12, с. 72–80

Перспективные штаммы фосфатмобилизирующих ризобактерий, устойчивых к глифосату и никелю

Л. Р. Хакимова, О. В. Чубукова, Е. С. Акимова, З. Р. Вершинина № 12, с. 81–88

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение беспилотных летательных аппаратов модульного типа и искусственного интеллекта при анализе состояния посевов лубяных культур

Д. Р. Аветисян № 3, с. 66–69

Методика экспрессного спектрофотометрического определения железа в дитионитных вытяжках из почв

Н. Н. Данченко, Е. В. Цомаева, Д. А. Жулидова, Ш. А. Хаматнуров, З. С. Артемьева № 5, с. 79–84

ДИСКУССИЯ

Опыт количественного изучения разнообразия минеральных почвенных тел (педоматриц)

А. С. Фрид № 7, с. 88–108

ОБЗОРЫ

Роль плодородия почв и сорта в повышении урожайности зерновых культур

С. А. Шафран, Е. С. Козеичева № 2, с. 84–94

Анализ приемов повышения продуктивности зерновых культур для снижения межгодовой вариации их урожайности

А. А. Конищев, И. И. Гарифуллин, Е. Н. Конищева № 2, с. 95–102

Полифункциональное действие регуляторов роста на основе тритерпеноидов на растения пшеницы

Э. С. Давидянц № 3, с. 70–96

Биологическая активность почвенных бактерий, стимулирующих рост растений: фиксация азота, солюбилизация фосфата, синтез сидерофоров. перспективы разработки микробных консорциумов

А. М. Тимофеева, М. Р. Галямова, С. Е. Седых № 5, с. 85–95

Эмиссия CO₂ как мера энергоэффективности при производстве и применении удобрений

В. Н. Башкин № 6, с. 71–89

Влияние загрязнения почв свинцом на растения

В. В. Иванищев, Т. Е. Сиголаева, Л. В. Переломов № 6, с. 90–96

Оценка баланса углерода в почвах на основе определения эмиссии CO₂

И. Н. Шарков, А. С. Чумбаев, В. А. Андроханов № 9, с. 78–89

Влияние удобрений на урожайность и качество продукции масличного льна

А. В. Ивойлов № 9, с. 90–104

Управление микробным блоком биогеохимического круговорота хлорорганических пестицидов в агроэкосистемах. Сообщение 1. Микробная трансформация пестицидов

В. Н. Башкин, Р. А. Галиulina № 10, с. 94–108

Медь в почве агроэкосистем виноградников: современный взгляд на проблему

И. В. Андреева, В. В. Габечая № 11, с. 55–80

Управление микробным блоком биогеохимического круговорота хлорорганических пестицидов в агроэкосистемах. Сообщение 2. Биоремедиация экосистем, загрязненных ХОП

В. Н. Башкин, Р. А. Галиulina № 11, с. 81–96

Эффективность фосфорных удобрений: результаты исследований в длительных полевых опытах России, Великобритании и Китае

А. Н. Налиухин, Н. А. Кирпичников, С. П. Бижан, Ю. Е. Гусева № 12, с. 89–100

Правила для авторов № 5, с. 96–98

Предметный указатель к журналу «Агрохимия» за 2024 г. № 12, с. 101–108