

ISSN 0002-1881

Июнь 2024

Номер 6



АГРОХИМИЯ



НАУКА
— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2024

Научное обоснование определения потребности Российской Федерации
в минеральных удобрениях

С. А. Шафран

3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Влияние подсолнечниковых сидеральных агросообществ
на агрофизические свойства черноземов

А. М. Гребенников

13

Влияние гуминовых кислот на генерацию разности потенциалов
в биоэлектрoхимической системе

З. А. Гасиева, А. С. Галушко, Ю. В. Хомяков, Г. Г. Панова, Т. Э. Кулешова

20

Удобрения

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

29

Влияние различных систем удобрения на продуктивность
яровой пшеницы в длительном стационарном опыте

О. В. Волынкина

34

Исследование эффективности действия калийсодержащих добавок
на основе минерального сырья и промышленных отходов на качество
и урожайность картофеля

О. В. Броварова, Д. А. Шушков

42

Пестициды

Значение страховых гербицидов в стабилизации эффективности
и качества борьбы с сорняками при применении бетаналов-дженериков
на сахарной свекле

Е. А. Дворянkin

49

Агроэкология

Влияние пролонгированного действия минеральных удобрений в условиях
температурного стресса на урожайность кукурузы на силос
в степной зоне Южного Урала

В. Ю. Скорыходов

59

Экотоксикология

Скрининг активных нефтедеструкторов из различных зон
городских почв (на примере г. Баку)

С. И. Наджафова, Н. М. Исмаилов

66

ОБЗОРЫ

Эмиссия CO₂ как мера энергоэффективности при производстве и применении удобрений

В. Н. Башкин

71

Влияние загрязнения почв свинцом на растения

В. В. Иванищев, Т. Е. Сиголаева, Л. В. Переломов

90

Contents

No. 6, 2024

Scientific Substantiation of Determination of Mineral Fertilizer Needs
of the Russian Federation

S. A. Shafran

3

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Influence of Sunflower Seed Agricultural Communities
on the Agrophysical Properties of Chernozems

A. M. Grebennikov

13

Effect of Humic Acids on the Generation of Potential Differences
in a Bioelectrochemical System

Z. A. Gasieva, A. S. Galushko, Yu. V. Khomyakov, G. G. Panova, T. E. Kuleshova

20

Fertilizers

Effect of Phosphorus and Magnesium Fertilizers on Mineral Nutrition
and Yield of Winter Wheat depending on Liming of Sod-Podzolic Soil

N. A. Kirpichnikov, S. P. Bizhan, V. V. Tribelgorn

29

Effect of Various Fertilizer Systems on the Productivity of Spring Wheat
in a Long-Term Stationary Experiment

O. V. Volynkina

34

Investigation of the Potential of Potassium-Containing Additives Based
on Mineral Raw Materials and Industrial Waste on the Quality and Yield of Potatoes

O. V. Brovarova, D. A. Shushkov

42

Pesticides

Significance of Insuring Herbicides for Stabilization of Weed Control Effectiveness
and Quality when Using Betanals-Generics for Sugar Beet

E. A. Dvoryankin

49

Agroecology

Effect of Prolonged Action of Mineral Fertilizers under Conditions
of Temperature Stress on Silage Maize Yield in the Steppe Zone of the Southern Urals

V. Yu. Skorokhodov

59

Ecotoxicology

Screening of Active Oil Destructors from Various Zones of Urban Soils (on the Example of Baku)

S. I. Nadjafova, N. M. Ismaylov

66

REVIEWS

CO₂-Emissions as a Measure of Energy Efficiency in the Production
and Application of Fertilizers

V. N. Bashkin

71

Influence of Soil Pollution by Lead on Plants

V. V. Ivanishchev, T. E. Sigolaeva, L. V. Perelomov

90

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЯХ

© 2024 г. С. А. Шафран*

*Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия*

**E-mail: shafran38@mail.ru*

В работе рассмотрен вопрос научно обоснованного определения потребности в минеральных удобрениях для получения различного валового сбора зерна на ближайшую перспективу. В отличие от ранее разработанных принципов установления потребности в минеральных удобрениях изложен иной подход, который базируется на расчетах не в целом по стране, а по Федеральным округам, поскольку их природно-климатические условия весьма многообразны. Это позволило учесть вариабельность расчетных данных, влияющих на урожайность зерновых культур и эффективность применения под них минеральных удобрений. В первую очередь это относится к почвенному покрову и агрохимическим свойствам почв. Согласно полученным данным, урожайность озимой пшеницы, полученная без применения удобрений, менялась от 23.2 до 34.1 ц/га, а прибавка при внесении N60 — от 11.4 до 2.2 ц/га. Более весомый прирост урожая установлен при переходе почв по степени агрохимический окультуренности от низкой к повышенной и высокой. Урожайность озимой пшеницы на дерново-подзолистой почве при этом возрастает в 5 раз и составляет 36.7 ц/га. Аналогичные данные получены и на других типах почв. Потребность в минеральных удобрениях для получения 145–150 млн т зерна оценена в 5.4 млн т, для 170–175 млн т — в 8.4 млн т.

Ключевые слова: агрохимические свойства почв, урожайность, эффективность удобрений, потребность в минеральных удобрениях.

DOI: 10.31857/S0002188124060012, **EDN:** CYGTRX

ВВЕДЕНИЕ

Согласно прогнозу социально-экономического развития РФ на период до 2030 г., намечено значительно увеличить объем производства зерна и довести его к 2030 г. до 145–150 млн т. Для этого необходимо получить среднюю урожайность зерновых культур в целом по стране 36–38 ц/га (табл. 1) [1]. При сложившихся благоприятно погодных условиях 2017 и 2022 гг. получены рекордные для России урожаи зерновых культур. Однако за последние 5 лет средняя урожайность зерновых культур составила только 120–125 млн т.

Россия является крупным производителем минеральных удобрений. Объем их производства к настоящему времени превышает 20 млн т, включая азотные, фосфорные и калийные удобрения, из которых ≈70% составляют экспортные поставки и только 30% идут на внутренний рынок, включая сырье для производства комплексных удобрений.

В последние годы ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова разработаны новые подходы к установлению доз минеральных удобрений под ведущие сельскохозяйственные культуры в основных

природно-климатических зонах страны, создана для этого нормативно-справочная база, которая принципиально отличается от ранее разработанной. Использование этой базы позволяет при составлении систем удобрения снизить затраты питательных элементов на формирование единицы урожая, повысить их окупаемость прибавкой урожая и снизить себестоимость получаемой продукции.

Наряду с составлением системы удобрения для сельскохозяйственных предприятий немаловажное значение подобные расчеты имеют и для органов управления сельскохозяйственным производством, начиная от административных районов, республиканских, краевых и областных и заканчивая страной в целом. Для разработки таких систем необходимы данные о состоянии почвенного покрова пахотных почв и их агрономических свойств. В нашем случае будет идти разговор о потребности в минеральных удобрениях под зерновые культуры в целом для Российской Федерации, полагая, что предлагаемый ВНИИА подход к определению потребности в минеральных удобрениях может оказать содействие органам управления сельским хозяйством и предприятиям, производящим

Таблица 1. Внесение минеральных удобрений на 1 га посевной площади в сельскохозяйственных организациях Российской Федерации, кг/га

Показатель	Годы				
	2000	2010	2015	2020	2022
Доза на 1 га, кг всей посевной площади	19	38	42	49	56
Зерновые и зернобобовые культуры (без кукурузы)	20	41	45	41	43
Сахарная свекла	119	276	274	294	305
Овощебахчевые культуры	84	179	166	195	187
Картофель	155	263	328	326	392

минеральные удобрения, в рациональном их размещении по территории страны.

В связи с этим расчеты выполняли не в целом по стране, как было раньше, а по федеральным округам, поскольку их природно-климатические условия весьма многообразны.

Это позволило учесть в расчетах вариабельность исходных данных, влияющих на урожайность зерновых культур и на эффективность применения под них минеральных удобрений. В первую очередь это относится к почвенному покрову. Например, в Северо-Западном федеральном округе почти 100% занимают дерново-подзолистые почвы, которых в Центральном федеральном округе насчитывается только 39%, в то же время в этом регионе немалую долю занимают черноземы выщелоченные, типичные и обыкновенные (34%). В Южном федеральном округе распространены черноземы южные и карбонатные, а также каштановые почвы. Эти почвенные разновидности равномерно распределены по территории округа, занимая каждая примерно по 1/3 территории.

Наибольшим разнообразием отличается Приволжский федеральный округ, в котором распространены

практически все типы почв, исключая черноземы карбонатные. Среди этих разновидностей преобладают дерново-подзолистые и серые лесные почвы (31%) и черноземы типичные и обыкновенные (22%). Черноземы южные и каштановые почвы составляют соответственно 9 и 11%.

Уральский федеральный округ также выделяется большим разнообразием почвенных разновидностей, в котором преобладают серые лесные (19%), черноземы выщелоченные, типичные и обыкновенные (78%). В Сибирском федеральном округе также доминируют серые лесные почвы (14%), черноземы выщелоченные (27%), черноземы обыкновенные (11%), черноземы южные (12%), а также каштановые почвы (5%). В Дальневосточном округе наиболее распространены бурые лесные почвы (табл. 2).

Агрохимические свойства пахотных почв также заметно различаются. Например, количество сильно- и среднекислых почв в Центральном федеральном округе составляло 25, в Северо-Западном – 21, в Приволжском – 15, в Уральском – 13, в Дальневосточном – 34% (табл. 3).

Таблица 2. Распределение площади пашни по основным типам почв в федеральных округах РФ

Федеральный округ	Типы почв, %							
	д.п.	с.л.	ч.в.	ч.т.	ч.об.	ч.юж.	ч.карб.	кашт.
Северо-Западный	96	—	—	—	—	—	—	—
Центральный	39	19	4	21	8	—	—	—
Южный	—	—	—	—	—	27	33	30
Северо-Кавказский	—	—	—	—	—	—	43	50
Приволжский	18	13	9	5	17	9	—	11
Уральский	2	19	48	1	29	—	—	—
Сибирский	4	14	27	—	11	12	—	5
Дальневосточный*	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. д.п. — дерново-подзолистые почвы, с.л. — серые лесные почвы, ч.в. — чернозем выщелоченный, ч.т. — чернозем типичный, ч.об. — чернозем обыкновенный, ч.юж. — чернозем южный, ч.карб. — чернозем карбонатный, кашт. — каштановые почвы.

* Преобладают бурые лесные, буро-подзолистые и луговые почвы с различной степенью оглеения.

Таблица 3. Распределение площади пашни по степени кислотности почв по состоянию на 1 января 2021 г.

Субъекты РФ, ФО	Обследованная площадь, тыс. га	Доля почв с pH, %						
		<4.0	4.1–4.5	4.6–5.0	5.1–5.5	5.6–6.0	>6.0	среднее
РФ	100 048	0	2	11	22	19	48	6.2
Центральный	18 238	0	3	22	38	21	15	5.5
Северо-Западный	1 921	1	5	15	26	25	28	5.8
Южный	13 511	0	0	1	2	4	93	6.9
Северо-Кавказский	4 969	0	0	1	1	1	9	6.9
Приволжский	30 171	0	3	12	20	18	47	6.1
Уральский	7 396	0	2	11	38	25	23	5.6
Сибирский	20 765	0	2	8	23	30	39	6.2
Дальневосточный	3 078	1	9	24	26	14	26	5.6

Таблица 4. Распределение площади пашни по группам обеспеченности подвижным фосфором на 1 января 2021 г.

Федеральный округ	Обследованная площадь, тыс. га	Доля почв с содержанием, %						
		градации обеспеченности						среднее
		1	2	3	4	5	6	
РФ	99 939	6	16	37	21	12	7	3
Центральный	18 242	2	11	35	25	18	9	4
Северо-Западный	1 927	2	7	20	20	31	19	3
Южный	13 490	6	16	43	21	9	5	3
Северо-Кавказский	4 967	10	25	47	12	4	2	3
Приволжский	30 170	7	17	41	19	11	6	3
Уральский	7 299	11	40	32	9	4	4	3
Сибирский	20 765	3	9	34	30	15	9	4
Дальневосточный	3 078	26	22	18	8	7	18	3

Содержание подвижного фосфора существенно варьировало между федеральными округами. В Центральном округе удельный вес почв с низким и средним содержанием P_2O_5 составлял 13, в Северо-Западном – 9, в Южном – 22, в Северо-Кавказском – 25%. Наибольший удельный вес таких почв отмечен в Уральском и Дальневосточном федеральном округах – 50% (табл. 4).

По содержанию подвижного калия выделяют ся округа, представляющие Нечерноземную зону. В Центральном округе доля почв с низкой обеспеченностью подвижным калием составила 18, в Северо-Западном – 29% (табл. 5).

О влиянии агрохимических свойств почв на урожайность сельскохозяйственных культур и эффективность применения под них минеральных удобрений красноречиво свидетельствуют данные, представленные в соответствующих нормативах [2], фрагмент которых для озимой пшеницы представлен в табл. 6.

Согласно этим данным, снижение степени кислотности дерново-подзолистых почв, повышение в них содержания минерального азота, подвижных форм фосфора и калия способствовало увеличению урожайности озимой пшеницы без внесения удобрений от 7.3 до 36.7 ц/га, с применением азотных удобрений в дозе 90 кг/га – с 13.5 до 46.6 ц/га. При этом обращает внимание тот факт, что с повышением фосфатно-калийного уровня почв увеличивалась прибавка урожая от азотных удобрений на 4–5 ц/га.

Высокое влияние удобрений на урожайность зерновых культур подтверждается не только научными, но и данными сельскохозяйственного производства. Анализ применения минеральных удобрений в основных природно-климатических зонах в среднем за 2016–2020 гг. показал, что в Нечерноземной зоне дозы удобрений варьировались от 15 до 78 кг NPK/га, на черноземах европейской части – от 15 до 87 кг/га и на черноземах азиатской

Таблица 5. Распределение площади пашни по группам обеспеченности подвижным калием на 1 января 2021 г.

Федеральный округ	Обследованная площадь, тыс. га	Доля почв с содержанием, %						
		градации обеспеченности						среднее
		1	2	3	4	5	6	
РФ	99 939	1	7	18	27	27	20	4
Центральный	18 242	3	15	22	29	23	8	4
Северо-Западный	1 927	6	23	26	22	18	6	3
Южный	13 490	0	4	14	37	37	8	4
Северо-Кавказский	4 967	1	6	28	35	28	3	4
Приволжский	30 170	1	7	20	30	31	12	4
Уральский	7 299	0	3	10	19	26	42	5
Сибирский	20 765	1	5	11	16	20	47	5
Дальневосточный	3 078	1	5	25	32	27	11	4

части — 1–34 кг/га, а урожайность — соответственно от 14.6 до 45.2, от 21.3 до 54.3 и от 12.1 до 23.2 ц/га. Из приведенных данных следует, что на величину урожайности зерновых культур большое влияние оказывало внесение минеральных удобрений.

Вместе с тем немалый интерес представляют данные урожайности зерновых культур без внесения удобрений, которые получены путем вычитания прибавки от общей урожайности, которая получена при применении удобрений. По этой величине представилась возможность оценить уровень плодородия, позволяющий получить урожай без использования удобрений. Согласно полученным данным, в Пермском крае, Тверской, Костромской, Ивановской, Ярославской, Вологодской и Кировской обл. без внесения удобрений можно получить урожай зерновых культур <15 ц/га. Следует отметить, что в регионах, в которых также большой удельный вес занимают дерново-подзолистые почвы, в течение многих лет проводили работу по повышению плодородия почв. Это позволило перевести пахотные земли в более окультуренные, что способствовало получению более высоких урожаев по сравнению с вышеприведенными данными. Это относится к Московской, Ленинградской, Калининградской и Орловской обл., в которых без внесения удобрений можно получить почти в 3 раза больше урожая зерна, чем в приведенных областях.

В группе регионов европейской части страны, в которых доминируют черноземные почвы, также отмечена весьма существенная разница в урожайности без внесения удобрений. Наиболее высокий урожай зерновых культур можно получить в Краснодарском крае, который почти в 3 раза мог бы превысить сбор зерна в Самарской обл. Наблюдают немалые различия в урожайности зерновых культур даже в близлежащих друг к другу областях Центрального федерального округа. Например, в Белгородской и Курской обл. она составляет почти 40 ц/га, а в соседних Воронежской

и Тамбовской — соответственно 29.3 и 28.2 ц/га. В остальных регионах, входящих в эту группу, урожайность значительно меньше.

Используя данные агрохимической характеристики почв в федеральных округах и пользуясь нормативной информацией по влиянию агрохимических свойств различных почв на урожайность зерновых культур и эффективность применения под них минеральных удобрений, представляется возможность прогнозировать их продуктивность.

Порядок расчета приведен на примере с озимой пшеницей, возделываемой в Центральном федеральном округе. Согласно данным агрохимического обследования, пахотные почвы этого региона имеют следующую характеристику: средневзвешенный показатель рН 5.5 ед., содержание подвижных форм фосфора и калия представляет 4-ю группу обеспеченности, т.е. является повышенным. При таких агрохимических показателях нормативную урожайность озимой пшеницы без внесения удобрений оценивают в 25.7 ц/га (табл. 7).

Доля дерново-подзолистых почв в ЦФО занимает 39%. Перемножив эти величины получаем размер вклада дерново-подзолистых почв в получение общего урожая в данном регионе.

Аналогично рассчитывают также вклад других типов почв в формирование урожайности. Затем сложив полученные данные и разделив их на общую площадь, которую занимает озимая пшеница, определяется ее средняя урожайность в округе.

Аналогично проводят расчет эффективности применения азотных удобрений под озимую пшеницу. Для оценки суммарной урожайности устанавливают средневзвешенную величину прибавки урожайности при внесении N60 на всех представленных почвенных разновидностях данного округа. Размер этой прибавки, согласно нормативам, варьирует от 5.2 ц/га

Таблица 6. Урожайность озимой пшеницы и ее прибавка при внесении азотных удобрений на дерново-подзолистых почвах, ц/га

Содержание в почве, мг/кг		pH ≤5.5			pH >5.5		
		Дозы азота, кг/га			Дозы азота, кг/га		
P ₂ O ₅	K ₂ O	0	60	90	0	60	90
Содержание минерального азота в почве ≤5 мг/кг							
≤50	≤80	7.3	6.0	6.2	8.1	7.5	7.6
	81–120	9.7	7.3	7.4	10.2	8.9	9.1
	>120	12.1	7.6	7.8	12.9	9.5	9.7
51–100	≤80	9.3	8.3	8.6	10.3	10.2	10.7
	81–120	11.2	9.5	9.8	12.4	11.8	12.2
	>120	13.6	9.9	10.2	15.1	12.3	12.7
>100	≤80	12.2	8.5	9.1	13.5	10.6	11.3
	81–120	14.1	9.7	10.3	15.7	12.0	12.9
	>120	16.5	10.1	10.8	18.4	12.5	13.4
Содержание минерального азота в почве 5.1–10.0 мг/кг							
≤50	≤80	10.2	5.5	5.6	11.3	6.8	6.9
	81–120	12.9	6.6	6.7	14.3	8.1	8.3
	>120	16.2	6.9	7.1	18.1	8.6	8.8
51–100	≤80	13.0	7.5	7.8	14.4	9.3	9.7
	81–120	15.7	8.6	8.9	17.4	10.7	11.1
	>120	19.1	9.0	9.3	21.2	11.2	11.5
>100	≤80	17.0	7.7	8.3	18.9	9.6	10.3
	81–120	19.7	8.8	9.4	21.9	10.9	11.7
	>120	23.1	9.2	9.8	25.7	11.4	12.2
Содержание минерального азота в почве >10.0 мг/кг							
≤50	≤80	14.6	4.4	4.5	16.2	15.5	5.6
	81–120	18.4	5.3	5.4	20.5	6.6	6.7
	>120	23.2	5.6	5.8	25.8	7.0	7.1
51–100	≤80	18.5	6.1	6.3	20.6	7.5	7.9
	81–120	22.5	7.0	7.2	24.9	8.7	9.0
	>120	27.2	7.3	7.5	30.3	9.0	9.3
>100	≤80	24.3	6.2	6.7	27.1	7.8	8.3
	81–120	28.2	7.1	7.6	31.3	8.8	9.5
	>120	33.0	7.5	7.9	36.7	9.2	9.9

Таблица 7. Урожайность сортов озимой пшеницы на черноземе выщелоченном Ставропольского края (среднее за 2016–2018 гг.), т/га [5]

Вариант	Сорт		
	Васса	Гром	Доля
N63P32	3.4	3.6	4.0
N124P72K30	5.1	5.2	5.6
N186P95K45	7.5	7.4	7.7
N248P133K60	8.7	9.1	9.2

 Примечание. pH 6.1–6.5 ед., содержание P₂O₅ – 20–25, K₂O – 220–270 мг/кг.

Таблица 8. Применение минеральных удобрений в среднем за 2018–2022 гг., кг/га

Федеральный округ	Хозяйства всех категорий							
	зерновые				кукуруза			
	сумма	азот	фосфор	калий	сумма	азот	фосфор	калий
РФ	39	27	8	4	80	48	18	14
Центральный	78	53	13	11	126	73	25	28
Северо-Западный	91	60	15	16	218	15	53	50
Южный	51	39	14	3	47	31	13	6
Северо-Кавказский	65	39	21	2	42	26	15	6
Приволжский	22	18	4	3	48	39	11	8
Уральский	19	14	2	1	67	45	11	3
Сибирский	12	10	3	1	118	25	9	4
Дальневосточный	11	10	3	1	110	80	34	24

на черноземах типичных и обыкновенных до 11.4 ц/га на дерново-подзолистых почвах (табл. 8).

Расчеты показали, что средневзвешенная урожайность озимой пшеницы без внесения удобрений составляет 25.2 ц/га, а прибавка урожайности при внесении азотных удобрений в дозе 60 кг/га равна 8.4 ц/га, т.е. суммарная урожайность составит 33.6 ц/га.

Подобные расчеты были выполнены и для других зерновых культур и федеральных округов, которые показали, что при этом следует ожидать получения ≈ 132 млн т зерна, что соответствует действительности. Согласно статистическим данным, в последние 5 лет сбор зерновых культур составил 120–125 млн т зерна.

При расчете потребности в применении минеральных удобрений следует учитывать не только расход питательных веществ на формирование планируемой урожайности, но и предусматривать пополнение запасов элементов питания в почвах. В данном случае система применения удобрений должна обеспечивать полное возмещение выноса питательных веществ урожаями из почв, которые относятся к хорошоокультуренным по агрохимическим показателям, и превышать вынос из низкоокультуренных почв.

При этом следует также предусмотреть увеличение доз азотных удобрений для того, чтобы повысить урожайность зерновых культур и довести валовой сбор зерна до 145–150 млн т. Вместе с тем необходимо учесть, что в последнее время произошла значительная сортосмена. Выведены новые высокоурожайные сорта зерновых культур. Например, сорта озимой пшеницы МосНИИСХ дают возможность получить на высокоокультуренных дерново-подзолистых почвах при внесении под них N90–120 урожай 70–80 ц/га, а в отдельные годы сбор зерна достигал 100 ц/га [3, 4]. Аналогичные результаты были достигнуты на серых лесных [5] и черноземных почвах.

Например, в опытах, проведенных на типичных черноземах Курской обл. при близких погодных

и агрохимических условиях, урожайность озимой пшеницы сорта Мироновская 808, которая доминировала во второй половине прошлого столетия и современного сорта Льговская 4 составила соответственно при внесении N60P60K60 26.9 и 49.0 ц/га, прибавка при применении азотного удобрения составила 5.7 и 12.2 ц/га соответственно [6]. Аналогичные результаты были получены на выщелоченных черноземах Тамбовской обл., где внесли N90 под районированный сорт ячменя Саншайн на фоне P60K60 и получили урожайность 51.8 ц/га, где прибавка при применении азота составила 14.9 ц/га, тогда как от сортов более ранней селекции Дворан и Вальтицки только 3.6 и 3.1 ц/га соответственно [9]. Наглядным примером могут служить также опыты, проведенные на черноземе выщелоченном в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края, которые показали, что в среднем за 3 года исследования урожайность озимой пшеницы >5 т/га можно получить только при внесении необходимого количества питательных элементов, поскольку все новые сорта предъявляют высокие требования к условиям минерального питания и хорошо отзываются на внесение удобрений. Применение высоких доз NPK (441 кг/га) повысило урожайность по сравнению с N63P52 в зависимости от сорта на 5.2–5.6 т/га (табл. 9) [8].

Как было выше сказано, потребность в минеральных удобрениях формируется из 2-х составляющих, первая из которых — это определение потребности на планируемый урожай, исходя из нормативных данных, в которых отражено влияние комплекса агрохимических свойств различных почв на урожайность зерновых культур и на эффективность применения под них азотных, фосфорных и калийных удобрений. Одним из основополагающих показателей при определении потребности в удобрениях является величина урожайности сельскохозяйственных культур, которую можно получить без внесения удобрений. В практике сельскохозяйственного производства сложилось так,

Таблица 9. Нормативная урожайность зерновых культур на основных типах почв, ц/га

Тип почвы	Пшеница озимая	Пшеница яровая	Рож озимая	Ячмень	Овес	Кукуруза на зерно
Дерново-подзолистые почвы	25.7	21.8	19.6	33.3	18.7	—
Серые лесные почвы	25.9	21.6	18.2	37.9	—	—
Черноземы выщелоченные	30.9	28.3	—	31.1	—	36.8
Черноземы типичные и обыкновенные	23.2	39.5	—	29.1	—	43.2
Черноземы южные	47.1	39.5	—	29.1	—	—
Черноземы карбонатные	34.0	—	—	38.7	—	45.4
Каштановые почвы	25.0	38.7	—	25.7	—	—

что планируемая урожайность устанавливается, как правило, по ее средней величине, достигнутой за последние 3–5 лет в среднем в сельскохозяйственном предприятии. В результате на полях, различающихся по уровню плодородия, устанавливается одинаковая урожайность и, следовательно, дозы удобрений, что приводит к внесению необоснованно высоких доз удобрений в одних случаях, в других — недостаточных для получения намеченной урожайности. Это в итоге ведет к экономическим и экологическим издержкам.

Использование для этих целей нормативов ВНИИА позволяет избежать упомянутых недостатков и способствовать более рациональному использованию минеральных удобрений. Используя таким образом эти нормативы, была установлена нормативная урожайность основных зерновых культур в зависимости от типа почв и их агрохимических свойств в федеральных округах, которую можно получить без внесения удобрений (табл. 7). Урожайность озимой пшеницы варьировала между типами почв от 23.2 до 47.1, ячменя — от 29.1 до 38.7, кукурузы — от 36.8 до 45.4 ц/га. Располагая сведениями об удельном весе каждой культуры в структуре посевных площадей региона, рассчитывали средневзвешенный показатель. Например, в Центральном федеральном округе средняя урожайность зерновых культур составила 25.2 ц/га.

Аналогично определяли и средневзвешенную прибавку урожайности при внесении N60 под все возделываемые в регионе зерновые культуры. Для этого использовали данные, представленные в табл. 10.

Сложение нормативных величин урожайности зерновых культур, которые можно получить без внесения удобрений, и прибавки урожайности при внесении азотных удобрений составляет суммарную урожайность 31 ц/га, а валовой сбор зерна — 145–150 млн т. Наряду с азотными удобрениями следует учесть также и применение фосфорных и частично калийных удобрений, предполагая их внести в форме комплексных удобрений (аммофоса, диаммофоса и азофоски) в рядки при посеве. Причем их следует применить не только в тех округах, где их уже использовали (Центральный, Северо-Западный, Южный

и Северо-Кавказский), но и в Приволжском, Уральском, Сибирском и Дальневосточном округах.

В связи с этим потребность в удобрениях должна быть рассчитана не только на получение урожая, но и на повышение плодородия почв. Это вызвано тем, что в настоящее время значительная часть пахотных почв нуждается в агрохимическом окультуривании, что вызывает необходимость определять потребность в минеральных удобрениях как на планируемый урожай, так и на повышение содержания питательных веществ в почве. В первую очередь это касается обеспеченности почв подвижными формами фосфора и — в Нечерноземной зоне — также калия.

Для быстрого окультуривания почв по содержанию подвижного фосфора лучше всего использовать фосфоритную муку, которая представляет собой тонкоизмельченный фосфорит. Ее можно применять на всех почвах, характеризующихся низким содержанием P_2O_5 и повышенной кислотностью.

В связи с этим данный агроприем следует использовать в федеральных округах, где распространены дерново-подзолистые и серые лесные почвы. Сюда относятся Центральный, Северо-Западный, Приволжский, Уральский и Сибирский округа, в которых доля пашни с очень низким и низким содержанием фосфора занимает 13% в Центральном округе, 9 — в Северо-Западном, 24 — в Приволжском, 51 — в Уральском и 12% — в Сибирском. Для перевода таких почв в группу повышеннообеспеченных требуется внести соответственно 350 и 760 тыс. т P_2O_5 в форме фосфоритной муки.

В случае, когда поставлена задача все почвы с неудовлетворительной обеспеченностью подвижным фосфором перевести до уровня повышеннообеспеченных, необходимо внести также фосфоритную муку в почвы со средним содержанием P_2O_5 . Для этого требуется еще 950 тыс. т P_2O_5 в виде фосфоритной муки. Следовательно, в целом требуется 2071 тыс. т P_2O_5 в форме фосфоритной муки (табл. 11).

Известно, что одним из способов эффективного использования минеральных удобрений

Таблица 10. Нормативная прибавка урожайности при внесении N60 на различных почвах

Тип почвы	Нормативная прибавка урожайности, ц/га				
Дерново-подзолистые	11.4	7.5	7.3	8.0	9.7
Серые лесные	7.5	3.8	6.3	7.8	—
Черноземы выщелоченные	6.5	2.9	5.8	—	—
Черноземы типичные	5.2	2.9	3.5	—	—
Черноземы южные	5.2	2.9	3.5	—	—
Черноземы обыкновенные	6.7	2.9	0.7	—	—
Черноземы карбонатные	3.6	—	0.9	—	—
Каштановые	2.2	2.1	0.5	—	—

Таблица 11. Потребность в фосфоритной муке для агрохимического окультуривания почв

Федеральный округ	Площадь почв, подлежащих фосфоритованию, тыс. га		Потребность в фосфоритной муке, тыс. т	
	для получения 145—150 млн т	для получения 170—175 млн т	для получения 145—150 млн т	для получения 170—175 млн т
Центральный	641	2366	311	698
Северо-Западный	28	92	14	29
Приволжский	985	2667	508	886
Уральский	362	589	181	231
Сибирский	199	760	100	227
Всего	2215	6474	1114	2071

Таблица 12. Прибавка урожайности сельскохозяйственных культур при припосевном внесении удобрений, ц/га [11]

Культуры	Прибавка, ц/га	
	от фосфорных удобрений	от комплексных удобрений
Дерново-подзолистые и серые лесные почвы		
Озимая пшеница, озимая рожь	2.7	6.5
Яровая пшеница, яровой ячмень, овес	1.5	2.3
Черноземы выщелоченные и оподзоленные		
Озимая пшеница	3.3	4.0
Озимая рожь	3.1	5.1
Яровая пшеница	1.5	2.3
Яровой ячмень, овес	1.6	4.9
Черноземы обыкновенные, южные, карбонатные		
Озимая пшеница	1.4	1.8
Яровая пшеница, яровой ячмень	2.5	4.0
Кукуруза на зерно	3.2	4.1
Каштановые почвы		
Яровая пшеница	2.2	3.0
Ячмень	1.8	3.1

является их припосевное внесение. Для этой цели можно использовать только гранулированные фосфорсодержащие удобрения. В настоящее время химическая промышленность выпускает аммофос, диаммофос и азофоску, тогда как несколько лет назад для сельского хозяйства выпускали еще

гранулированный простой и двойной суперфосфат. В связи с этим при изучении эффективного припосевного внесения удобрений наряду с вышеуказанными формами использовали обе формы суперфосфата. Результаты такого обобщения приведены в табл. 12 [7].

Таблица 13. Общая потребность зерновых культур в минеральных удобрениях на 2030 г., тыс. т

Федеральный округ	На получение 145–150 млн т	На получение 170–175 млн т
РФ	5395	8420
Центральный	1076	1972
Северо-Западный	44	79
Южный	833	1390
Северо-Кавказский	288	478
Приволжский	1699	2474
Уральский	485	637
Сибирский	925	1327
Дальневосточный	45	62

Таблица 14. Потребность зерновых культур в минеральных удобрениях в целом в Российской Федерации, млн т

Показатель	Удобрения			Всего
	азотные	фосфорные	калийные	
Применение в среднем за 2018–2022 гг.	2.2	0.7	0.5	3.4
Потребность на получение урожая 145–150 млн т	3.3	1.6	0.5	5.4
Потребность на получение урожая 170–175 млн т	4.4	3.0	1.0	8.4

Из приведенных данных следует, что внесение минеральных удобрений в рядки при посеве зерновых культур обеспечивает достаточно ощутимую прибавку урожайности на всех изученных типах почв. При этом наибольший эффект был получен при использовании комплексных удобрений. Прирост урожая зерновых культур при применении суперфосфата составил в среднем 2.3 ц/га, комплексных удобрений — 3.7 ц/га. Это дает основание планировать на всей посевной площади в качестве обязательного агроприема припосевное внесение комплексных удобрений.

В случае, где предусмотрено на всей посевной площади выращивания зерновых культур внесение комплексных удобрений в расчете N10P10K10, потребность в минеральных удобрениях составит в сумме 1427.2 тыс. т. Если увеличить дозу в 2 раза, для этого потребуется ≈3 млн т трехкомпонентных удобрений, из которых значительная часть приходится на Центральный, Южный и Приволжский федеральные округа.

Таким образом, общая потребность зерновых культур в минеральных удобрениях составляет для валового сбора зерна 120–125 млн т — 3.4 млн т, для 145–150 млн т — 5.4, для 170–175 млн т — 8.4 млн т (табл. 13, 14).

При этом обращает внимание тот факт, что при обосновании потребности в видах удобрений особое внимание было уделено увеличению доли фосфорных удобрений. Если в настоящее время применение фосфорных удобрений в 3 раза меньше по сравнению с азотными, то в ближайшей перспективе

потребность в фосфорсодержащих удобрениях должна возрасти в 3–4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные данные еще раз убеждают в том, что добиться повышения урожайности зерновых культур можно только за счет увеличения применения минеральных удобрений. Об этом свидетельствуют результаты многочисленных полевых опытов, проведенных в различных природно-климатических зонах страны, и планомерной научно обоснованной работы по повышению плодородия почв, которую проводили в годы интенсивной химизации. За этот период значительно снизилась кислотность почв, повысился их фосфатный и калийный потенциал, что позволило перевести низкоплодородные почвы в повышенноокультуренные, обеспечив тем самым их продукционную способность. Поэтому переход низкоокультуренных почв в высокоокультуренные содействовал приросту урожайности озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах в 5.0 раз, на серых лесных — в 4.6, на черноземах выщелоченных — в 3.8, на карбонатных — в 3.7 раза.

Кроме того, снижение кислотности и повышение содержания в почвах подвижных форм фосфора и калия оказывает положительное влияние на эффективность применения азотных удобрений. Все это отражено в нормативах, которые были положены в основу разработки методики определения потребности в минеральных удобрениях на ближайшую перспективу.

Сохранение достигнутого в последние годы уровня применения минеральных удобрений в 3.4 млн т позволит получать 125–130 млн т зерна в среднем за год. Доведение применения минеральных удобрений до 5.4 млн т даст возможность получить ежегодный валовой сбор зерна 145–150 млн т. При этом особое внимание будет уделено повышению фосфатного уровня почв и переводу площадей из низкообеспеченных подвижным фосфором в повышеннообеспеченные. Потребность в фосфорсодержащих удобрениях должна увеличиться в 3 раза, что составит 2.1 млн т.

При этом необходимо учитывать, что приросту урожайности будет способствовать также внедрение в производство новых сортов зерновых культур, которые лучше отзываются на уровень плодородия почв и минеральные удобрения по сравнению с ранее районированными сортами. Для получения валового сбора зерна 170–175 млн т требуется дальнейшее увеличение применения региональных удобрений под зерновые культуры. Для получения намеченного сбора зерна необходимо увеличение средней урожайности в стране до 36–37 ц/га, тогда как в настоящее время она составляет 26–27 ц/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев В.Н., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3–13.
2. Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур. М.: ВНИИА, 2016. 115 с.
3. Сандухадзе Б.И. Факторы урожайности озимой пшеницы в условиях Нечерноземья // *Плодородие*. 2021. № 4. С. 66–70.
4. Журавлева Е.В. Научное обоснование повышения продуктивности и качества зерна интенсивных сортов озимой пшеницы в земледелии Центрального Нечерноземья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М.: МОСНИИСК "Немчиновка", 2011. 40 с.
5. Политыко П.М., Киселев Е.Ф., Долгих А.В. Воздействие удобрений и защиты растений на качество зерна интенсивных сортов озимой пшеницы // *Пробл. агрохим. и экол.* 2016. № 1. С. 10–17.
6. Пироженко В.В. Эффективность применения азотных удобрений под сорта озимой пшеницы различных периодов селекции // *Плодородие*. 2018. № 4. С. 24–25.
7. Бабунов А.Б. Сравнение эффективности применения минеральных удобрений на сортах ярового ячменя разных периодов селекции // *Плодородие*. 2017. № 4. С. 22–24.
8. Ожередова А.Ю., Есаулко А.Н. Влияние минеральных удобрений на содержание элементов питания в растениях и урожайность зерна озимой пшеницы // *Плодородие*. 2019. № 4. С. 6–8.
9. Шафран С.А. Ассортимент минеральных удобрений и экономическая эффективность их применения. М.: ВНИИА, 2020. 226 с.

Scientific Substantiation of Determination of Mineral Fertilizer Needs of the Russian Federation

S. A. Shafran[#]

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

[#]E-mail: shafran38@mail.ru

The paper considers the issue of scientifically based determination of the need for mineral fertilizers to obtain various gross grain harvest in the near future. In contrast to the previously developed principles for determining the need for mineral fertilizers, a different approach is outlined, which is based on calculations not for the whole country, but for Federal Districts, since their natural and climatic conditions are very diverse. This made it possible to take into account the variability of the calculated data affecting the yield of grain crops and the effectiveness of the use of mineral fertilizers for them. First of all, this applies to the soil cover and agrochemical properties of soils. According to the data obtained, the yield of winter wheat obtained without the use of fertilizers varied from 23.2 to 34.1 c/ha, and the increase in N60 was from 11.4 to 2.2 c/ha. A more significant increase in yield was established during the transition of soils according to the degree of agrochemical cultivation from low to increased to high. The yield of winter wheat on sod-podzolic soil increases 5 times and amounts to 36.7 kg/ha. Similar data were obtained on other types of soils. The need for mineral fertilizers to produce 145–150 million tons of grain is estimated at 5.4 million tons, for 170–175 million tons – at 8.4 million tons.

Keywords: agrochemical properties of soils, yield, fertilizer efficiency, the need for mineral fertilizers.

УДК 631.584.2:633.854.78:631.43:631.445.41

ВЛИЯНИЕ ПОДСОЛНЕЧНИКОВЫХ СИДЕРАЛЬНЫХ АГРОСООБЩЕСТВ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ

© 2024 г. А. М. Гребенников*

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

В полевом опыте изучили влияние бинарных сидеральных подсолнечниковых смесей на объемную массу, коэффициент структурности и степень агрегатности пахотного и подпахотного горизонтов чернозема типичного тяжелосуглинистого. Показано, что смешивание посевов в сидеральных агрообществах в большинстве случаев приводило к возрастанию урожайности последующих зерновых культур и улучшению рассмотренных агрофизических свойств чернозема. Снижение объемной массы, увеличение коэффициента структурности и степени агрегатности как в пахотном, так и в подпахотном горизонте под всеми смешанными агрообществами было более эффективным по сравнению с этими же горизонтами под вариантами с чистыми посевами. Наиболее значительным было улучшение агрофизических свойств в почвах под агрообществами соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник. Способность смешанных сидеральных агрообществ эффективно снижать объемную массу позволяет уменьшить ее на переуплотненных почвах, тем самым повышая качество этих почв.

Ключевые слова: бинарные сидеральные смеси, подсолнечник, продуктивность сидератов, урожайность зерновых культур, агроценотический эффект, агрофизические свойства почвы, чернозем.

DOI: 10.31857/S0002188124060023, **EDN:** CYGBYX

ВВЕДЕНИЕ

К моменту цветения подсолнечник формирует значительную фитомассу, содержащую в сбалансированных количествах все элементы питания растений, необходимые им для роста и развития. Это делает подсолнечник перспективным для его успешного использования в качестве зеленого удобрения, улучшающего комплекс свойств почв, определяющих их плодородие и фитосанитарное состояние [1–3]. Например, запашка подсолнечника как сидерата в Нечерноземной зоне России обеспечивала прибавку урожайности зерна озимых и яровых культур в среднем на 5–10, картофеля — на 50–90, зеленой массы кукурузы — на 50–70 и силосных — на 40–100 ц/га [4]. Применение подсолнечника в качестве сидеральной культуры может быть экономически эффективным приемом. Например, в полевых опытах на маломощной луговой осолоделой почве урожайность ячменя после сидерального подсолнечникового пара была больше на 2.9 ц/га, чем урожайность этой культуры, посеянной на поле после чистого пара, а себестоимость

подсолнечникового пара была меньше себестоимости чистого пара на 14% [5].

Однако эффективность применения подсолнечника в качестве сидерата можно значительно увеличить, если использовать не чистые посевы этой культуры, а смесь культур, экологически и аллелопатически совместимых с подсолнечником. Такие смеси могут значительно превосходить чистые посевы их компонентов по продуктивности и концентрировать в биомассе больше элементов минерального питания растений в сбалансированных количествах [6, 7].

При использовании для сидерации смешанных агрообществ в сравнении с чистыми посевами их компонентов часто отмечали значительное улучшение всего комплекса свойств почв, определяющих плодородие, а также фитосанитарного состояния культур, выращиваемых после заделки сидератов [8–10].

Однако информация о влиянии сидеральных смесей с подсолнечником на их продуктивность и свойства почв, представленная в литературе, чрезвычайно скупа, требует дальнейших исследований, но при этом иногда встречаются сведения, указывающие

на преимущества использования сидеральных смесей с подсолнечником по отношению к чистым посевам культур, составляющих эти смеси.

Улучшение водно-физических свойств почв может происходить не только под пологом бобово-злаковых смесей. Например, по данным Г.Н. Гаврилова [11], оструктурирующее действие на почву смеси кукуруза + подсолнечник превосходило аналогичный эффект от чистых посевов этих культур, а подсолнечник в смеси с кукурузой оказывал более позитивное влияние на структуру почв по сравнению со смесью кукурузы и бобового компонента, в качестве которого был взят эспарцет.

В опытах, проведенных в условиях Кемеровской области, дерново-подзолистая почва под смесью с участием подсолнечника была насыщена корнями в 1.5–2.0 раза больше по сравнению с почвой под чистыми посевами этих культур [12]. Это позволило, с одной стороны, уменьшить объемную массу почвы, что является особенно актуальным для переуплотненных почв, длительное время используемых в земледелии [13, 14]. С другой стороны, уменьшение объемной массы переуплотненных почв соответствует улучшению их качества [15], поэтому сидерация почв смешанными посевами может быть одним из способов улучшения качества почв.

Цель работы — оценка влияния подсолнечниковых сидератов, выращенных в чистых посевах и в смесях с другими культурами, на агрофизические свойства чернозема.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевом опыте с сидератами, состоящими из чистых посевов гречихи сорта Деметра, гречихи сорта Крылатая, сои сорта Октябрьская, подсолнечника сорта Енисей и их бинарных смесей с подсолнечником вели учет продуктивности сидеральных агроценозов и урожайности последующих зерновых культур. Опыты проводили в 3-х повторностях на стационаре Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева (Курская обл.) в период с 2001 по 2005 г. Почвы опытного участка были представлены тяжелосуглинистыми мощными типичными черноземами.

На учетной площади каждой делянки, составлявшей 280 м² (5.6 × 50 м), сплошным методом определяли величину продуктивности сидеральных культур и урожайность озимой и яровой пшеницы, которые по годам исследования чередовались с посевами сидератов.

В годы закладки и окончания проведения опытов в пахотном (0–25 см) и подпахотном (25–40 см) горизонте определяли объемный вес чернозема.

В год окончания опытов в тех же горизонтах определяли его гранулометрический и микроагрегатный состав. Полученные результаты использовали для расчета фактора структурности и степени агрегатности, отражающих водоустойчивость и водопрочность почвенной структуры. Для определения агрофизических свойств использовали методики, приведенные в [16].

Для оценки влияния фактора смешивания посевов на изменение исследованных показателей был разработан метод построения вариантов сравнения [17]. Суть этого метода состояла в расчетном построении для каждого смешанного агроценоза варианта сравнения из соответствующих чистых посевов таким образом, чтобы единственным различием между смешанным агроценозом и вариантом сравнения было наличие фактора смешивания в первом случае и отсутствие — во втором. Для исследованных показателей вариант сравнения рассчитывали по следующей формуле: $Vs_i = P_i \times W_i / \text{Sum}(W_i)$, где Vs_i — вариант сравнения для i -й культуры, P_i — величина исследуемого показателя в чистых посевах i -й культуры, W_i — доля i -й культуры в смешанном посеве, определенная как количество семян этой культуры, отнесенных к норме высева, соответствующей нормальным по плотности посевам ($W_i = Q_i / N_i$), Sum — указатель суммы. Если исследованный показатель имел начальную и конечную величину как у объемного веса, определенного при закладке и окончании опыта, то P_i было равно разности между конечной и начальной величиной этого показателя. Влияние фактора смешивания на продуктивность агроценоза и свойства почв определяли как разность между величинами этих показателей в смешанном агроценозе и в варианте сравнения.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным исследования, были рассчитаны средние за годы проведения наблюдений величины продуктивности надземной фитомассы в чистых посевах сидератов и их бинарных смесях, урожайности зерновых культур и показатели физических свойств почв в пахотном и подпахотном горизонтах чернозема (табл. 1).

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

Сидерат	Продуктивность, г сухого вещества/м ² *	Урожайность зерновых, ц/га**	Снижение объемной массы, г/см ³		Коэффициент структурности		Степень агрегатности	
					%			
			1	2	1	2	1	2
Соя	410	32.7	0.06	0.03	93.1	91.8	84.7	85.6
Подсолнечник	720	32.3	0.04	0.02	95.5	93.9	84.7	85.3
Пайза	480	31.9	0.04	0.02	94.4	93.3	84.3	85.2
Гречиха сорта Крылатая	520	32.8	0.06	0.03	92.4	91.2	82.2	78.3
Гречиха сорта Деметра	570	32.0	0.07	0.02	93.1	91.7	85.8	81.3
Соя + подсолнечник	855	32.9	0.09	0.07	97.8	94.6	89.7	89.6
Подсолнечник + пайза	985	33.3	0.13	0.09	98.5	96.3	90.4	89.4
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	890	33.8	0.08	0.06	95.6	94.1	85.6	83.6
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	905	34.3	0.09	0.06	96.0	94.5	87.9	85.1

Примечание. В графе 1 — Апах, 2 — Аподпах горизонт. То же в табл. 3.

* $HCP_{05} = 79$ г сухого вещества/м².

** $HCP_{05} = 1.1$ ц/га.

Продуктивность всех без исключения смешанных агрообществ существенно превосходила чистые посевы составляющих их компонентов. Особенно высокой была продуктивность агрообщества подсолнечник + пайза, которая была значимо больше не только продуктивности чистых сидеральных посевов, но и всех остальных агрообществ.

Максимальные урожайности зерновых культур были приурочены к вариантам с агрообществами подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра. Наиболее высокая урожайность на делянках с чистыми посевами сидератов была достигнута в варианте с гречихой сорта Крылатая. Однако урожайность зерновых в этом варианте незначительно превосходила соответствующий показатель в вариантах с чистыми посевами и существенно не отличалась от аналогичных показателей на большинстве делянок, где в качестве сидератов использовали бинарные смеси. Лишь в варианте с сидеральным агрообществом подсолнечник + гречиха сорта Деметра урожайность зерновых была значимо больше соответствующей величины в варианте с чистыми сидеральными посевами гречихи сорта Крылатая.

За период проведения опыта объемная масса почвы пахотного горизонта уменьшилась во всех вариантах. Под чистыми посевами этот показатель снизился на 0.04–0.07 г/см³. Снижение объемной массы почвы пахотного горизонта под всеми смешанными агрообществами превосходило уменьшение плотности этого горизонта во всех

вариантах с чистыми посевами и составляло 0.08–0.13 г/см³.

В рамках сходных тенденций происходило изменение плотности подпахотного горизонта. Его объемная масса под чистыми посевами уменьшилась на 0.02–0.03 г/см³. Под смешанными агрообществами уменьшение плотности этого горизонта было более заметным и составляло 0.06–0.09 г/см³.

Из этого следует, что использование в качестве сидератов смешанных агрообществ по сравнению с чистыми посевами культур приводило к более выраженной тенденции к снижению объемной массы почвы пахотного и подпахотного горизонтов. Это было связано с преимущественным положительным влиянием агроценотического эффекта в рассматриваемых агрообществах на плотность чернозема. Такая направленность воздействия на переуплотненных почвах, используемых в земледелии, позволяет оптимизировать объемную массу, тем самым повышая качество пахотных почв [18].

Смешанные агрообщества по сравнению с чистыми посевами оказывали более выраженное позитивное влияние на структуру почвы пахотного горизонта. Коэффициент структурности почвы под ними изменялся от 95.6 до 98.5%, что было больше по сравнению с соответствующими величинами этого показателя под чистыми посевами, составлявшими 92.4–95.5%.

Наиболее высокие показатели коэффициента структурности почвы в пахотном горизонте, равные 97.8 и 98.5%, были отмечены под

агросообществами соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник. Эти величины были заметно больше максимального коэффициента структурности в вариантах под чистыми посевами, которое было отмечено под подсолнечниковым сидератом и равнялось 95.5%. Величины коэффициента структурности почвы в пахотном горизонте в остальных вариантах опыта с чистыми и смешанными посевами соответственно изменялись в пределах 92.4–94.4 и 95.6–96.0%.

В подпахотном горизонте, так же как и в пахотном, наиболее высокими величинами коэффициента структурности 94.6 и 96.3% характеризовались бинарные смеси подсолнечника с соей и пайзой. Максимальный коэффициент структурности в слое 25–40 см почвы среди вариантов с чистыми посевами сидератов, так же как и в слое 0–25 см, отмечен в вариантах с подсолнечником и был равен 93.9%. Величины коэффициента структурности почвы в подпахотном горизонте в остальных вариантах опыта с чистыми и смешанными посевами соответственно составляли 91.2–93.3% и 94.1–96.3%.

Таким образом, величина коэффициента структурности чернозема как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах была наиболее высокой под бинарными смесями подсолнечника с соей и пайзой. При этом величины коэффициента структурности под смешанными посевами как в слое 0–25, так и 25–40 см превосходили соответствующие показатели почвы под чистыми посевами.

Наиболее высокими показателями степени агрегатности почвы пахотного горизонта, равными 89.6 и 90.4%, характеризовались смешанные агро-сообщества соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник. В порядке уменьшения этого показателя следовал агроценоз подсолнечник + гречиха сорта Деметра, степень агрегатности слоя 0–25 см почвы под которым составила 87.9%, далее располагались чистые посевы гречихи сорта Деметра и агро-сообщество гречиха сорта Крылатая + подсолнечник, рассматриваемый показатель в вариантах с которыми имел близкие величины, соответственно

равные 85.8 и 85.6%. В пахотном горизонте в остальных вариантах опыта, представленных чистыми посевами сидератов, степень агрегатности составляла 82.2–84.7%.

В подпахотном горизонте, так же как и в слое 0–25 см, максимальную степень агрегатности почвы отмечали под агро-сообществами соя + подсолнечник (89.6%) и пайза + подсолнечник (89.4%). Под агро-сообществами гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и подсолнечник + гречиха сорта Деметра степень агрегатности подпахотного горизонта была несущественно меньше и соответственно равнялась 83.6 и 85.1%. В 3-х случаях из 5-ти степень агрегатности почвы подпахотного горизонта под чистыми посевами сидеральных культур (соя, подсолнечник, пайза) была несколько больше соответствующих показателей слоя 25–40 см под бинарными смесями подсолнечника с разными сортами гречихи и составляла 85.2–85.6%. В остальных 2-х вариантах с чистыми посевами гречихи сорта Крылатая и сорта Деметра степень агрегатности почвы подпахотного горизонта была минимальной и составляла соответственно 78.3 и 81.6%.

Агроценоотические эффекты для продуктивности сидеральных агро-сообществ и урожайности зерновых культур были рассчитаны по разности между величинами этих показателей в вариантах с агро-сообществами и вариантах сравнения (табл. 2).

Исходной информацией для расчета агроценоотических эффектов были данные табл. 1. Под влиянием агроценоотического эффекта продуктивность сидеральных агро-сообществ изменялась неодинаковым образом. Она значительно возрастала в агро-сообществах гречиха сорта Деметра + подсолнечник, гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и соя + гречиха сорта Деметра, менее увеличивалась в смеси соя + гречиха сорта Крылатая, незначительно уменьшалась в сорто-смесях гречихи. Примерно такие же тенденции прослежены в воздействии фактора смешивания на урожайность зерновых культур.

Таблица 2. Величина агроценоотического эффекта в вариантах с сидеральными агро-сообществами и посеянными в этих вариантах зерновыми культурами

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

* *Pa*, *Pвс*, *АЭ*, *Уа* и *Увс* – соответственно продуктивность сидеральных агро-сообществ, продуктивность вариантов сравнения, агроценоотический эффект, урожайность зерновых на делянках, ранее занятых сидеральными агро-сообществами, урожайность зерновых в вариантах сравнения.

Таблица 3. Влияние фактора смешивания на агрофизические свойства пахотного и подпахотного горизонтов чернозема

Вариант	Снижение объемной массы, г/см ³		Коэффициент структурности		Степень агрегатности	
			%			
	1	2	1	2	1	2
Соя + подсолнечник	0.04	0.05	3.5	1.8	5.0	4.1
Подсолнечник + пайза	0.09	0.07	3.5	2.7	5.9	4.1
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	0.03	0.03	1.6	1.6	2.1	1.7
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	0.03	0.04	1.7	1.7	2.6	1.8

Аналогичным образом были рассчитаны агроценотические эффекты для исследованных агрофизических свойств чернозема (табл. 3).

Воздействие агроценотического эффекта определяло тенденцию к уменьшению объемной массы почвы пахотного горизонта под всеми исследованными агросообществами. В наибольшей степени это было выражено под агросообществом подсолнечник + пайза, плотность пахотного горизонта под которыми уменьшилась на 0.09, подпахотного — на 0.07 г/см³. Влияние агроценотического эффекта на разрыхление пахотного и подпахотного горизонта под агросообществом соя + подсолнечник было меньше, и в слое 0–25 см объемная масса снизилась на 0.04, в слое 25–40 см — на 0.05 г/см³. В остальных 2-х агроценозах влияние фактора смешивания на разрыхление почв было незначительно меньше.

Под воздействием фактора смешивания произошло увеличение коэффициента структурности почвы под всеми агросообществами как в пахотном, так и в подпахотном горизонте. Наиболее выраженное оструктурирование почв под влиянием агроценотического эффекта произошло под агросообществами соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник, под которыми в слое 0–25 см коэффициент структурности почвы возрос на 3.5%, в слое 25–40 см — соответственно на 1.8 и 2.7%. Влияние фактора смешивания на оструктурирование почв под агроценозами гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и гречиха сорта Деметра + подсолнечник

было менее выраженным и привело к увеличению коэффициента структурности почвы в обоих горизонтах под первым агросообществом на 1.6, под вторым — на 1.7%.

Влияние агроценотического эффекта приводило к увеличению степени агрегатности в почвах обоих горизонтов под всеми агросообществами. Так же как и коэффициент структурности, наиболее значительно степень агрегатности почвы возросла под агросообществами соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник. В подпахотном горизонте степень агрегатности под этими агроценозами соответственно увеличилась на 5.0 и 5.9%, в подпахотном — на 4.1% под каждой из смесей. Увеличение степени агрегатности почвы под агросообществами подсолнечника с разными сортами гречихи было менее выраженным и составило в слое 0–25 см 2.1–2.6, в слое 25–40 см — 1.7–1.8%.

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

Показано, что продуктивность сидератов в опыте была достоверно связана с урожайностью последующих зерновых культур, т.к. величина коэффициента корреляции между этими показателями (0.71) была больше критической величины этого коэффициента, равной 0.67 на 5%-ном уровне значимости при 7-ми степенях свободы.

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

Показатель урожая	Урожайность зерновых, ц/га	Снижение объемной массы, г/см ³		Коэффициент структурности		Степень агрегатности	
				%			
		1	2	1	2	1	2
Продуктивность сидератов, г сухого вещества/м ²	0.71*	0.76*	0.85*	0.87*	0.87*	0.78*	0.53
Урожайность зерновых, ц/га	—	0.69*	0.71*	0.44	0.49	0.43	0.18

* $> R_{\text{крит}}$

Продуктивность сидератов в опыте была достоверно связана с изменением всех исследованных свойств в обоих горизонтах за исключением степени агрегатности подпахотного горизонта, зависимость которой от продуктивности не была значимой. Урожайность зерновых культур значимо зависела от изменения объемной массы почвы в пахотном и подпахотном горизонтах, тогда как зависимость урожайности зерновых культур от коэффициентов структурности и степени агрегатности в обоих горизонтах была недостоверной.

Связь между продуктивностью сидератов и агрофизическими свойствами почвы была более выраженной по сравнению с зависимостью от последних урожайности зерновых культур, что, на наш взгляд, вполне объяснимо. Тесная зависимость изменений агрофизических свойств от продуктивности сидератов обоснована непосредственным влиянием последних на первые, тогда как требования зерновых культур к показателям агрофизических свойств почвы могут не совсем совпадать с произошедшими изменениями этих свойств, что и может приводить к прямым, но не достоверным корреляционным зависимостям между рассмотренными показателями.

Достоверная зависимость урожайности зерновых культур от снижения объемной массы почвы пахотного горизонта могла быть обусловлена как прямым влиянием этого фактора на урожайность, так и косвенным. Прямое влияние заключалось в непосредственном лимитировании урожайности высокими показателями объемной массы почвы, приводящими к нарушению ее водно-воздушного режима. Косвенное влияние было связано с обратной зависимостью уменьшения объемного веса почвы при увеличении поступления количества сидеральной массы, ее минерализацией и улучшением снабжения растений элементами минерального питания, в первую очередь — азотом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что снижение объемной массы, увеличение коэффициента структурности и степени агрегатности чернозема происходили в слоях 0–25 и 25–40 см под чистыми и смешанными посевами сидератов. Однако использование для сидерации смешанных агросообществ по сравнению с чистыми посевами их компонентов было более эффективным средством улучшения агрофизических свойств чернозема в ЦЧЗ.

Снижение объемной массы почвы как в пахотном, так и в подпахотном горизонте под всеми смешанными агросообществами превосходило уменьшение плотности этих горизонтов в вариантах с чистыми посевами. Наиболее значительным

было снижение объемной массы в почве под агросообществами соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник, составившая в слое 0–25 см 0.09–0.13, в слое 25–40 см — 0.07–0.09%.

Способность смешанных сидеральных агросообществ эффективно снижать объемную массу почвы позволяет уменьшить ее на переуплотненных почвах, тем самым повышая качество этих почв.

Величины коэффициентов структурности и степени агрегатности почвы были наиболее высокими в почвах под смешанными посевами сидеральных культур, достигая максимума под агросообществами соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах.

Под воздействием фактора смешивания произошло снижение объемной массы, увеличение коэффициента структурности и степени агрегатности почвы под всеми агросообществами как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах. Наиболее значительное улучшение агрофизических свойств происходило в почвах обоих горизонтов под агросообществами соя + подсолнечник и пайза + подсолнечник.

Связь между продуктивностью сидератов и агрофизическими свойствами была более выраженной по сравнению с зависимостью от последних урожайности зерновых культур, что, на наш взгляд, вполне объяснимо. По-видимому, тесная зависимость изменений агрофизических свойств от продуктивности сидератов обоснована непосредственным влиянием последних на первые, тогда как требования зерновых культур к агрофизическим свойствам почвы могут не совсем совпадать с произошедшими изменениями этих свойств.

Показано, что достоверная зависимость увеличения урожайности зерновых культур от снижения объемной массы почвы могла отражать как лимитирование урожайности показателями объемной массы, приводящими к нарушению водно-воздушного режима почвы, так и улучшением режима питания растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенников А.М. Методические положения по выбору наиболее эффективных сидеральных агроценозов для воспроизводства плодородия типичных черноземов Центрально-черноземной зоны: Метод. рекоменд. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2011. 53 с.
2. Гребенников А.М. Фитосанитарный аспект повышения плодородия черноземов сидеральными смесями. // Земледелие. 2011. № 3. С. 24–26.

3. Гребенников А.М. Использование сидерации смешанными агросообществами для повышения плодородия типичных черноземов // Плодородие. 2011. № 2. С. 30–32.
4. Довбан К.И. Зеленое удобрение – важный резерв плодородия и улучшения экологической обстановки // Бюл. ВИАУ. 1991. № 107. С. 56–59.
5. Гавар С.П., Макаров А.Р., Кошелев Б.С. Влияние сидерального удобрения на урожай зерновых культур в лесостепной зоне Омской области // Агрохимия. 1997. № 12. С. 41–46.
6. Шлапунов В.Н., Крышинева Н.Е. Технология и эффективность возделывания смешанных посевов кормовых культур. Минск, 1981. 39 с.
7. Кузнецова О.Ю., Гребенников А.М. Рекультивация земель и улучшение качества ее проектирования // Землеустр-во, кадастр и мониторинг земель. 2009. № 1. С. 42–45.
8. Гребенников А.М. Обеспеченность культур элементами минерального питания в смешанных посевах // Агрохимия. 2004. № 5. С. 26–35.
9. Гребенников А.М. Влияние смешивания посевов на вынос элементов минерального питания надземной массой растений в сидеральных сообществах // Агрохимия. 2005. № 6. С. 26–35.
10. Гребенников А.М. Влияние смешивания посевов на микробиологическую активность почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 2008. Вып. 61. С. 75–82.
11. Гаврилов Г.Н. Плодородие слабосмытой почвы в зависимости от способов возделывания кукурузы // Регулирование плодородия черноземов при интенсивном земледелии. Каменная Степь, 1986. С. 94–101.
12. Шишкин А.И., Шубин Ю.И. Полноценные кормовые смеси. Кемерово: Кемер. кн. изд-е, 1980. 134 с.
13. Лебедева И.И., Королева И.Е., Гребенников А.М. Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 2013. Вып. 71. С. 16–26.
14. Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А. Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агро-черноземов Каменной степи // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 2016. Вып. 83. С. 77–102.
15. Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Верс. 1.0. Коллект. моногр. Иваново: ПресСто, 2021. 260 с.
DOI: 0.51961/9785604637401. ISBN 978-5-6046374-0-1
16. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. Изд. 2-е. М.: Высш. шк., 1973. 399 с.
17. Гребенников А.М. Оценка взаимовлияния культур в смешанных посевах // Агрохимия. 2003. № 1. С. 68–73.
18. Столбовой В.С., Гребенников А.М. Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 31–67.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67>

Influence of Sunflower Seed Agricultural Communities on the Agrophysical Properties of Chernozems

A. M. Grebennikov[#]

*Federal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Institute”,
Pyzhevsky per. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia*

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

In the field experiment, the effect of binary sideral sunflower mixtures on the bulk mass, structural coefficient and degree of aggregation of arable and sub-arable horizons of typical heavy loamy chernozem was studied. It is shown that the mixing of crops in sideral agricultural communities in most cases led to an increase in the yield of subsequent grain crops and an improvement in the considered agrophysical properties of chernozem. A decrease in bulk weight, an increase in the coefficient of structurality and the degree of aggregation in both the arable and sub-arable horizons under all mixed agricultural communities were more effective compared to the same horizons under the variants with clean crops. The most significant was the improvement of agrophysical properties in soils under the agricultural communities of soy + sunflower and payza + sunflower. The ability of mixed sideral agricultural communities to effectively reduce the bulk mass makes it possible to reduce it on over-compacted soils, thereby improving the quality of these soils.

Keywords: binary sideral mixtures, sunflower, siderate productivity, grain yield, agrocenotic effect, agrophysical properties of soil, chernozem.

УДК 631.417.2:631.437

ВЛИЯНИЕ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ НА ГЕНЕРАЦИЮ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ[§]

© 2024 г. З. А. Гасиева^{1,*}, А. С. Галушко¹, Ю. В. Хомяков¹, Г. Г. Панова¹, Т. Э. Кулешова¹¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: melkii844@gmail.com

Изучили возможность повышения электрогенных свойств корнеобитаемой среды за счет использования потенциальных переносчиков электронов — гуминовых кислот. Для этого создана биоэлектрохимическая ячейка, включающая электродные системы, внедряемые в растительные для снятия разности потенциалов, формируемой в процессе развития растений. На примере салата сорта Тайфун определено, что увеличение концентрации ГК в корнеобитаемой среде в 2 раза позволило повысить напряжение на 7–16% от контрольного варианта в зависимости от места их введения. Наилучший результат — более стабильная генерация высокой разности потенциалов уже с ранних периодов вегетации был характерен для варианта с дополнительным внесением ГК в область верхнего электрода — среднее значение напряжения для него составило 418 ± 29 мВ и удельная мощность 0.2 мВт/м². Исследован ряд физико-химических показателей приэлектродных областей в растительных биоэлектрохимических системах: электропроводность, pH, концентрация гуминовых кислот по окончании вегетационного периода. Выявлена потенциальная электроактивность микроорганизмов в корнеобитаемой среде салата. Показано, что способность гуминовых кислот играть роль редокс-медиатора в биоэлектрохимической системе в значительной степени зависит от места их концентрирования.

Ключевые слова: растительно-микробный топливный элемент, редокс-медиатор, корнеобитаемая среда, приэлектродная область.

DOI: 10.31857/S0002188124060037, **EDN:** CXZHNXY

ВВЕДЕНИЕ

Альтернативные возобновляемые природные ресурсы, такие как солнце, ветер, вода, биологические объекты, рассматриваются как перспективные энергетические источники, способствующие устойчивому развитию и позволяющие получать экологически чистое электричество, снизить уровень выбросов парниковых газов в атмосферу и уменьшить последствия изменения климата. К таким энергоресурсам относятся активно развивающиеся в настоящее время биоэлектрохимические системы (БЭС) — устройства для получения электрической энергии за счет химических реакций, сопутствующих жизнедеятельности живых организмов. БЭС включают микробные топливные элементы (МТЭ) [1], биофотоэлектрические системы или фотоМТЭ [2] и растительно-микробные топливные элементы (РМТЭ) [3].

Принцип работы растительных БЭС основан на электрогенных процессах, проходящих в корнеобитаемой среде — окислительно-восстановительных реакциях и диффузии ионов, сопутствующих развитию корневой системы, и окислению ризодепозитов микроорганизмами с образованием углекислого газа, протонов и электронов [4]. Эффективность БЭС зависит от совокупности ряда факторов, включающих как электроактивность растений и микроорганизмов, так и влияние внешних факторов — температуры, влажности, состава и структуры корнеобитаемой среды, характеристик световой среды, связанной с интенсивностью фотосинтеза [5].

Одной из наиболее значимых причин низкой производительности БЭС является высокое сопротивление корнеобитаемой среды, выступающей аналогом электролита в электрохимических устройствах. К возможным путям решения данной проблемы относят подбор электродных систем с высокой удельной поверхностью (в качестве таких применяют углеродные материалы — графитовые войлок, ткань, гранулы, стержень, бумагу [6]), изменение расстояния между

[§] Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-4397.2022.5).

электродами [7], внесение химического посредника — редокс-медиатора, повышающего эффективность транспорта электронов [8].

Редокс-медиаторы уже показали свою эффективность в усилении переноса электронов от микроорганизмов к аноду. Их применение, согласно разным исследованиям, позволило увеличить напряжение в 1.2–10 раз и удельную мощность в 1.2–38 раз по сравнению с вариантами БЭС без медиаторов [9]. В качестве посредников при транспорте электронов описаны нейтральный красный, антрахинон-2,6-дисульфат, тионин, *n*-бензохинон, 2-гидрокси-1,4-нафтохинон, 2,6-дихлорфенол индофенол ферроцин, феррицианид калия и виологеновый краситель [10]. Однако внесение внешних медиаторов, некоторые из которых являются токсичными соединениями, может сказываться на качестве растений и повышает стоимость БЭС [11].

Органические вещества почв и почвенных субстратов, используемых для культивирования растений, имеют способность как принимать, так и отдавать электроны [12–16]. Поэтому они также могут служить медиаторами в переносе электронов на электроды в РМТЭ. Такими свойствами обладают гуминовые кислоты (ГК) вследствие присутствия в них групп, проявляющих донорно-акцепторные электронные свойства хинонного типа [17, 18]. Хиноидные соединения способны принимать электроны, отвечают за образование активных форм кислорода и могут восстанавливаться до полухинонов, которые стабилизируются ароматическими кольцами и далее восстанавливаются в более устойчивые гидрохиноны [19]. Показано, что ГК служат нетоксичным переносчиком электронов между анаэробными бактериями и Fe(III) или электродом [20]. Было показано, что наличие ГК может приводить к увеличению в МТЭ удельной мощности на 67.4% и кулоновского КПД на 92.6% [21]. При добавлении в МТЭ с аэрируемым катодом ГК концентрацией 5 г/л плотность мощности составила 77 мВт/м², а внесение 2 г/л в двухкамерный МТЭ привело к генерации 52 мВт/м².

Однако на данный момент возможность использования ГК в качестве медиаторов электронов в почвенных БЭС при выращивании растений остается до конца не изученной, что подчеркивает необходимость всесторонней оценки эффективности ГК в роли посредников при переносе электронов и изучения их применимости для производства энергии с помощью РМТЭ.

Цель работы — выявление влияния ГК на формирование разности потенциалов в БЭС на основе электрогенных свойств корнеобитаемой среды при выращивании значимой сельскохозяйственной растительной продукции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная БЭС и объект исследования. Разработанная БЭС представляла собой емкость для выращивания растений объемом 90 × 70 × 70 мм³. В ячейке размещали электроды таким образом, чтобы верхний электрод соприкасался с корневой шейкой, а нижний электрод располагался на расстоянии, измеряемом от корневой шейки растений и соответствующим экспериментально определяемой максимальной разности потенциалов. Электроды изготавливали из пористого биосовместимого коррозионностойкого материала для обеспечения возможности прорастания корневой системы сквозь них и обеспечения тем самым поверхностного электрического контакта. Верхний электрод был выполнен из нержавеющей стали, нижний — из графитового войлока.

В качестве фитотест-объекта был выбран салат сорта Тайфун, имеющий развитую стержневую корневую систему с множеством боковых корней. Растения выращивали в регулируемых условиях интенсивной светокультуры в вегетационно-облучательной установке с лампами ДНаТ-400 в качестве источников света. Облученность составляла 70–75 Вт/м² в области фотосинтетически активной радиации, световой период — 14 ч/сут, температура воздуха — 20–22°C днем и 18–20°C ночью, относительная влажность воздуха 65–70%.

В качестве корнеобитаемой среды использовали торфяной грунт (Агробалт С, ООО “Пинд-струп”, Московская обл., Россия) на основе верхового торфа низкой степени разложения, содержащий не менее: N — 150, P₂O₅ — 150, K₂O — 250, Mg — 30, Ca — 120 мг/л. Влажность субстрата на уровне 60–70% от общей влагоемкости и количество микро- и макроэлементов, необходимых для получения качественной растительной продукции, поддерживали внесением раствора Кнопа [22].

Расположение электродных систем и электрические измерения. Измерение электрических характеристик осуществляли путем размещения в биоэлектрохимических ячейках объемом 440 см³ биосовместимых коррозионностойких электродов размером 60 × 60 мм в корнеобитаемой среде, что обеспечивало поверхностный электрический контакт с корневой системой и прикорневой зоной. Нижний электрод располагался на расстоянии 30 мм от дна емкости и был выполнен из графитового войлока толщиной 5 мм, верхний электрод — из сетки из нержавеющей стали с размером ячейки 8 × 8 мм размещался на расстоянии 30 мм от нижнего электрода и был электроотрицателен по отношению к нему.

Мониторинг изменения разности потенциалов в БЭС проводили с помощью аппаратной платформы Arduino, регистрацию показателей производили каждые 15 мин в течение вегетационного периода.

Измерение pH и электропроводности в приэлектродных областях проводили с помощью pH-метра ST20 (ОНАУС, Китай) и кондуктометра COM80 (НМ Digital, Россия) в водных вытяжках путем разведения 5 г корнеобитаемой среды, отобранной с электродов, в 100 мл дистиллированной воды.

Определение содержания ГК в корнеобитаемой среде. Для определения содержания ГК в использованном для культивирования растений торфяном субстрате использовали стандартную методику выделения гуминовых кислот (ГОСТ 9517-94 (ИСО 5073-85)). Содержание гидроксильных и карбоксильных групп в выделенных ГК определяли общепринятыми методами [23].

Оценку содержания ГК в использованном субстрате после проведения эксперимента производили по методу экспресс-определения с помощью спектрофотометрического анализа [24]. Калибровочную кривую строили в программе Excel 2010 на основе оптической плотности серии растворов гуминовых кислот с известной концентрацией (0–0.5 г/л) (рис. 1).

На основании данных калибровочной кривой определяли содержание ГК в образцах и полученные данные пересчитывали на 1 г сухой почвы.

Исследованные варианты БЭС с дополнительным внесением ГК. Для выявления роли ГК в формировании разности потенциалов в корнеобитаемой среде исследовали следующие варианты: 1 – БЭС-К – контроль, содержащий только исходный субстрат в виде торфа без растений, 2 – БЭС-Р – на основе растений салата, 3 – БЭС-ГК – с увеличенным содержанием ГК в объеме корнеобитаемой среды в 2 раза, общее количество внесенных ГК составляло 3 г, 4 – БЭС-ГКв – с 2-кратным увеличением содержания

ГК в 0.5 объемной области верхнего электрода, 5 – БЭС-ГКн – с 2-кратным увеличением содержания ГК в 0.5 объемной области нижнего электрода. В соответствующие варианты субстрата вносили ГК фирмы Roth (Германия). Vegetационные опыты длились 30 сут, и их проводили в 2-кратной повторности.

Статистическую обработку данных проводили с применением программы Excel 2010. Определяли средние величины изученных показателей, доверительные интервалы. Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (*t*-критерий Стьюдента) статистики. Различия между вариантами считали достоверными при $p \leq 0.05$.

Выделение микроорганизмов из корнеобитаемой среды. Для выявления поверхностной микрофлоры, вовлеченной в электрогенные процессы корнеобитаемой среды, в конце вегетационного опыта небольшую часть корня с субстратом вокруг него помещали на специально подготовленную жидкую и агаризованную среду Ворошиловой–Диановой, в качестве источника углерода использовали яблочную кислоту (10 мМ), pH среды приводили к 7.1 ед. В качестве индикатора восстановительных процессов использовали антрахинон-2,4-дисульфат (1 мМ) и водный раствор резазурина (1 мг/л). В реакционной среде создавали анаэробные условия. Культивировали микроорганизмы при температуре $27 \pm 1^\circ\text{C}$. На 7-е сут культивации проводили пересев на такую же среду.

Изучение потенциальной способности микроорганизмов отдавать электроны во внешнюю среду проводили засевом полученной микробальной массы на среду с фумаровой и уксусной кислотой в качестве источника электронов, углерода

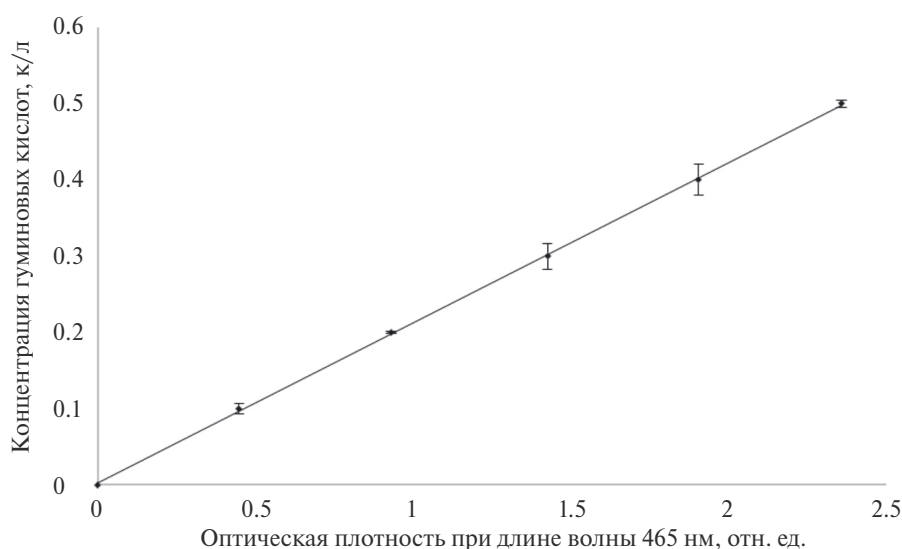


Рис. 1. Калибровочная кривая для определения содержания гуминовых кислот в субстрате (оптическая плотность при длине волны 465 нм – среднее 2-х точек).

и энергии для роста микроорганизмов. В качестве индикатора окислительно-восстановительных процессов использовали водный раствор резазурина (1 мг/л). Для изучения разнообразия микроорганизмов проводили световую микроскопию с помощью устройства фазового контраста, установленного на микроскопе AxioStar Plus.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние ГК на генерацию разности потенциалов в БЭС. В ходе исследования влияния ГК на формирование разности потенциалов в корнеобитаемой среде получены следующие результаты: средняя величина напряжения составила 360 ± 19 мВ в контрольном варианте без растения (БЭС-К), 405 ± 2 мВ — в варианте БЭС-Р при выращивании растений салата, 395 ± 14 мВ — в варианте БЭС-ГК с дополнительно внесенными ГК, 418 ± 29 мВ — в варианте БЭС-ГКв с добавленными ГК в область верхнего электрода, 387 ± 4 мВ — в варианте БЭС-ГКн с добавленными ГК в область нижнего электрода (рис. 2).

Динамика формирования разности потенциалов в исследованных вариантах в течение эксперимента также была схожей: стационарная генерация в первые 3-е сут, плавный рост на 4–5-е сут и стабилизация на 10–15 сут. Для контрольной БЭС-К без растений наблюдали плавный рост напряжения в течении первых 5-ти сут с 300 до 385 мВ, затем небольшое уменьшение до 320 мВ к 13-м сут и стабилизация при ~ 380 мВ. Наличие разности потенциалов в БЭС, не содержащей растительного организма, по-видимому, было связано со множеством других окислительно-восстановительных реакций в субстрате — от диффузии ионов при поливе до электроактивности микрофлоры. Для варианта БЭС-Р было характерно увеличение напряжения в ячейке на протяжении всего вегетационного периода с 300 до 530 мВ, вероятно, являющееся следствием повышения интенсивности процессов в корнеобитаемой среде, сопутствующих развитию растений. При удвоении концентрации ГК в корнеобитаемой среде так же, как и в варианте БЭС-Р, наблюдали плавный рост с 230 до 510 мВ, в варианте БЭС-ГКв — с 330 до 450 мВ, в варианте БЭС-ГКн — с 200 до 510 мВ.

Максимальная разность потенциалов (530 мВ на 28-е сут эксперимента) была отмечена в варианте БЭС-Р, не содержавшего дополнительно добавленного ГК. В то же время в этом варианте отмечен достаточно большой разброс величин ~ 60 мВ в течение вегетационного периода. Тогда как в варианте БЭС-ГКв с добавлением ГК в область верхнего электрода разброс БЭП не превышал 30 мВ, что было связано с более стабильной генерацией

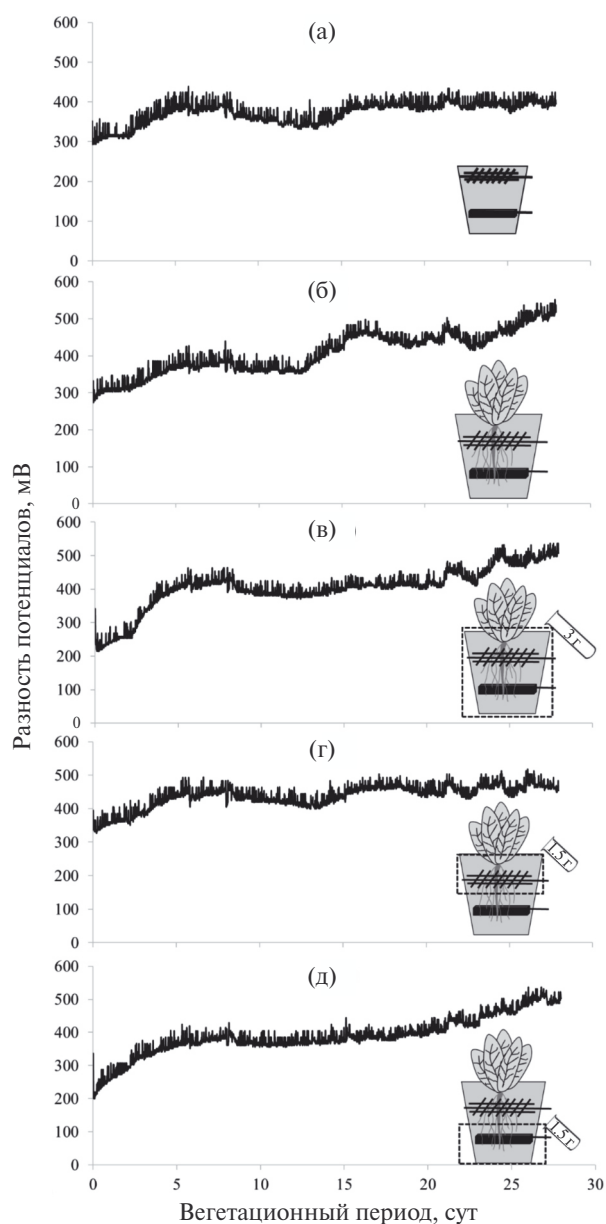


Рис. 2. Динамика разности потенциалов в корнеобитаемой среде в БЭС различного состава, варианты: (а) — БЭС-К (контроль без растений), (б) — БЭС-Р (с салатом сорта Тайфун), (в) — БЭС-ГК (с внесенными в субстрат ГК), (г) — БЭС-ГКв (с добавленными ГК в верхнюю приэлектродную область), (д) — БЭС-ГКн (с внесенными ГК в область нижнего электрода). То же на рис. 3.

на протяжении всего эксперимента и, вероятно, с более равномерной диффузией ионов.

Наилучший результат — более стабильная генерация высокого напряжения уже с ранних периодов вегетации была характерна для варианта БЭС-ГКв с дополнительным внесением ГК в область верхнего электрода. Можно предположить,

что транспорт ГК сверху вниз в емкости для выращивания играл положительную роль в повышении электрических характеристик БЭС за счет создания условий для более интенсивного распределения ионов.

Экспериментально было определено, что в 1 г высушенного исходного использованного торфяного субстрата содержалось 67 мг ГК. Выделенные ГК содержали 8.2 ммоль фенольных гидроксильных и 2.7 ммоль карбоксильных групп в 1 г сухих ГК.

Для определения особенностей процессов, происходящих в области верхнего и нижнего электродов в БЭС, в конце эксперимента были измерены показатели pH, электропроводности и содержания ГК в приэлектродных зонах (табл. 1).

В результате оценки содержания ГК в верхних и нижних слоях субстрата в экспериментальных БЭС по окончании эксперимента показано, что верхний слой контрольного варианта БЭС-К содержал примерно такое же количество ГК, как и исходный торф. В то же время в нижнем слое

концентрация ГК снизилась до 12 мг/г субстрата. Схожую ситуацию отметили во всех вариантах растительных БЭС с дополнительно внесенными ГК: содержание ГК в области верхнего электрода было больше, чем в области нижнего. Особенно интересно отметить эту тенденцию и в варианте БЭС-ГКн, где ГК были добавлены только в зону нижнего электрода. Вероятно, это было связано со способом полива путем внесения воды снизу, т.к. ранее было определено, что это способствует стационарной генерации разности потенциалов за счет равномерной диффузии жидкости вследствие капиллярных эффектов [26]. Видимо, наряду с повышением концентрации в связи с отмиранием клеток растений, ГК диффундировали по профилю почвы вверх вместе с водой.

Для расчета электрических мощностей и нагрузочных способностей исследованных БЭС было проведено измерение напряжения при параллельном подключении сопротивлений различного номинала – от 10 МОм до 1.1 кОм (рис. 3).

Таблица 1. Показатель pH, электропроводность и содержание ГК в конце вегетационного периода в областях верхнего и нижнего электродов в вариантах опыта

Вариант БЭС	pH		Электропроводность		Содержание ГК	
	ед. pH		мкСм/см		мг/г сухого субстрата	
	1	2	1	2	1	2
БЭС-К	6.35 ± 0.11	6.54 ± 0.21	228 ± 14	142 ± 11	53 ± 11	12 ± 4
БЭС-Р	6.30 ± 0.11	6.61 ± 0.11	202 ± 14	109 ± 6	81 ± 9	61 ± 13
БЭС-ГК	7.31 ± 0.10	6.87 ± 0.17	265 ± 10	126 ± 8	138 ± 21	86 ± 19
БЭС-ГКв	6.93 ± 0.08	7.31 ± 0.10	185 ± 11	103 ± 14	195 ± 17	152 ± 18
БЭС-ГКн	6.95 ± 0.10	7.01 ± 0.10	257 ± 21	130 ± 13	216 ± 14	148 ± 23

Примечание. В графе 1 – верхняя приэлектродная область, 2 – нижняя приэлектродная область.

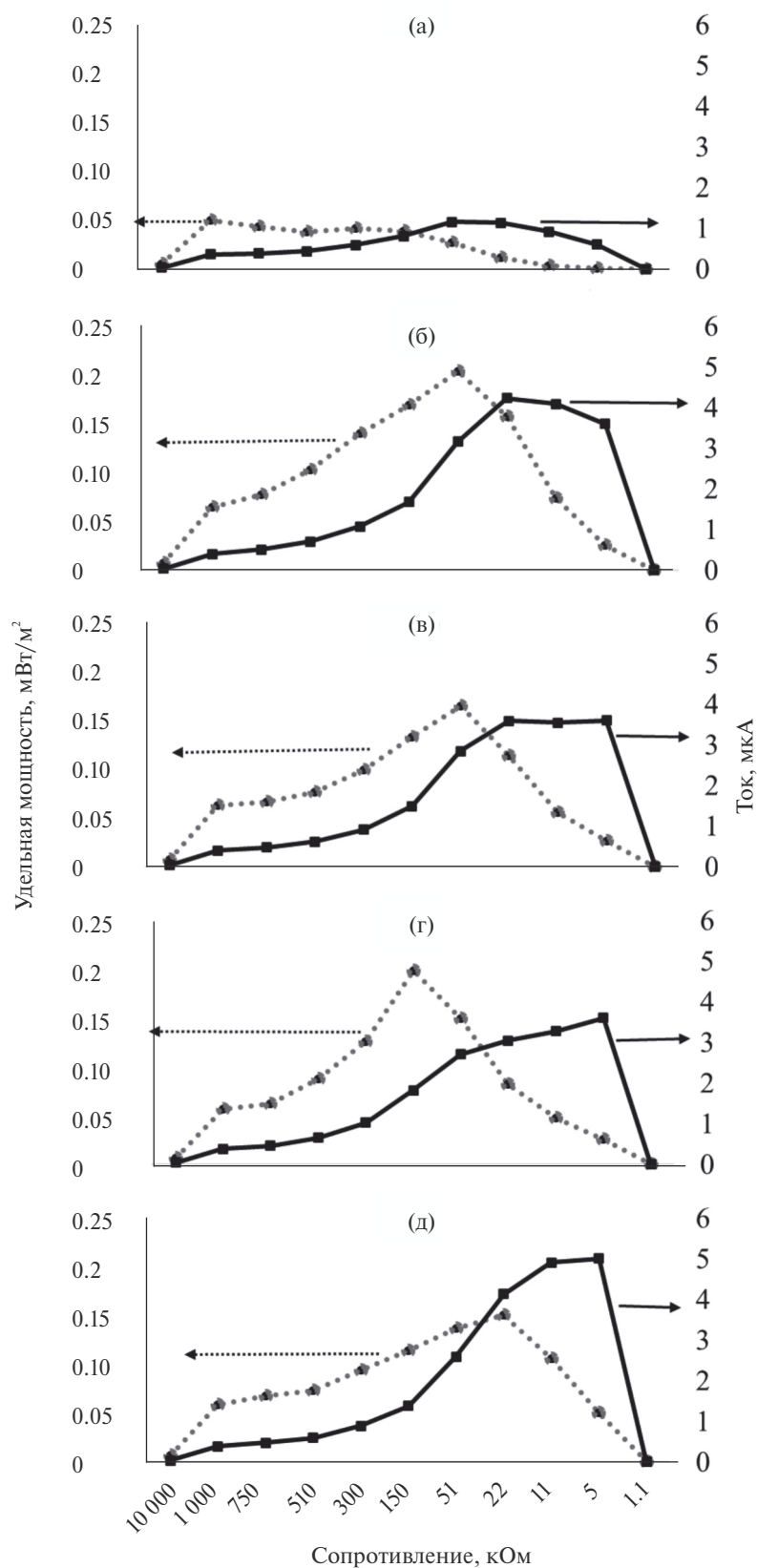


Рис. 3. Зависимость мощности БЭС от подключаемой нагрузки.

Наибольшая полученная удельная мощность 0.2 мВт/м^2 была характерна для вариантов БЭС-Р и БЭС-ГКв, а наибольшая сила тока 5 мкА была получена в варианте БЭС-ГКн.

Средняя масса надземной части салата (по 2 растения в ячейке) в БЭС составила $71 \pm 9 \text{ г}$ в варианте БЭС-Р, $53 \pm 7 \text{ г}$ в варианте БЭС-ГК, $77 \pm 13 \text{ г}$ в варианте БЭС-ГКв, $82 \pm 12 \text{ г}$ в варианте БЭС-ГКн. Показано, что удвоение количества ГК во всей области корнеобитаемой среды привело к некоторому угнетению растений, что могло свидетельствовать об их переизбытке в торфяном субстрате и, как следствие, стрессовом влиянии на растения.

Показатели рН коррелировали с содержанием ГК: коэффициент корреляции составил 0.7 для верхнего электрода и 0.9 — для нижнего. Большая концентрация ГК приводила к повышению рН вследствие подщелачивания субстрата.

Также наблюдали связь с электропроводностью в приэлектродных областях: чем больше была разница в содержании ГК между слоями, тем большие различия были в электропроводности, коэффициент корреляции между этими величинами составил 0.7. При этом концентрация заряженных частиц, т.е. интенсивность метаболических процессов, была больше в области верхнего электрода. Максимальные различия в концентрациях ГК между верхней и нижней приэлектродной областями были характерны для вариантов БЭС-ГК и БЭС-ГКн — 52 и 68 мг/г торфа соответственно. Для этих же ячеек отмечена большая разница в электропроводности — 127 мкСм/см в варианте БЭС-ГКн и 139 мкСм/см в варианте БЭС-ГК. Важно отметить, что разность потенциалов в этих вариантах также имела максимальный прирост, с начала эксперимента показатели выросли на 166 мВ в обоих вариантах. Тогда как в варианте БЭС-ГКв изменение составило всего 57 мВ. Вероятно, величина напряжения в БЭС была связана с перемещением ГК в субстрате и различием их концентраций на электродах.

Электроактивные микроорганизмы в корнеобитаемой среде салата. Микроскопирование проб инокулированной среды показало наличие богатой, разнообразной микрофлоры, включавшей спорообразующие палочки, одиночные кокки, подвижные палочки и некоторые извитые формы.

Посевы микроорганизмов из ризосферы салата сорта Тайфун, выращенного в субстрате с дополнительно внесенными ГК, на среду с индикаторами окислительно-восстановительных процессов показали последовательное восстановление и обесцвечивание резазурина

и восстановления антрахинона. Последовательно проведенный пересев микроорганизмов на среду с фумаратом и ацетатом в качестве источника углерода и водным раствором резазурина в качестве индикатора показал обесцвечивание резазурина за короткое время, менее 1 сут, что подтверждало потенциальную электроактивность микроорганизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что гуминовые кислоты (ГК) способны участвовать как возможные окислительно-восстановительные медиаторы в процессах генерации электрического тока в растительно-микробных топливных элементах (РМТЭ), и увеличение в 2 раза концентрации ГК в корнеобитаемой среде позволило повысить генерацию напряжения на 7–16% от контроля в зависимости от места их введения.

Самый высокий начальный показатель разности потенциалов был характерен для варианта БЭС-ГКв, что естественным образом связано с тем, что на момент начала эксперимента в верхнем слое было сосредоточено наибольшее количество ГК, соответственно электропроводность была больше. Такая система позволила получить стабильную выработку электричества, однако имела слабый потенциал увеличения разности потенциалов в ходе своего развития в дальнейшем. В то же время при добавлении ГК в нижнюю часть системы начальная точка была минимальной по сравнению со всеми другими вариантами. С течением времени водорастворимые вещества, включая ГК, вместе с током воды при поливе снизу поднимались вверх, и при этом увеличивалась разность потенциалов в системе. К моменту окончания вегетации внесенные в нижний слой субстрата ГК обеспечили максимальную разность потенциалов среди всех исследованных вариантов.

Таким образом, ГК выступали и как потенциальные медиаторы переноса электрона от электроактивных микроорганизмов, и также вносили вклад в концентрационные эффекты и перемещение ионов в корнеобитаемой среде в РМТЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logan B. Microbial fuel cells. John Wiley & Sons, 2008. 216 p.
2. McCormick A.J., Bombelli P., Bradley R.W., Thorne R., Wenzel T., Howe C.J. Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemi-

- cal systems // *Energy Environ. Sci.* 2015. V. 8. № 4. P. 1092–1109.
3. *Strik D.P., Hamelers H.V.M., Snel J.F., Buisman C.J.* Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell // *Inter. J. Energy Res.* 2008. V. 32. № 9. P. 870–876.
 4. *Kabutey F.T., Zhao Q., Wei L., Ding J., Antwi P., Quashie F.K., Wang W.* An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019. V. 110. P. 402–414.
 5. *Кулешова Т.Э., Галушко А.С., Панова Г.Г., Волкова Е.Н., Apollon W., Shuang C., Sevda S.* Биоэлектрoхимические системы на основе электроактивности растений и микроорганизмов в корнеобитаемой среде (обзор) // *Сел.-хоз. биол.* 2022. Т. 57. № 3. С. 425–440.
 6. *Maddalwar S., Nayak K.K., Kumar M., Singh L.* Plant microbial fuel cell: opportunities, challenges, and prospects // *Bioresource Technol.* 2021. V. 341. P. 125772.
 7. *Ahn Y., Logan B.E.* Altering anode thickness to improve power production in microbial fuel cells with different electrode distances // *Energy and Fuels.* 2013. V. 27. № 1. P. 271–276.
 8. *Bond D.R., Lovley D.R.* Evidence for involvement of an electron shuttle in electricity generation by *Geothrixfermentans* // *Appl. Environ. Microbiol.* 2005. V. 71. № 4. P. 2186–2189.
 9. *Martinez C.M., Luis H.A.* Application of redox mediators in bioelectrochemical systems // *Biotechnol. Adv.* 2018. V. 36. № 5. P. 1412–1423.
 10. *Wilkinson S., Klar J., Applegarth S.* Optimizing biofuel cell performance using a targeted mixed mediator combination // *Electroanalysis: Inter. J. Devot. Fundament. Practic. Aspects Electroanal.* 2006. V. 18. № 19–20. P. 2001–2007.
 11. *Lovley D.R., Fraga J.L., Blunt-Harris E.L., Hayes L.A., Phillips E.J.P., Coates J.D.* Humic substances as a mediator for microbially catalyzed metal reduction // *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* 1998. V. 26. № 3. P. 152–157.
 12. *Lovley D., Coates J., Blunt-Harris E., Philips E., Woodward J.* Humic substances as electron acceptors for microbial respiration. // *Nature.* 1996. V. 382. № 6590. P. 445–448.
 13. *Zhang C., Katayama A.* Humin as an electron mediator for microbial reductive dehalogenation // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. № 12. P. 6575–6583.
 14. *Stern N., Mejia J., He S., Yang Y., Ginder-Vogel M., Roden E.E.* Dual role of humic substances as electron donor and shuttle for dissimilatory iron reduction // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. № 10. P. 5691–5699.
 15. *Pham D.M., Kasai T., Yamaura M., Katayama A.* Humin: No longer inactive natural organic matter // *Chemosphere.* 2021. V. 269. P. 128697.
 16. *Yang P., Jiang T., Cong Z., Liu G., Guo Y., Liu Y., Shi J., Hu L., Yin Y., Cai Y., Jiang G.* Loss and increase of the electron exchange capacity of natural organic matter during its reduction and reoxidation: The Role of quinone and nonquinone moieties // *Environ. Sci. Technol.* 2022. V. 56. № 10. P. 6744–6753.
 17. *Scott D.T., McKnight D.M., Blunt-Harris E.L., Kolesar S.E., Lovley D.R.* Quinone moieties act as electron acceptors in the reduction of humic substances by humics-reducing microorganisms // *Environ. Sci. Technol.* 1998. V. 32. № 19. P. 2984–2989.
 18. *Walpen N., Getzinger G.J., Schroth M.H., Sander M.* Electron-donating phenolic and electron-accepting quinone moieties in peat dissolved organic matter: quantities and redox transformations in the context of peat biogeochemistry // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. № 9. P. 5236–5245.
 19. *Stevenson F.J.* Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons, 1994.
 20. *Sun J., Li W., Li Y., Hu Y., Zhang Y.* Redox mediator enhanced simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation in air-cathode microbial fuel cell // *Bioresour. Technol.* 2013. V. 142. P. 407–414.
 21. *Thygesen A., Poulsen F.W., Min B., Angelidaki I., Thomsen A.B.* The effect of different substrates and humic acid on power generation in microbial fuel cell operation // *Bioresour. Technol.* 2009. V. 100. № 3. P. 1186–1191.
 22. *Чесноков В.А., Базырина Е.Н., Бушуева Т.М.* Выращивание растений без почвы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1960. 170 с.
 23. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса: Учеб. пособ. для студ.-почвовед. ун-тов и сел.-хоз. ин-тов. М.: Изд-во МГУ, 1981. 272 с.
 24. *Ширшова Л.Т., Гиличинский Д.А., Остроумова Н.В., Ермолаев А.М.* Применение спектрофотометрии для определения содержания гуминовых веществ в многолетнемерзлых отложениях // *Криосфера Земли.* 2015. Т. 19. № 4. С. 107–113.
 25. *Кулешова Т.Э., Панова Г.Г., Галль Н.Р., Галушко А.С.* Концентрационный элемент на основе электрогенных процессов в корнеобитаемой среде // *Письма в журн. техн. физики.* 2022. Т. 48. № 8. С. 29–32.
 26. *Кулешова Т.Э., Галль Н.Р.* Динамика биоэлектрического потенциала в прикорневой зоне растений при поливах // *Почвоведение.* 2021. № 3. С. 338–346.

Effect of Humic Acids on the Generation of Potential Differences in a Bioelectrochemical System

Z. A. Gasieva^{a, #}, A. S. Galushko^a, Yu. V. Khomyakov^a, G. G. Panova^a, T. E. Kuleshova^a

^a*Agrophysical Research Institute,
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia*

[#]*E-mail: melkii844@gmail.com*

The possibility of increasing the electrogenic properties of the root environment through the use of potential electron carriers, humic acids (HA), was studied. For this purpose, a bioelectrochemical cell has been created, including electrode systems introduced into the planters to remove the potential difference formed during the development of plants. Using the example of Typhoon lettuce, it was determined that an increase in the concentration of HA in the root environment by 2 times allowed to increase the voltage by 7–16% of the control variant, depending on the place of their introduction. The best result – a more stable generation of a high potential difference from the early periods of vegetation was typical for the variant with addition of HA to the upper electrode area – the average voltage value for it was 418 ± 29 mV and a specific power of 0.2 MW/m^2 . A number of physicochemical parameters of near-electrode regions in plant bioelectrochemical systems have been studied: electrical conductivity, pH, concentration of humic acids at the end of the growing season. The potential electroactivity of microorganisms in the root environment of lettuce has been revealed. It is shown that the ability of humic acids to play the role of a redox mediator in a bioelectrochemical system largely depends on the place of their concentration.

Keywords: plant-microbial fuel cell, redox mediator, root environment, near-electrode region.

УДК 631.85:631.631.811.6:631.559:631.82:631.445.24:633.11“324”

ВЛИЯНИЕ ФОСФОРНЫХ И МАГНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ НА МИНЕРАЛЬНОЕ ПИТАНИЕ И УРОЖАЙНОСТЬ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗВЕСТКОВАНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2024 г. Н. А. Кирпичников¹, С. П. Бижан^{1,*}, В. В. Трибельгорн¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д. Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

*E-mail: kziek@yandex.ru

В многолетнем полевом опыте на сильноокислой слабоокультуренной дерново-подзолистой почве выявлена высокая эффективность фосфорных удобрений в сочетании с магниевыми и известкованием при возделывании озимой пшеницы сорта Московская 56. При этих условиях повышалось содержание азота, фосфора и магния в растениях в фазе цветения. Улучшение минерального питания растений в данном случае обеспечило наибольшую урожайность (75.3 ц/га), превышающую уровень фона азотно-калийных удобрений в 2.7 раза, окупаемость минеральных удобрений (NPK) увеличивалась в 2.5 раза, достигая 16.7 кг/кг. Применение фосфорных удобрений на сильноокислой почве повышало урожайность на 65% при 27.5 ц/га на фоне азотно-калийных удобрений. На известкованной почве со слабоокислой реакцией среды урожайность от применения фосфорных удобрений увеличивалась на 19% по сравнению с фоном 58.1 кг/га. Прибавки урожайности при применении магниевых удобрений на фоне полного удобрения (NPK) снижались по мере уменьшения кислотности почвы и были существенными: на среднекислой почве – 4.9 и слабокислой – 6.1 ц/га. При максимальной урожайности озимой пшеницы за счет применения фосфорных и магниевых удобрений и снижения кислотности дерново-подзолистой почвы вынос элементов питания урожаем озимой пшеницы увеличился: азота – в 3.5, фосфора – в 3.7, калия и магния – в 3 раза.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, агрохимические свойства, фосфорные и магниевые удобрения, озимая пшеница, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188124060046, **EDN:** CXZCMY

ВВЕДЕНИЕ

При известковании, оптимальном и сбалансированном применении минеральных удобрений и других средств химизации, как показали результаты многих исследований, существенно повышается урожайность озимой пшеницы [1–5]. В интенсивных технологиях возделывания озимой пшеницы наряду с другими элементами питания повышается потребность растений и в магнии [6]. Необходимость применения магниевых удобрений связана с большими потерями магния от инфильтрации при промывном режиме почв в зоне Нечерноземья, а также с увеличением площадей пашни со слабой его обеспеченностью [7, 8]. Эффективность магниевых удобрений зависит от гранулометрического состава почвы, агрохимических свойств, содержания подвижного магния в почве [9]. Цель работы – изучение в длительном полевом опыте влияния фосфорных и магниевых удобрений на содержание элементов питания в фазе цветения растений и их выноса урожаем озимой пшеницы сорта Московская 56 в зависимости от известкования дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном полевом опыте СШ-27, заложенном в 1966 г. на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Центральной опытной станции ВНИИА (Московская обл.).

Исходная почва была слабоокультуренной: pH_{KCl} 3.9–4.2, 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), степень насыщенности основаниями – 57–63%, содержание гумуса – 1.50%, подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) – 30–70 и 112–115 мг/кг соответственно, подвижного алюминия (по Соколову) – 45–60 мг/кг.

Севооборот в настоящее время (13-я ротация) – горох на сидерат, озимая пшеница, яровой ячмень.

При периодическом известковании дозами 11.5 и 23 т $CaCO_3$ /га (за весь период) почва в 12-й ротации стала среднекислой (pH_{KCl} 4.7) и слабокислой (pH_{KCl} 5.4). Систематическое применение фосфорных и калийных удобрений повысило к этому времени

содержание подвижных форм фосфора и калия в почве до 140–157 и 152–170 мг/кг соответственно.

Анализы биомассы растений проводили согласно ГОСТам: содержание общего азота определяли по Кьельдалю (ГОСТ 13996.4-93), фосфора – ГОСТ 26657-97, калия – ГОСТ 30504097, магния – атомно-эмиссионным методом (ПНДФ 16.2:2.371.2011).

Агротехника – принятая в Московской обл. В качестве общего фона вносили гербициды, фунгициды, ретарданты. Подробная методика изложена в [10].

Статистические данные обрабатывали дисперсионным методом по программе Stat VIVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метеорологические условия и изменения агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы оказали влияние на накопление сухой фитомассы озимой пшеницы в фазе цветения растений (табл. 1).

Минимальная величина фитомассы сформировалась в контрольном варианте и внесении азотно-калийных удобрений особенно в 2021 г., когда сложились менее благоприятные метеорологические условия. Применение фосфорных удобрений повышало сухую биомассу при сильнокислой почве (рН_{KCl} 4.0) в среднем за 3 года на 62%, в большей степени (на 70%) в благоприятные 2022 и 2023 гг. На известкованной почве, особенно при высокой дозе (23 т/га), когда почва стала слабокислой, эффективность фосфорных удобрений снижалась в связи с улучшением обеспеченности растений фосфором за счет извести, которая увеличивала сухую массу в 2 раза по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений. При внесении магниевых удобрений отмечено дальнейшее увеличение сухой биомассы озимой пшеницы. Их

эффективность была относительно высокой на известкованной почве при применении 23 т/га и слабокислой реакции среды – прибавка составляла 80 г/м². Применение фосфорных удобрений с магниевыми при известковании высокой дозой вызвало увеличение содержания азота и фосфора, в большей мере – магния в сухой биомассе озимой пшеницы (табл. 2).

Уменьшение доступности магния в сильнокислой почве в варианте НК очевидно было связано с присутствием больших количеств ионов-антагонистов Н, Al, Mn, Fe и др. сопутствующих ионов сильнокислой почвы [7, 10, 11]. Условия минерального питания оказали существенное влияние на урожайность озимой пшеницы интенсивного сорта Московская 56 (табл. 3).

Внесение фосфорных удобрений в сильнокислую почву повысило урожайность в среднем на 65% при 27.5 ц/га на фоне азотно-калийных удобрений. На известкованной почве прибавки от фосфорных удобрений снижались, на фоне низкой дозы извести средняя прибавка урожайности составила 33, на фоне высокой – 19% при урожайности на фоне азотно-калийных удобрений 46.0 и 58.1 ц/га соответственно. Уменьшение прибавок от фосфорных удобрений на известкованной почве было обусловлено улучшением минерального питания, в том числе фосфорного, за счет самой извести, особенно большой дозы; средняя урожайность при этом удваивалась по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений. Наиболее эффективно влияло известкование в менее благоприятном 2021 г., когда урожайность зерна увеличивалась в 2.5 раза, что было отмечено также в работе [8].

Эффективность магниевых удобрений зависела от известкования. Наиболее высокий эффект от их применения получен на фоне высокой дозы извести 23.0 т/га, когда почва обладала слабокислой реакцией среды (рН_{KCl} 5.4) – дополнительная существенная

Таблица 1. Сухая фитомасса растений озимой пшеницы в зависимости от применения удобрений и известкования, г/м² (фаза цветения)

Вариант	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее за 3 года
Без известкования (рН _{KCl} 4.0)				
Без удобрений	510	650	690	617
N120K90	530	656	686	624
N120P90K90	820	1120	1190	1010
N120P90K90 + Mg	842	1140	1200	1060
Известкование 11.5 т СаСО ₃ /га (рН _{KCl} 4.7)				
N120K90	810	1100	1180	1030
N120P90K90	1100	1370	1430	1300
N120P90K90 + Mg	1180	1420	1480	1360
Известкование 23.0 т СаСО ₃ /га (рН _{KCl} 5.4)				
N120K90	1150	1290	1390	1280
N120P90K90	1420	1530	1640	1540
N120P90K90 + Mg	1470	1680	1700	1620

Таблица 2. Содержание элементов питания в сухой биомассе озимой пшеницы (фаза цветения)

Вариант	N, %		P ₂ O ₅ , %		K ₂ O, %		MgO, мг/кг	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Без известкования (pH _{KCl} 4.0)								
Без удобрений	2.51	2.63	0.82	0.59	0.54	0.85	907	516
N120K90	2.56	2.70	0.68	0.57	0.46	0.98	780	481
N120P90K90	2.37	2.60	0.71	0.67	0.50	0.80	816	576
N120P90K90 + Mg	2.40	2.68	0.70	0.69	0.48	0.80	820	589
Известкование 11.5 т CaCO ₃ /га (pH _{KCl} 4.6)								
N120K90	2.44	2.65	0.67	0.62	0.47	0.90	832	553
N120P90K90	2.43	2.60	0.72	0.76	0.51	1.02	833	591
N120P90K90 + Mg	2.48	2.70	0.72	0.70	0.50	1.00	839	620
Известкование 23.0 т CaCO ₃ /га (pH _{KCl} 5.4)								
N120K90	2.83	2.90	0.74	0.69	0.61	1.18	903	569
N120P90K90	2.72	2.87	0.76	0.80	0.52	1.05	933	648
N120P90K90 + Mg	2.79	2.98	0.76	0.79	0.50	1.00	941	679

Примечание. В графе 1 – 2022, 2 – 2023 г.

Таблица 3. Влияние фосфорных и магниевых удобрений на урожайность озимой пшеницы в зависимости от известкования, ц/га

Вариант	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее за 3 года	Окупаемость NPK зерном, кг/кг
Без известкования (pH _{KCl} 4.0)					
Без удобрений	18.3	25.5	31.8	25.2	—
N120K90	18.0	25.7	38.7	27.5	—
N120P90K90	34.7	44.9	56.4	45.3	6.7
N120P90K90 + Mg	37.0	47.4	61.4	48.6	7.8
Известкование 11.5 т CaCO ₃ /га (pH _{KCl} 4.6)					
N120K90	34.3	47.2	56.4	46.0	—
N120P90K90	46.9	63.5	73.0	61.1	12.0
N120P90K90 + Mg	51.9	67.0	79.2	66.0	13.6
Известкование 23.0 т CaCO ₃ /га (pH _{KCl} 5.4)					
N120K90	45.7	58.4	70.1	58.1	—
N120P90K90	56.0	71.6	79.9	69.2	14.7
N120P90K90 + Mg	61.8	76.8	87.4	75.3	16.7
HCP ₀₅	3.2	3.9	2.6	—	—

прибавка в данном случае составила в среднем 6.1 ц/га. Максимальная урожайность озимой пшеницы (75.3 ц/га в среднем) в наиболее благоприятном 2023 г. (87.4 ц/га) формировалась при применении полного минерального удобрения с использованием магниевых удобрений на известкованной почве со слабокислой реакцией почвенной среды. Окупаемость удобрений прибавкой зерна в данном случае повышалась в 2.5 раза и достигала 16.7 кг/кг. Урожайность озимой пшеницы определялась структурой ее урожая (табл. 4).

Число зерен в колосе изменялось в зависимости от варианта: с 19.4 до 31.7 шт. в среднем, в наиболее благоприятном 2023 г. — с 20.3 до 33.4 шт. Этот показатель структуры в среднем повышался на 60%

и достигал максимальной величины при совместном внесении фосфорных и магниевых удобрений на известкованной почве дозой 23 т CaCO₃/га. Масса 1000 зерен находилась также в прямой зависимости от урожайности озимой пшеницы. При максимальной урожайности в варианте с применением всех изученных удобрений этот показатель увеличивался в среднем на 15%. Такая же закономерность действия удобрений также отмечена в отношении хозяйственного коэффициента урожайности (**Кх₀₃**), что свидетельствовало о положительном их влиянии в большей степени на основную часть урожая (зерно), чем на побочную (солома). Вынос элементов питания урожаем озимой пшеницы значительно повышался при внесении фосфорных удобрений, особенно в сочетании

Таблица 4. Элементы структуры урожая озимой пшеницы сорта Московская 56

Вариант	Число зерен в колосе, шт.		Масса 1000 зерен, г		K _{хоз}
	2023 г.	среднее за 3 года	2023 г.	среднее за 3 года	
Без известкования (pH _{KCl} 4.0)					
Без удобрений	20.3	19.4	49.3	43.0	0.46
N120K90	22.1	20.3	50.1	43.3	0.46
N120P90K90	29.5	26.8	49.2	44.9	0.47
N120P90K90 + Mg	30.0	27.1	49.8	45.3	0.48
Известкование 11.5 т CaCO ₃ /га (pH _{KCl} 4.6)					
N120K90	29.2	25.6	49.6	45.3	0.46
N120P90K90	30.4	28.3	49.7	46.3	0.48
N120P90K90 + Mg	32.3	29.4	49.9	46.6	0.49
Известкование 23.0 т CaCO ₃ /га (pH _{KCl} 5.4)					
N120K90	30.1	28.1	49.8	47.2	0.48
N120P90K90	32.1	30.3	50.5	48.2	0.49
N120P90K90 + Mg	33.4	31.2	52.1	49.1	0.50
HCP ₀₅	1.2	—	3.9	—	—

Таблица 5. Вынос элементов питания озимой пшеницей (зерно + солома) (среднее за 2021–2023 гг.), кг/га

Вариант	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Без известкования (pH _{KCl} 4.0)				
Без удобрений	56.0	20.9	44.2	7.6
N120K90	56.7	21.0	43.1	7.5
N120P90K90	110	39.4	75.3	13.1
N120P90K90 + Mg	117	43.9	81.6	14.6
Известкование 11.5 т СаСО ₃ /га (pH _{KCl} 4.6)				
N120K90	111	41.5	77.3	13.9
N120P90K90	161	58.9	103	18.4
N120P90K90 + Mg	171	66.1	113	19.9
Известкование 23.0 т СаСО ₃ /га (pH _{KCl} 5.4)				
N120K90	145	56.5	97.3	15.7
N120P90K90	191	70.3	125	20.7
N120P90K90 + Mg	204	77.1	135	22.6

с магниевыми удобрениями и известковании почвы высокой дозой мелиоранта (табл. 5).

По сравнению с фоном N120K90 потребление возросло: азота — в 3.5, фосфора — в 3.7, калия и магния — в 3 раза. Столь высокая обеспеченность растений азотом была обусловлена не только внесением минерального азота, но и биологическим при наличии в севообороте бобовой культуры (гороха) на зеленое удобрение. Баланс фосфора и магния был положительным даже при максимальном потреблении этих элементов растениями и составил 117 и 130% соответственно. В расчете на 1 т урожая озимой пшеницы вынос азота и фосфора при внесении удобрений несколько повышался и составил в варианте с применением полного удобрения с магниевыми на известкованной в дозе 23 т СаСО₃/га почве 27.0 и 10.3 кг при выносе в контроле соответственно 22.4 и 8.5 кг.

Удельный вынос калия и магния при этом практически не изменялся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в многолетнем полевом опыте на слабоокультуренной дерново-подзолистой почве выявлено положительное влияние фосфорных удобрений в сочетании с магниевыми и известкованием на содержание в биомассе озимой пшеницы сорта Московская 56 азота, фосфора и магния в фазе цветения. Улучшение минерального питания растений на известкованной почве при слабокислой реакции среды (pH_{KCl} 5.4) обеспечило максимальную урожайность (75.3 ц/га) по сравнению с 27 ц/га на фоне применения N120K90 на неизвесткованной почве. Также увеличилась окупаемость минеральных удобрений (вариант N120P90K90) в 2.5 раза. При улучшении

минерального питания за счет известкования прибавки урожайности от применения фосфорных удобрений на известкованной почве снижались по сравнению с прибавкой, полученной на сильноокислой не известкованной почве с 65 до 19%. Эффективность магниевых удобрений по мере снижения кислотности почвы повышалась и достигала 10% на слабоокислой почве. При достижении максимальной урожайности озимой пшеницы вынос элементов питания увеличился: азота — в 3.5, фосфора — в 3.7, калия и магния — в 3 раза по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений и сильноокислой почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милащенко Н.З., Шкуркин С.И., Чернова Л.С., Трушкин С.В. Агрохимические и агротехнические требования к системам зональных технологий производства продовольственного зерна пшеницы // Плодородие. 2022. № 4. С. 3–5.
2. Сандухадзе Б.И., Мамедов Р.З., Афанасьев Р.А., Коваленко А.А. Факторы урожайности озимой пшеницы в условиях Нечерноземья // Плодородие. 2021. № 3. С. 66–70.
3. Вильдфлуш И.Р. Оптимизация системы удобрения сельскохозяйственных культур при комплексном применении макро- и микроудобрений, регуляторов роста и бактериальных препаратов: рекоменд. Горки: БГСХА, 2017. 34 с.
4. Алиев А.М., Самойлов Л.Н., Цимбалист Н.И. Эффективность комплексного применения средств химизации в Нечерноземной зоне (итоги 55 лет исследований в длительном полевом опыте) // Агрохимия. 2016. № 2. С. 20–30.
5. Ваулина Г.И., Алиев А.М. Разработка эффективных блоков химизации в полевом севообороте на дерново-подзолистой суглинистой почве Центрального района Нечерноземной зоны Российской Федерации. Вып. 2. М.: ВНИИА, 2012. С. 68–87.
6. Аристархов А.Н. Оптимизация полиэлементного состава в агроэкосистемах России. Эколого-агрохимическая оценка состояния дефицита, резервов, способов и средств его устранения / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2019. С. 201–245.
7. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Теоретические основы известкования почв. СПб.: ЛНИИСХ, 2009. С. 90–118.
8. 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.
9. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М., 1990. 218 с.
10. Бижан С.П. Влияние совместного применения фосфорных и магниевых удобрений на фоне азотно-калийных на урожайность, качество и вынос элементов питания яровым ячменём в зависимости от кислотности дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2023. № 6. С. 39–46.

Effect of Phosphorus and Magnesium Fertilizers on Mineral Nutrition and Yield of Winter Wheat depending on Liming of Sod-Podzolic Soil

N. A. Kirpichnikov^a, S. P. Bizhan^{a, #}, V. V. Tribelgorn^a

^aD.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry,
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

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

In long-term field experience on strongly acidic, poorly cultivated sod-podzolic soil, high efficiency of phosphorus fertilizers combined with magnesium and liming in the cultivation of winter wheat of the Moskovskaya 56 variety was revealed. Under these conditions, the content of nitrogen, phosphorus and magnesium in plants in the flowering phase increased. Improving the mineral nutrition of plants in this case provided the highest yield (75.3 c/ha), exceeding the background level of nitrogen-potassium fertilizers by 2.7 times, the payback of mineral fertilizers (NPK) increased by 2.5 times, reaching 16.7 kg/kg. The use of phosphorus fertilizers on highly acidic soil increased yields by 65% at 27.5 c/ha against the background of nitrogen-potassium fertilizers. On calcified soil with a slightly acidic reaction of the medium, the yield from the use of phosphorus fertilizers increased by 19% compared to the background of 58.1 kg/ha. Yield increases when using magnesium fertilizers against the background of full fertilizer (NPK) decreased as soil acidity decreased and were significant: on medium acidic soil — 4.9 and slightly acidic — 6.1 c/ha. At the maximum yield of winter wheat, due to the use of phosphorus and magnesium fertilizers and a decrease in the acidity of sod-podzolic soil, the removal of nutrients by the winter wheat harvest increased: nitrogen — by 3.5, phosphorus — 3.7, potassium and magnesium — 3 times.

Keywords: sod-podzolic soil, agrochemical properties, phosphorus and magnesium fertilizers, winter wheat, yield.

УДК 631.11:631.5

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ДЛИТЕЛЬНОМ СТАЦИОНАРНОМ ОПЫТЕ[§]

© 2024 г. О. В. Волюнкина*

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

Представлены результаты наблюдений за реакцией растений на применение 6-ти систем удобрения, испытанных в течение 24 лет в повторных посевах яровой мягкой пшеницы после стерни. Визуальные и фенологические наблюдения за растениями раскрыли особенности их роста и развития на неудобренных и удобренных фонах. Определение засоренности посева выявило влияние удобрений на величину долей пшеницы и сорных растений в массе снопа в фазе формирования зерновки. В большей части лет этого опыта удобрения не увеличивали засоренность посева, лишь в течение 5-ти лет из 18-ти отмечено такое отрицательное действие. Показатели структуры урожая пшеницы (количество колосьев на 1 м², озерненность колоса и масса 1000 зерен) при применении удобрений улучшались, особенно в годы с достаточным увлажнением. Содержание клейковины в зерне и муке при внесении удобрений в дозах N40–60 без P20 и на его фоне существенно повышалось, увеличивая частоту лет с качеством пшеницы 3-го класса. Агро-техническая и экономическая оценка 6-ти систем удобрения бессменной пшеницы после стерни выделила 4 варианта с окупаемостью, близкой к получению 10 кг зерна на 1 кг действующего вещества удобрений.

Ключевые слова: системы удобрения, бессменная пшеница, фенологические наблюдения, засоренность посева, структура урожая пшеницы, качество зерна, экономическая оценка.

DOI: 10.31857/S0002188124060055, **EDN:** CXXFVL

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основ продовольственной безопасности в России является повышение урожайности сельскохозяйственных культур, что более надежно происходит при применении минеральных удобрений. Внесение азотных и калийных удобрений в нашей стране составляет 18.5% от мирового потребления, фосфорных – 6.5% [1, 2]. Автор работы [3], показавший объемы производства и применения удобрений в РФ, указал, что уже в 2019 г. на 61% площади пашни вносили минеральные удобрения. При использовании удобрений и подборе их оптимальных доз следует учитывать их убывающую эффективность с увеличением дозы [4]. Для фосфорных удобрений необходимо учитывать последствие в последующие 2 года [5]. Экономическая эффективность удобрений возрастает, если учтено предварительное агрохимическое обследование почвы [5, 6].

Учеты и наблюдения за растениями в опытах в течение вегетации помогают объяснить особенности формирования урожайности пшеницы и качества зерна. В исследовательских работах по определению состава удобрения и их оптимальных доз большое значение придается сопутствующим наблюдениям, детализирующим действие внесенных питательных веществ [7–10]. Полноценной становится оценка влияния удобрений, если оценивают не только продуктивность зерновых и других культур, но и качество продукции, что важно для дальнейшей успешной ее переработки [11, 12]. Цель работы – изучение влияния различных систем удобрения на продуктивность яровой пшеницы в длительном стационарном опыте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – филиале УрФАНИЦ УрО РАН – в лабораториях агрохимии и земледелия. Стационарный опыт, в котором наблюдали за ходом роста яровой мягкой пшеницы в период вегетации, был размещен на Центральном

[§] Исследование в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002.

опытном поле Курганского НИИСХ. Заложен опыт в 1971 г. заведующим отделом агрохимии В.И. Волынкиным. Один из его помощников — сотрудник О.В. Волынкина (с 1993 г. по настоящее время). В течение 7-ми ротаций в 1971—1998 гг. изучение состава удобрения и доз азота вели в зернопропашном севообороте кукуруза — пшеница — пшеница — овес. Культуры выращивали при ежегодной вспашке. В конце этого периода в земледельческой практике Курганской и других областей произошли изменения — сокращение посевов кормовых культур и объемов проведения вспашки. Учитывая появление в сельскохозяйственном производстве новых технологий, в 1999—2000 гг. севооборот в опыте был заменен бессменной пшеницей после стерни. Почва на участке под опытом — выщелоченный чернозем маломощный малогумусный среднесуглинистый с содержанием гумуса в слое 0—20 см — 4.5% и подвижных соединений: P_2O_5 (по Чирикову) — 40 (низкое), K_2O — 250—350 мг/кг (высокое). За 53 года проведения опыта показатель pH_{KCl} изменился с исходной величины 6.0—6.2 до 5.15 ед. — в контроле и до 5.0 ед. — на фоне применения N60P20.

Во 2-й части опыта районированные сорта яровой мягкой пшеницы высевали в норме 4.5 млн всхожих зерен/га сеялкой СКП-2.1 с сошником культиваторного типа. Общая площадь делянки 270, учетная — 90 м². Повторность трехкратная. Удобрения — аммиачная селитра и аммофос. Сорта ценной среднеспелой пшеницы в большей части лет опыта — Терция и Зауралочка местной селекции. Учет урожая пшеницы проводили комбайном Sampro-500 напрямую с отбором образца для анализа влажности и сорности бункерной массы зерна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведение наблюдений за морфологией и свойствами растений при действии разных систем применения удобрений в стационарных опытах помогает объяснить главные данные — результаты учета урожая культур. В стационарном опыте в течение всей вегетации посевы осматривали, чтобы зафиксировать начало проявления действия разных систем удобрения. Визуальные наблюдения за растениями показали, в какой момент появились различия во внешнем виде удобренных и неудобренных растений. Чаще всего этот срок наступал после выпадения осадков в начале вегетации. Под влиянием удобрений растения приобретали более яркую зеленую окраску, особенно на фонах применения азота с фосфором, что было вызвано недостатком подвижного P_2O_5 в выщелоченном черноземе участка под опытом при его содержании 40 мг/кг. В фазе выхода в трубку пшеницы отмечали различия и по высоте растений в пользу фона азотно-фосфорного удобрения. Фенологические наблюдения раскрывали разнообразие хода роста

и развития растений под влиянием удобрений в разных погодных условиях. При контрастной погоде срок от всходов до колошения пшеницы сорта Зауралочка составлял 40 сут в сухом 2021 г. и 47 сут в благоприятном по увлажнению 2017 г. Период вегетации соответственно длился 79 и 89 сут. Важная фаза роста — кущение — в основном приходилась на июнь и длилась 14—16 сут. В этой фазе закладывается колос. Очень тесная связь выявлена между количеством зерен в колосе и количеством осадков в июне. Например, в 2016, 2017 и 2022 гг. выпадению осадков в июне в количестве 59, 48 и 82 мм соответствовала озерненность колоса 17—21 зерен в контроле и 26—27 шт. — на фонах N40—60P20. При осадках в июне 9—12 мм в сухих 2020 и 2021 гг. число зерен в колосе снижалось до 5—10 шт. в контроле и 8—16 шт. — при внесении удобрений. На фоне применения азотно-фосфорного удобрения флаговый лист работал дольше. В опыте была выявлена реакция 2-х среднеспелых ценных сортов пшеницы Терция и Зауралочка на достаточно жесткую технологию, представляющую собой возделывание пшеницы как бессменной культуры после стерневого фона.

В течение 18-ти лет вели наблюдения за засоренностью посева пшеницы. Для иллюстрации результатов наблюдений приведены варианты азотно-фосфорного удобрения, поскольку применение одного азота выражалось слабой эффективностью с прибавками при внесении N20—40—60, равными 1.8—2.5 ц/га, тогда как с добавлением фосфора средние прибавки увеличивались до 3.4—5.6—6.4 ц/га соответственно. В конце июня ежегодно применяли смесь 2-х гербицидов — дикотицидов и граминицидов, из которых первые действовали эффективно, вторые — слабее. Многолетние сорняки, достаточно полно уничтожаемые гербицидом, до обработки были в очень небольшом количестве. В их числе были молочай лозный (*Euphorbia virgata* W.K.) и выюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.). Из однолетних сорных растений появились noneя черноватая (*Nonea pulla* D.C.), подмаренник цепкий (*Gallium aparine* L.), гречишка выюнковая (*Polygonum convolvulus* L.). Среди злаковых однолетних сорняков в основном произрастал щетинник сизый (*Setaria glauca* (L.) P.B.). Он широко распространился при замене ежегодной вспашки стерневым фоном. Иногда щетинник оставался в нижнем ярусе посева, а в теплые влажные годы достигал до осеменения. Так было в 2007 г. при количестве осадков в мае, июне и июле 61, 28, 108 мм и 2008 г. при осадках 84, 28, 46 мм соответственно. В эти 2 года на конец июля доля сырой массы сорных растений в снопе в контроле достигала 27.0 и 17.8%, снижаясь только при внесении N60P20. В засушливые годы их доля была равна 1.4—1.9%, повышаясь при среднем увлажнении до 10.2—14.5%. При благоприятных и равномерных осадках пшеница набирала хорошую биомассу, вытесняя сорные растения при их доле 5—6% в снопе.

Анализ засоренности посева проводили в фазе формирования зерновки 23–27 июля. Сырая масса снопа пшеницы к этому моменту отражала условия погоды каждого периода вегетации и была тесно связана с величиной урожайности. Взамен громоздкой таблицы за 18 лет данные сгруппированы по величине набранной массы пшеницы к концу июля. Осадки июля сильнее, чем июня, влияли на распространение сорных растений. Эта связь ярче проявилась при сравнении результатов по группам лет (табл. 1).

Очень важно выявить действие удобрений на засоренность посева. Удобрения, повышая к концу июля вегетативную массу пшеницы в 1.4–1.6 раза к контролю, способны увеличивать и массу сорняков. Можно не считать те изменения засоренности от удобрения, когда ее уровень по принятой шкале сохранялся в том же классе, что и в контроле. При таком подходе получалось, что за счет удобрений существенное увеличение доли массы сорняков в снопе отмечено за 18 лет этого анализа 5 раз — в 2005, 2009, 2013, 2014 и 2020 г. Снижение засоренности от удобрений наблюдали 6 раз — в 2008, 2010, 2011, 2016, 2018 и 2019 г., что было связано с недостатком влаги в июне. В табл. 2 показана часть 18-летних данных с высокой долей сорных растений в годы с повышенными осадками в июле.

По данным, разделенным на 4 группы по величине набранной сырой массы пшеницы к моменту

определения засоренности посева, величина биомассы коррелировала с урожайностью (табл. 3).

Корреляционным анализом подтверждена тесная связь этих величин, особенно при сравнении их в группах. Выявлено большое значение для урожайности пшеницы июньских осадков. При переходе от 2-й группы к 3-й биомасса пшеницы во всех вариантах увеличилась в 1.21 раза, а урожайность — лишь в 1.03 раза. Причиной был жаркий засушливый август в годы 3-й группы с осадками в 2005, 2007 и 2014 г., равными 16–20 мм и температуре воздуха 19–20.6°C.

Следующим наблюдением за влиянием систем удобрения на продуктивность бессменной пшеницы после стерни было определение структуры урожая. Его вели все 24 года опыта с бессменной пшеницей после стерни. Годы сгруппированы по величине ГТК за май–август. Для показа результатов взяты 3 варианта. Если в наблюдениях за засоренностью посева важно было проследить за влиянием высокой дозы азота N60P20, то при оценке урожая и его структуры были взяты более умеренные дозы N20–40P20 (табл. 4). Это сделано по двум причинам — большей реальности их использования в производственной практике и частом отсутствии существенной дополнительной прибавки урожайности при переходе от N40P20 к N60P20, что в среднем за 25 лет дало прибавку всего 0.7 ц/га.

Таблица 1. Зависимость засоренности посева бессменной пшеницы после стерни от осадков июня и июля

Группа	Количество лет и W_{06} , W_{07} , мм	Доля массы сорняков в снопе, %		
		N0P0	N40P20	N60P20
1	5 (W_{06} 21, W_{07} 33)	7.5	6.1	8.5
2	4 (W_{06} 33, W_{07} 62)	12.3	13.0	12.6
3	4 (W_{06} 96, W_{07} 96)	15.4	22.3	20.2
4	5 (W_{06} 70, W_{07} 70)	7.1	6.0	3.4
	r для 18-ти пар “доля и W_{06} ”	–0.281	–0.411	–0.422
	r для 18-ти пар “доля и W_{07} ”	0.317	0.371	0.228
	r для пар 4-х групп “доля и W_{06} ”	–0.526	–0.462	–0.699
	r для пар 4-х групп “доля и W_{07} ”	0.726	0.793	0.583

Таблица 2. Засоренность посева бессменной пшеницы в годы с влажным июлем

Год	W_{06} , мм	W_{07} , мм	Доля массы сорняков в снопе, %		
			система удобрения		
			N0P0	N40P20	N60P20
2011	100	78	18.5	30.2	30.4
2013	16	64	9.8	14.6	14.6
2014	6	102	8.9	16.2	10
2016	60	131	10.2	15.7	14
2017	48	78	16.8	26.2	30.5
Среднее за 18 лет			10.8	10.3	11.5

Таблица 3. Соответствие сырой массы пшеницы в фазе формирования зерна ее урожайности в разных погодных условиях

Группа	Количество лет в группах (осадки июня и июля, мм)	Система удобрения					
		N0P0		N40P20		N60P20	
		биомасса, г/м ²	урожайность зерна, ц/га	биомасса, г/м ²	урожайность зерна, ц/га	биомасса, г/м ²	урожайность зерна, ц/га
1	5 (W_{06} и W_{07} – 21 и 33)	369	5.3	494	7.9	513	7.8
2	4 (W_{06} и W_{07} – 26 и 62)	625	8.9	889	13.2	973	14.6
3	4 (W_{06} и W_{07} – 24 и 96)	786	9.7	1079	13.7	1287	13.2
4	5 (W_{06} и W_{07} – 68 и 70)	1210	16.3	1626	25.0	1908	25.1
	r для 18-ти пар “биомасса растений и урожайность”	0.903		0.884		0.853	
	r для пар 4-х групп “биомасса растений и урожайность”	0.989		0.980		0.948	
	r для 18-ти пар “урожайность и W_{06} , W_{07} ”	0.732, 0.046		0.745, 0.013		0.746, 0.000	
	r для 4-х групп пар “урожайность и W_{06} , W_{07} ”	0.937, 0.493		0.957, 0.432		0.947, 0.401	

Таблица 4. Роль удобрений и погодных условий в формировании разных элементов структуры урожая бессменной пшеницы после стерни (2000–2023 гг.)

ГТК _{5–8}	Вариант	Количество продуктивных стеблей, шт./м ²	Число зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г	Урожайность зерна при учете комбайном, ц/га	Прибавка урожайности, ц/га
0.48	N0P0	232	10.9	25.3	6.0	–
	N20P20	256	12.9	26.2	7.7	1.7
	N40P20	238	14.4	25.3	8.0	2.0
1.05	N0P0	246	14.8	28.0	9.3	–
	N20P20	274	16.2	28.6	12.1	2.8
	N40P20	275	18.3	29.0	13.7	4.4
1.14	N0P0	298	15.1	29.8	13.6	–
	N20P20	331	17.0	31.2	18.9	5.3
	N40P20	349	21.5	32.5	23.2	9.6

Примечание. HCP_{05} урожайности для групп лет: 0.9, 2.1 и 3.7 ц/га соответственно.

В засушливые годы удобрение оказывало влияние на все 3 элемента структуры урожая, но оно было слабым в отношении числа продуктивных стеблей и крупности зерна. Более заметно повышалось число зерен в колосе. Даже при среднем уровне увлажнения периода май–август проявилась такая же закономерность. Во влажные годы при оптимальной дозе удобрения N40P20 повысилась роль всех 3-х элементов структуры урожая: число продуктивных стеблей на 1 м² увеличилось на 51 шт., количество зерен в колосе – на 6 шт. и масса 1000 зерен – на 2.7 г. За счет этого получена самая высокая прибавка урожайности 9.6 ц/га. В среднем за 25 лет (1999–2023 гг.) исследований одностороннее азотное удобрение N20–40–60

на участке с низким содержанием в почве P₂O₅ (40 мг/кг) давало наименьшие прибавки урожайности бессменной пшеницы после стерни – 1.8–2.3 ц/га при урожае в контроле 9.7 ц/га. Азотно-фосфорное удобрение обеспечивало вдвое более высокие прибавки урожайности – 3.4–5.5–6.2 ц/га соответственно системе удобрения.

Накопление в зерне белка и клейковины сильнее менялось в зависимости от погодных условий, но удобрения всегда оказывали положительное влияние на эти показатели. В 2000–2011 гг. в опыте высевали пшеницу сорта Терция. Изменения по годам содержания клейковины в зерне у этого сорта в контроле

менялись от 14.0 до 26.9 и от 22.6 до 30.4% в варианте N40P20. В среднем за 12 лет посева этого сорта 3 дозы азотного удобрения N20–40–60 позволили вырастить зерно с содержанием клейковины 23.9–24.9–28.0%, а при добавлении к азоту фосфора – 20.5–24.8–28.0% соответственно при ее количестве в контроле 19.8%. Повторяемость уровня качества 3-го класса соответственно составила на фоне применения одного азота 58–67–92% лет, а при этих же дозах с фосфором – 25–67–75% лет, тогда как в контроле этот показатель достигал только 25%. Показано, что малая доза азота на фосфорном фоне не была способна надежно обеспечивать 3-й класс качества пшеницы.

В 2012–2021 гг. высевали пшеницу сорта Зауралочка. Закономерность влияния удобрений была аналогичной. Содержание клейковины на фоне применения 3-х доз азота составило 25.4–26.3–26.6%,

с добавлением P20 – 22.3–25.8–26.6% соответственно при показателе 22.8% в контроле. С переходом на использование в опыте других сортов пшеницы пока не набрано достаточных опыто-лет для заключения о роли удобрений на качество зерна пшеницы различных сортов.

Более подробно качество бессменной пшеницы после стерни оценивали по технологическим свойствам зерна, для сорта Зауралочка это показано в табл. 5. Для упрощения этой таблицы приведены контрольный вариант и 2 варианта применения удобрений в дозах, рекомендуемых производственной практике.

В 2015 г. накопление клейковины в зерне из-за среднего поражения растений листовой и стеблевой ржавчиной соответствовало лишь 4-му классу

Таблица 5. Технологические качества пшеницы сорта Зауралочка (2015–2020 гг.)

Вариант	Масса 1000 зерен, г	Выход муки, %	Клейковина в муке, %	Сила муки, ед. альвеографа	<i>p/l</i>	Объемный выход хлеба, мл	Балл за хлеб
2015 г.							
Контроль	24.9	71.3	23.0	209	3.4	510	1.7
N20P20	24.9	73.3	23.4	136	2.6	660	3.1
N40P20	23.1	68.6	27.6	145	2.6	685	3.1
2016 г.*							
Контроль	19.0	44.6*	—	133	3.7	550	2.9
N20P20	19.9	46.0	—	—	—	415	2.3
N40P20	18.8	41.0	—	—	—	390	2.3
2017 г.							
Контроль	32.7	66.6	22.4	136	1.9	575	2.5
N20P20	32.5	76.6	20.0	106	2.1	610	3.1
N40P20	34.5	81.3	26.4	168	3.0	655	2.9
2018 г.							
Контроль	27.9	72.3	23.3	291	5.0	700	3.1
N20P20	28.2	73.3	20.0	262	5.1	645	3.1
N40P20	28.8	66.6	24.6	267	4.9	635	3.1
2019 г.							
Контроль	28.4	77.5	30.5	303	2.3	640	2.8
N20P20	28.5	75.2	23.9	392	3.8	610	3.0
N40P20	27.7	73.3	31.0	377	3.4	655	3.0
2020 г.							
Контроль	22.8	71.6	36.6	430	3.2	935	4.1
N20P20	22.8	70.0	34.7	438	2.6	925	3.6
N40P20	23.2	73.3	39.2	372	2.9	895	3.5
Среднее за 5 лет (без 2016 г. с сильным поражением пшеницы стеблевой ржавчиной)							
Контроль	27.4	71.8	27.2	274	3.2	672	2.8
N20P20	27.4	73.7	24.4	267	3.2	690	3.2
N40P20	27.4	72.6	29.8	266	3.4	705	3.1

* В 2016 г. помол зерна – на мельнице “Quadrumat Junior”, в остальные годы – на мельнице “Бюлер”.

качества пшеницы. В муке содержание клейковины было далеким от нормы, которая установлена для муки пшеницы ценных сортов — $\geq 30\%$. Удобрение повышало количество клейковины на 3–4 пункта к контролю. Дозы азота N20P20 было недостаточно для улучшения качества, поскольку она в основном расходовалась на формирование урожайности. Проявилась характерная черта для пшеницы сорта Зауралочка, у которой свойства клейковины по величине показателя ИДК отвечали требованиям 1-й группы или приближались к этому уровню. Возможно, благодаря лучшей упругости клейковины сила муки в контроле была на хорошем уровне — 209 ед. альвеографа (е.а.). В большей части остальных вариантов, где была больше урожайность, сила муки равна 136–157 е.а. Объемный выход хлеба в контроле составил 510, на фоне N40P20 — 685 мл. Общая хлебопекарная оценка кардинально изменялась с повышением балла от 1.7 в контроле к 3.1 при внесении N40P20.

В 2016 г. растения были сильнее, чем в 2015 г., поражены стеблевой ржавчиной, и качество зерна пшеницы резко снизилось. Например, масса 1000 зерен была равна 19.0–19.9 г, содержание клейковины в зерне — 12–19%, а клейковина трудно отмывалась. Сила муки была равна 133 е.а. (в части вариантов из-за низкого качества теста силу муки не удалось определить). Объемный выход хлеба был равен 390–550 мл. В табл. 5 не показаны варианты N40–60 без фосфора, где обычно влияние на урожайность было слабым, а на качество зерна — значительным. Лишь в этих вариантах по содержанию клейковины в зерне в 2016 г. отмечен переход из 5-го в 4-й класс.

В 2017 г. за счет своевременной обработки посева фунгицидом и равномерного выпадения достаточного количества осадков в период вегетации удобрения положительно влияли на количество клейковины за исключением малой дозы азота N20P20. В благоприятных условиях увлажнения 2017 г. этой дозы азота хватило на прибавку урожайности зерна 6.0 ц/га, но содержание клейковинных белков в зерне пшеницы и муке стало даже меньше, чем в контроле. С повышением дозы увеличивалось не только содержание клейковины в муке, но и улучшались свойства теста и хлеба. Например, сила муки в варианте N40P20 увеличилась со 136 до 168 е.а. Заметнее такое положительное действие было при дозах N60–80P20, не показанных в табл. 5.

В 2018 г. положительное действие удобрений на рост растений, проявившееся в начале вегетации, затем нивелировалось из-за недостатка влаги в июне и жары в июле–августе. Пшеница по качеству отвечала в основном требованиям 4-го класса. Сила муки была равна 262–291 е.а., но с очень неблагоприятным соотношением упругости и растяжимости теста (4.9–5.1) при оптимальных показателях $p/l = 1–2$. Поэтому объемный выход хлеба на фоне применения

удобрений чаще даже снижался по отношению к контролю, за исключением одностороннего азотного удобрения в вариантах N40–60, где улучшалась и общая хлебопекарная оценка.

В 2019 г., как и обычно в годы с недостатком влаги, накопление клейковинных белков было на высоком уровне за исключением варианта N20P20, который отставал по этому показателю в большинстве лет опыта. При высокой силе муки вновь повторилось неблагоприятное соотношение упругости и растяжимости теста (2.3–3.8). Поэтому объемный выход хлеба был в пределах 610–720 мл. Общая хлебопекарная оценка повысилась с 2.8 баллов в контроле до 3.0–3.1 на фоне N40P20.

В 2020 г. содержание клейковины в муке было аналогичным этому показателю в зерне, также в варианте N20P20 оно было меньше, чем в контроле, при повышении дозы азота оно стало существенно больше. Сила муки 430 е.а. была в контроле, 438 — при малой дозе азота и 372–467–488 е.а. — при применении доз N40–60–80P20. Показатель объемного выхода хлеба в вариантах опыта изменялся незначительно, но оставался на высоком уровне 895–935 мл. Общая хлебопекарная оценка была самой высокой в контроле — 4.1 балла и 3.2–3.6 — в остальных вариантах. Снижение величин части перечисленных показателей на удобренных фонах можно объяснить расходом удобрения на формирование урожая с прибавками зерна ≈ 4 ц/га. В среднем за 2015–2020 гг. (исключая 2016 г.) в рекомендуемой практике варианте N40P20 в посеве бессменной пшеницы после стерни объемный выход хлеба составил 705 мл при 672 мл в контроле.

Общая итоговая характеристика изученных систем удобрения за 24 года (1999–2022 гг.) на бессменной пшенице после стерни дана в табл. 6.

Следует считать, что агрофон, взятый для исследования, не является необычным. Его продуктивность в центральной зоне области равна продуктивности 3-й пшеницы после пара на фонах без основной обработки почвы. Судя по окупаемости удобрения, положительно проявились только 4 приема, где окупаемость 1-го кг д.в. приближалась к желаемой величине 10 кг/кг д.в. К ним относится применение N20 и все дозы азотно-фосфорного удобрения.

Однако подсчет оплаты удобрения в рублях при неблагоприятном соотношении цен на зерно пшеницы и удобрения обеспечил неплохую рентабельность лишь в одном варианте — N20. Стоимость 1-го ц зерна пшеницы и аммиачной селитры — 1100 и 2400 руб. соответственно создало соотношение 1 : 2.18, для аммофоса — 1 : 5.18 (1100 : 5700). При таком неблагоприятном соотношении необходимости широкого применения аммофоса в Курганской обл. при 62% почв пашни с низким содержанием подвижного фосфора может реализоваться при получении более высокого прироста урожайности, чем в среднем получено

Таблица 6. Эффективность систем удобрения бессменной пшеницы после стерни (1999–2022 гг.)*

Показатель	Системы удобрения						
	N0P0	N20	N40	N60	N20P20	N40P20	N60P20
Урожайность, ц/га	10.0	11.8	12.4	12.2	13.4	15.6	16.4
Прибавка от удобрения, ц/га	—	1.8	2.4	2.2	3.4	5.6	6.4
Окупаемость удобрения, кг/кг д.в.	—	9.0	6.0	3.7	8.5	9.3	8.0
Цена зерна**, руб./ц	1100	1136	1143	1164	1100	1143	1136
Стоимость прибавки***, руб./га	—	2883	3769	3678	4225	7083	8615
Затраты на удобрение, руб./га	—	1668	3036	4380	4348	5716	7060
Прибыль, руб./га	—	1215	733	–702	–123	1367	1555
Рентабельность, %	—	73	24	–20	–2.8	24	22

* Взяты цены 2022 г.

** Цена с учетом повторяемости 3-го класса качества зерна.

*** Учтено улучшение качества зерна базового урожая.

в опыте с жестким агрофоном. Значительно больше была эффективность удобрений в более влажной северо-западной зоне Курганской обл., где в больших объемах и применяют азотно-фосфорное удобрение. В нашем опыте прибавка урожайности зерна бессменной пшеницы после стерни, равная 9.6 ц/га в варианте N40P20 во влажные годы, позволила иметь почти вдвое улучшенные показатели экономической оценки удобрений.

ВЫВОДЫ

1. Применение систем азотно-фосфорного удобрения яровой мягкой пшеницы улучшало внешний вид посева, окраска листьев на этих фонах оказывалась более яркого зеленого цвета. Достаточное увлажнение в июне в фазе кущения создавало благоприятные условия для формирования колоса с большим числом зерен. Флаговый лист дольше работал на фоне внесения азотно-фосфорного удобрения.

2. Несмотря на ежегодное применение в опыте гербицида, ряд лет отмечали повышенную засоренность посева пшеницы, когда доля сорняков по их массе в общем снопе возрастала до 18–30%. В основном это был 2-й нарост щетинника сизого после июльских дождей. За все годы анализа засоренности посева в течение 5-ти лет удобрения увеличивали долю сорняков по их массе в снопе, 6 других лет — снижали и 7 лет показатели были близкими.

3. Анализ структуры урожая проводили ежегодно, он показал роль разных элементов структуры в засушливые и влажные годы. Удобрение оказывало влияние на все 3 элемента структуры урожая, но при недостатке влаги оно было слабым в отношении числа продуктивных стеблей и массы 1000 зерен. В такие годы более заметно повышалось количество зерен в колосе, как и при среднем уровне увлажнения за май–август. Во влажные годы удобрение в дозе N40P20 положительно влияло на все 3 элемента структуры урожая:

число продуктивных стеблей на 1 м² увеличилось на 51 шт., количество зерен в колосе — на 6 шт. и масса 1000 зерен — на 2.7 г, за счет чего получена самая высокая прибавка урожайности, равная 9.6 ц/га.

4. Качество зерна пшеницы в опыте не всегда отвечало требованиям к 3-му классу. В среднем за 12 лет (2000–2011 гг.) у пшеницы сорта Терция содержание клейковины в зерне в вариантах N0P0 и N40P20 составило 19.8 и 24.8%. Повторяемость по годам качества зерна на уровне 3-го класса зависела от дозы азота. При внесении доз N20–40–60 она составила 58–67–92% лет, а при тех же дозах азота в сочетании с фосфором, где был больше сбор зерна, — 25–67–75% лет при 25% лет в контроле. Почти такая же закономерность обнаружена и для сорта Зауралочка, которую высевали в опыте в 2012–2021 гг. Доза N20P20 была недостаточной для повышения содержания клейковинных белков в зерне и муке.

5. По влиянию удобрений на технологические свойства зерна пшеницы многолетние данные характеризуются положительно. С повышением содержания белка в зерне и муке за счет азотного удобрения в основном улучшались свойства теста и хлеба.

6. В среднем за 24 года исследования одно азотное удобрение в дозах N20–40–60 на участке с низким содержанием в почве P₂O₅ (40 мг/кг) давало наименьшие прибавки урожайности зерна бессменной пшеницы после стерни — 1.8–2.4 ц/га при урожайности в контроле 10.0 ц/га. Азотно-фосфорное удобрение обеспечивало вдвое более высокие прибавки урожайности — 3.4–5.6–6.4 ц/га.

7. Экономическая оценка 6-ти систем удобрения (3 дозы азота без фосфора и с его добавлением) при применении 4-х из них показала неплохой уровень окупаемости, которая приближалась к 10 кг зерна на 1 кг д.в. удобрений. Менее эффективным было одностороннее применение азотного удобрения в дозах N40–60 с оплатой 6.0 и 3.7 кг/кг д.в. По окупаемости

удобрений в рублях рентабельность на хорошем уровне была лишь в одном варианте — N20 (73%). Причиной этого было сложившееся в земледелии России неблагоприятное соотношение цен на зерно пшеницы и удобрения (от 1 : 2.18 до 1 : 5.18).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копытова Е.Д. Тенденции развития отрасли минеральных удобрений в России // Соц. пространство. 2016. № 4(06). С. 1—16.
2. Волкова А.В. Рынок минеральных удобрений. М.: Нац. исслед. ин-т “ВШЭ”, 2015. 67 с.
3. Кручинина В.М., Рыжкова С.М. Рынок удобрений в России: состояние и направление развития // Вестн. ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 375—384.
4. Лукин А.С., Папырин В.Б. Методология определения экономической эффективности применения минеральных удобрений // Вестн. ОмГАУ. 2016. С. 1—7.
5. Болотов С.В. Экономическая эффективность использования минеральных удобрений в сельскохозяйственных организациях северной зоны Краснодарского края: Дис. ... д-ра эконом. наук. Краснодар, 2002. 205 с.
6. Нестеренко В.А. Формирование урожая и качества яровой пшеницы в зависимости от доз азотных удобрений и содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистой почве: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2021. 28 с.
7. Малов Н.П. Продуктивность сортов яровой пшеницы в зависимости от нормы высева на черноземе выщелоченном юго-восточной части Волго-Вятской зоны: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Уфа, 2018. 24 с.
8. Земцова Е.С., Боме Н.А., Земцова Е.С. Влияние густоты стояния растений на структуру урожая яровой мягкой пшеницы // Совр. пробл. науки и образ-я. 2015. № 2.
9. Захаров В.Г., Яковлева О.Д. Изменение урожайности и элементов структуры урожая у сортов яровой пшеницы разных периодов сортосмены // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 10. С. 53—57.
10. Агеева Е.В., Леонова И.Н., Лихенко И.Н., Советов В.В. Масса зерна колоса и массы тысячи зерен как признаки продуктивности у сортов яровой пшеницы разных групп скороспелости в условиях лесостепи Приобья // Письма в Вавилов. журн. генет. и селекции. 2021. № 7(1). С. 5—11.
11. Ворончихина И.Н., Рубец В.С., Ворончихин В.В., Пыльнев В.В. Комплексная оценка яровой мягкой пшеницы в условиях ЦРНЗ с применением метода индексов // Электр. научн.-производ. журн. “Агро-ЭкоИнфо”. 2022. № 6. С. 1—9. <https://doi.org/10.51419/202126614>
12. Демина Н.Ф. Влияние погодных условий на урожайность и качество зерна яровой пшеницы в условиях лесостепи Среднего Поволжья // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2022. № 23(4). С. 433—440. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.4>

Effect of Various Fertilizer Systems on the Productivity of Spring Wheat in a Long-Term Stationary Experiment

O. V. Volynkina[#]

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

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

The results of observations of the reaction of plants to the use of 6 fertilizer systems tested for 24 years in repeated sowing of spring soft wheat after stubble are presented. Visual and phenological observations of plants revealed the features of their growth and development on unfertilized and fertilized backgrounds. The determination of the contamination of the crop revealed the effect of fertilizers on the proportion of wheat and weeds in the sheaf mass during the formation phase of the grain. In most of the years of this experience, fertilizers did not increase the contamination of crops, only for 5 out of 18 years such a negative effect was noted. The indicators of the structure of the wheat harvest (the number of ears per 1 m², earliness, and the weight of 1000 grains) improved with the use of fertilizers, especially in years with sufficient moisture. The gluten content in grain and flour when fertilizing in doses of N40—60 without P20 and against its background increased significantly, increasing the frequency of years with grade 3 wheat quality. An agrotechnical and economic assessment of 6 permanent wheat fertilizer systems after stubble identified 4 options with a payback rate close to obtaining 10 kg of grain per 1 kg of the active ingredient of fertilizers.

Keywords: fertilizer systems, permanent wheat, phenological observations, crop contamination, wheat crop structure, grain quality, economic assessment.

УДК 631.81:631.559:633.491

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ КАЛИЙСОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ НА КАЧЕСТВО И УРОЖАЙНОСТЬ КАРТОФЕЛЯ[§]

© 2024 г. О. В. Броварова^{1,*}, Д. А. Шушков²¹Институт агробиотехнологий им. А.В. Журавского Коми НЦ УрО РАН
167023 Сыктывкар, ул. Ручейная, 27, Россия²Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167982 Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, Россия

*E-mail: olbrov@mail.ru

Почвы Республики Коми характеризуются как дерново-подзолистые. Известно, что при сельскохозяйственном возделывании таким почвам необходимо внесение различных минеральных и органических удобрений, известкование, углубление пахотного слоя, борьба с эрозией. Почвы региона обеднены калием, часть которого выносят сельскохозяйственные культуры, поэтому калийные удобрения, где калий находится в доступной форме, являются одними из самых востребованных в сельском хозяйстве. В данной работе приведены результаты исследования вещественного состава и текстурных характеристик аналитимсодержащих алевролитов, калиевых щелочных сиенитов и кородревесной золы и возможного их использования в качестве калийных добавок для улучшения продуктивности картофеля.

Ключевые слова: картофель, калийсодержащие минеральные добавки, аналитим, цеолиты, иллит, смектит, глинистые минералы, санидин, сиениты, кородревесная зола.

DOI: 10.31857/S0002188124060067, **EDN:** CXUXOY

ВВЕДЕНИЕ

Используемые в сельском хозяйстве калийные удобрения — это дополнительный минеральный источник калия как одного из 3-х необходимых макроэлементов в питании растений. К питательным элементам, необходимым для нормального развития картофеля, относят азот, фосфор, калий, магний, железо, сера, бор, марганец и некоторые другие. Каждый элемент выполняет в жизни растения определенную роль и, в случае нехватки одного из них, нарушается нормальное развитие растений.

Среди большого количества элементов, которые принимают участие в почвенно-геохимических процессах, калию отводят особую и важную роль. Поведение элемента в почвах отражает как динамические, так и статические изменения в почвообразовании. Также калий является непосредственным участником почвенных и биологических процессов, поэтому его поведение в большей степени

определяет качество и уровень состояния экосистем [1]. Калий относят к элементам, способным накапливаться в живых организмах в большем количестве, чем в окружающей среде (биофильные элементы), и их участие в круговороте веществ определяется степенью захвата их живыми организмами [2, 3].

На сегодняшний день достаточно активно исследуют природные и экологически чистые источники калия, используемые в качестве удобрений для повышения урожайности и продуктивности сельскохозяйственных культур и снижения рисков при их удобрении [4–6].

Минеральные добавки, содержащие в своем составе калий, имеют ряд преимуществ по сравнению с применяемыми калийными солями [4]. Применение калийсодержащих минеральных добавок не загрязняет грунтовые воды различными анионами, не вызывает засоления почв. Например, глауконитовые породы, также рассматриваемые в качестве источника калия, содержат много микроэлементов, включая медь, цинк, железо, марганец, бор, селен, кобальт, молибден и др., которые являются незаменимыми для роста и развития растений [4, 7].

[§] Работа выполнена в рамках государственных заданий НИОКТР — 1021051101666-2-1.5.1; FUUU-202-0059 и НИОКТР 123033000036-5; FUUU-2023-0001.

Благодаря однородной гранулированной текстуре глауконитовые породы улучшают физические свойства почв, их пористость и проницаемость. Они характеризуются высокой сорбционной способностью и повышают влагоудерживающую способность почв. Многие исследователи описывают положительный эффект при использовании глауконита на рост сельскохозяйственных культур [4, 5, 8–10].

Кроме этого калийсодержащие минеральные добавки рассматривают как удобрения с пролонгированным высвобождением калия, что позволяет обеспечить растения необходимыми питательными микро- и макроэлементами в процессе вегетации и поддерживать низкий уровень содержания химических веществ в почвах сельскохозяйственного назначения [11]. Изучение химического и минерального составов калийсодержащих минеральных добавок в большей степени будет определять возможность их использования в качестве минеральных удобрений и дополнительного источника калия [12–14].

Одним из наиболее важных элементов питания при возделывании картофеля является калий. Калий, в отличие от азота, фосфора и серы, которые входят в состав разнообразных органических соединений, находится в ионной форме. Обеспеченность калием растений связана с интенсивностью фотосинтеза. Калий оказывает большое влияние на углеводный обмен, положительно влияет на урожайность и качество картофеля. Он необходим для образования и формирования клубней, лучшего передвижения крахмала из листьев в растущие клубни. В ботве картофеля калия содержится больше, чем в клубнях, и этот калий придает растению устойчивость к заморозкам.

Цель работы — изучение влияния добавок минерального сырья и промышленных отходов Республики Коми с различным содержанием K_2O на урожайность и качество клубней картофеля.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили анальцим-содержащие алевриты, калиевые щелочные сиениты, кордревесная зола (далее по тексту — минеральные добавки). Анальцимсодержащие алевриты были отобраны с проявления «Весляна» на Западном Притиманье, калиевые щелочные сиениты — из дайки в верховьях р. Верхняя Ворыква на Среднем Тимане (Республика Коми). Кордревесная зола, образующаяся при сжигании коры деревьев и древесины на ТЭЦ, предоставлена АО «Монди СЛПК» (г. Сыктывкар) и является техногенным отходом. По данным [15], в 2010 г. объем золы составил >5000 т.

Химический состав минеральных добавок определяли с помощью волнодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра Lab Center XRF-1800, Shimadzu с учетом потерь при прокаливании.

Минеральный состав добавок исследовали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Shimadzu XRD6000 (излучение $CuK\alpha$, Ni фильтр, 30 кВ, 30 мА). Порошковую пробу снимали в диапазоне $2-65^\circ 2\theta$ со скоростью $1^\circ/\text{мин}$ и шагом сканирования $2\theta 0.05^\circ$. Фазовый состав глинистой фракции определяли методом рентгеновской дифракции ориентированных образцов, подвергнутых стандартным диагностическим обработкам. Диагностику и количественное определение минерального состава проводили методом Ритвельда с помощью программы Profex 5.1.0 [6].

Удельную площадь поверхности, объем микро- и мезопор, общий объем пор определяли методом низкотемпературной физической сорбции азота с помощью анализатора площади поверхности и размера пор NOVA 1200e, Quantachrome при температуре -196°C с предварительной дегазацией при 350°C в вакууме в течение 2 ч. Удельную площадь поверхности рассчитывали методом BET, объем мезопор — методом ВJН, объем микропор — методом Дубинина—Астахова.

Испытания минеральных добавок проводили на опытных полях Института агробиотехнологий им. А.В. Журавского ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в соответствии с методическими указаниями [16]. Схема посадки — 0.7×0.3 м. Площадь учетной делянки — 5.25 м^2 , повторность опыта — четырехкратная. Минеральные добавки крупностью 1.0 мм вносили вручную, непосредственно при посадке картофеля, в каждую лунку один раз за все время вегетации. В качестве сельскохозяйственной культуры был выбран картофель сорта Невский. Масса добавок составляла 5 г/растение. Урожайность картофеля определяли на 65- и 85-е сут.

Агрохимические показатели почвы определяли в соответствии с ГОСТами и методиками, используемыми в химии почв: pH водной и солевых вытяжек — ионометрическим методом по ГОСТ 26483-85, содержание гумуса — по методу Тюрина в модификации Симанова [17], гидролитическую кислотность — по ГОСТ 26212-91, содержание подвижных форм фосфора и калия — по ГОСТ 54650-2011, обменных катионов кальция и магния — по ГОСТ 26487-85.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика минеральных добавок. По данным рентгенофлуоресцентного анализа (табл. 1),

содержание K_2O в анализимсодержащем алевролите составляло ≈ 2 масс. %.

Методом рентгендифрактометрического анализа диагностированы кварц, анализим, глинистые минералы, минералы полевых шпатов, гетит (рис. 1).

Глинистые минералы представлены слабоупорядоченным иллит/сметтитом с различным содержанием разбухающих слоев и гидратированным иллитом [18]. Содержание анализима в породе составляло 21, глинистых минералов – 29%. Калий находился в структуре глинистых минералов вместе с катионами Na^+ и Ca^{2+} , располагающимися в межслоевом промежутке, и был способен к эквивалентному обратимому обмену с другими катионами.

Удельная площадь поверхности анализимсодержащего алевролита составила $45.6\text{ м}^2/\text{г}$ (табл. 2).

Изотерма адсорбции–десорбции азота, представленная на рис. 2а, относится к IV(а) типу согласно классификации IUPAC [19].

Она характеризуется наличием петли гистерезиса и является типичной для мезопористых сорбентов. В области низких давлений на адсорбционной кривой наблюдают резкий подъем, свидетельствующий о наличии в образце микропор ($< 2\text{ нм}$). Подъем кривой адсорбции при относительном давлении, близком к 1, указывает на присутствие макропор. Петлю гистерезиса можно отнести к типам Н3 и Н4, поскольку в образце присутствуют и глинистые минералы, и цеолиты.

Сиениты, согласно [19, 20], сложены калиевым полевым шпатом, содержание которого составляло

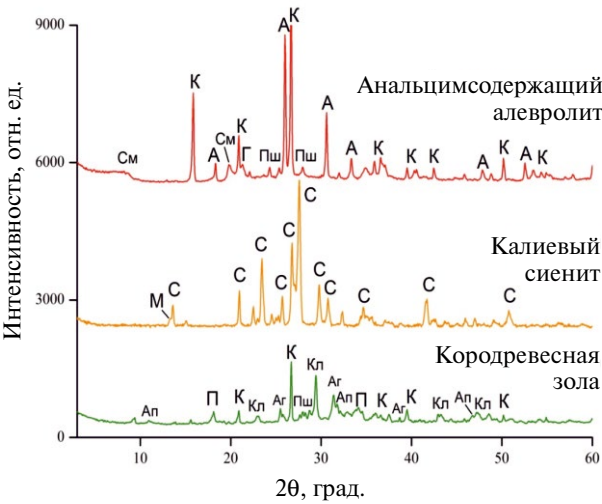


Рис. 1. Дифрактограммы анализимсодержащего алевролита, калиевого сиенита и кордревесной золы. К – кварц, А – анализим, Г – гетит, Пш – минералы полевых шпатов, См – смешанослойные глинистые минералы, М – морденит, С – санидин, Ап – апатит, Кл – кальцит, П – портландит, Аг – ангидрит.

до 90%. По данным рентгеновской дифракции, калиевый полевой шпат был моноклинным, слабоупорядоченным санидином. Вторичные минералы представлены цеолитами (в основном морденитом) и смешанослойными глинистыми минералами. В акцессорных количествах присутствовали фосфаты (фторапатит) и титановые минералы (титаномагнетит, ильменит, анатаз). Содержание калия

Таблица 1. Химический состав минеральных добавок, масс. %

Соединение	Анализимсодержащий алевролит	Калиевый щелочной сиенит	Кордревесная зола
SiO ₂	56.36	55.59	8.24
TiO ₂	0.78	2.26	0.12
Al ₂ O ₃	19.47	19.89	7.26
Fe ₂ O ₃ общ	5.5	2.07	3.30
MnO	0.05	0.02	2.17
MgO	1.78	0.21	3.42
CaO	0.9	0.7	35.17
Na ₂ O	3.0	0.21	1.73
K ₂ O	1.96	17.14	5.70
P ₂ O ₅	0.08	0.26	4.91
SO ₃	н.д.	0.12	5.61
Cl	н.д.	н.д.	1.07
CO ₂	0.26	0.1	10.23
п.п.п.	9.21	1.3	20.50
Сумма	99.09	99.84	99.99

Примечание. п.п.п. – потери при прокаливании, н.д. – не диагностировано.

Таблица 2. Текстурные характеристики минеральных добавок

Образец	Удельная поверхность, м ² /г	Общий объем пор	Объем мезопор	Объем микропор	Средний радиус пор, нм
		см ³ /г			
Анальцимсодержащий алевролит	45.6	7.718 × 10 ⁻²	6.156 × 10 ⁻²	0.024	3.147
Калиевый сиенит	4.4	4.772 × 10 ⁻³	3.636 × 10 ⁻³	0.002	2.162
Кордревесная зола	9.3	1.43 × 10 ⁻²	1.177 × 10 ⁻²	0.006	3.088

в сиенитах достигало 17.14%. Калий главным образом находился в калиевом полевом шпате, в небольшом количестве присутствовал в мордените и глинистых минералах. В структуре полевого шпата катионы калия располагаются в узких каналах, вследствие чего миграция из них калия в почву происходит медленно. В мордените катионы калия, а также натрия и кальция расположены в каналах и способны к катионному обмену. В структуре глинистых минералов катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} располагаются в межслоевом промежутке и также способны к эквивалентному обратимому обмену с другими катионами.

Калиевый сиенит характеризуется низкой удельной площадью поверхности, которая составила $4.4 \text{ м}^2/\text{г}$ (табл. 2). Изотерма адсорбции–десорбции азота имела петлю гистерезиса и относится к IV(a) типу (рис. 2б). На кривой адсорбции в области низких давлений отсутствует подъем, свидетельствующий об отсутствии микропор в образце. При относительном давлении, близком к 1, наблюдали небольшой подъем, который указывал на незначительное присутствие макропор. Петля гистерезиса относится к типу Н4.

Кордревесная зола представляет собой дисперсное вещество, получаемое в ходе сжигания растительного сырья, а именно древесины и коры. Содержание K_2O в кордревесной золе составляло 5.70%. Кроме этого, в ней присутствовало довольно значительное количество CaO (35.17%), а также 4.91% P_2O_5 . В минеральном составе золы найдены карбонаты (кальцит), фосфаты (апатит), сульфаты (ангидрит). Также выявлены кварц, портландит и минералы полевых шпатов. По данным рентгеноспектрального микроанализа, калий находится в сульфатах и минералах полевых шпатов, его высвобождение из данных фаз в почву происходит медленно.

Удельная площадь поверхности кордревесной золы составила $9.3 \text{ м}^2/\text{г}$ (табл. 2). Изотерма адсорбции–десорбции азота характеризовалась наличием петли гистерезиса и относится к IV(a) типу (рис. 2б). На кривой адсорбции в области низких давлений отсутствовал подъем, свидетельствующий об отсутствии микропор в образце. При относительном давлении, близком к 1, наблюдали подъем, который указывал на присутствие макропор. Петля гистерезиса относится к типу Н3.

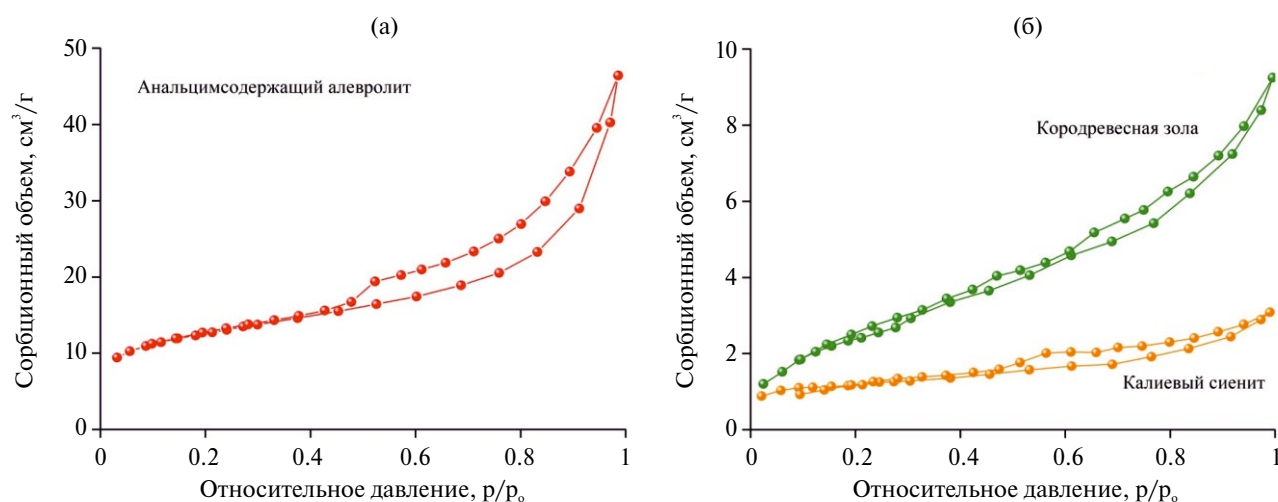


Рис. 2. Изотермы адсорбции–десорбции азота анальцимсодержащим алевролитом (а), калиевым сиенитом и кордревесной золой (б).

На основании полученных данных минерального и химического составов калийсодержащих минеральных добавок, можно оценить влияние препаратов на урожайность и продуктивность сельскохозяйственных растений. Полевой эксперимент проводили на опытных полях в четырехкратной повторности. Почва делянок — дерново-подзолистая, легкосуглинистая. На момент закладки опыта ее агрохимическая характеристика была следующей: содержание гумуса — 7.81%, pH_{KCl} 6.23 ед., содержание подвижного фосфора по Кирсанову — 671, подвижного калия — 250, обменного кальция — 13.8, обменного магния — 3.50 мг/кг, гидролитическая кислотность — 1.46 ммоль/100 г почвы.

В период вегетации растений картофеля проводили фенологические наблюдения. При применении калиевого сиенита на момент появления всходов картофель вззошел не равномерно, чего не наблюдали при добавлении анальцимсодержащих алевролитов и кородревесной золы. Возможно, на данном этапе повлияли засушливые погодные условия. Сумма выпавших осадков за первую декаду июня составила всего 2.9 мм. При этом в первой декаде июня преобладала сухая и солнечная погода со средней температурой 16°C. В целом в опыте в процессе вегетации все фазы развития картофеля соответствовали средним показателям для региона.

Известно, что нарастание массы клубней картофеля определяется развитием и активностью работы фотосинтетического аппарата растений, на который существенно влияют способы применения, дозы препаратов и погодные условия. Поэтому был

проведен учет урожайности клубней картофеля на 65-е и 85-е сут после посадки (табл. 3).

В результате полевого эксперимента установлено, что добавка сиенитов в почву привела к снижению урожайности на 6.3% на 65-е сут и на 0.5% — на 85-е сут. Вероятно, миграция калия из санидина в почву была затруднена из-за низкой способности полевых шпатов к катионному обмену в нормальных условиях [1]. Несмотря на низкое содержание калия в анальцимсодержащих алевролитах и кородревесной золе их внесение повысило урожайность на 65-е и 85-е сут на 33.7 и 18.1 и на 21.1 и 7.4% соответственно. Положительное влияние на урожайность кородревесной золы и анальцимсодержащих алевролитов было вызвано факторами, для выяснения которых необходимы дополнительные исследования. В целом исследованные минеральные добавки на основе анальцимсодержащих алевролитов и кородревесной золы положительно повлияли на вегетирующие растения картофеля и обеспечили достоверную прибавку накопления массы клубней по сравнению с контрольным вариантом.

Главным показателем качества картофеля является его химический состав, т.е. содержание в нем основных питательных веществ. Калийные минеральные добавки в различной степени оказывали влияние на химический состав картофеля (табл. 4).

При внесении калиевого сиенита показатели химического состава клубней были несколько меньше, чем при применении анальцимсодержащих алевролитов и кородревесной золы. В целом при внесении минеральных добавок с различным содержанием обменного калия содержание

Таблица 3. Урожайность картофеля при внесении калийсодержащих минеральных добавок, т/га

Вариант	Урожайность клубней картофеля	
	время после посадки клубней	
	65 сут	85 сут
Контроль без добавок	9.5 ± 0.10	21.6 ± 0.60
Анальцимсодержащие алевролиты	12.7 ± 0.70	25.5 ± 0.40
Калиевый щелочной сиенит	8.9 ± 0.26	21.5 ± 0.70
Кородревесная зола	11.5 ± 0.54	23.2 ± 0.27
<i>HCP</i> ₀₅	1.3 ± 0.31	1.5 ± 0.38

Таблица 4. Влияние минеральных добавок на химический состав клубней картофеля

Вариант	Сухое вещество, %	Крахмал, %	Витамин С, мг %	Нитраты, мг/кг сырой массы
Контроль	18.7	11.9	30.8	108
Анальцимсодержащие алевролиты	19.3	12.9	32.6	96
Калиевый щелочной сиенит	17.9	11.8	29.7	115
Кородревесная зола	18.3	12.5	30.7	110

сухого вещества в клубнях оставалось практически на уровне контрольного варианта.

Потребительские качества картофеля определяются прежде всего содержанием крахмала, величина которого тесно взаимосвязана с количеством сухого вещества. На содержание крахмала и сухого вещества влияют как агротехнические условия возделывания картофеля, так и уровень и сбалансированность минерального питания растений. В варианте без применения минеральных добавок содержание крахмала в клубнях картофеля составляло 11.8%. Содержание крахмала в картофеле зависело от содержания обменного калия в минеральных добавках, наибольшая крахмалистость клубней отмечена в варианте применения аналцимсодержащих алевролитов и составляла 12.9%.

Картофель – хороший источник витаминов, одним из которых является витамин С. Его содержание зависит от многих факторов и варьирует от 5 до 50 мг% в сыром веществе [21, 22]. Использование при выращивании картофеля минеральных добавок аналцимсодержащих алевролитов и кородревесной золы значительно повысило содержание витамина С в клубнях по сравнению с минеральной добавкой калиевого щелочного сиенита. Содержание нитратов в клубнях картофеля составило 96–115 мг/кг сырой массы, что не превышало ПДК (250 мг/кг).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследовано влияние добавок на основе минерального сырья (аналцимсодержащих алевролитов, калиевых щелочных сиенитов) и техногенных отходов (кородревесной золы) с различным содержанием K_2O на урожайность клубней картофеля. Наибольшее содержание K_2O (17.14%) выявлено в щелочных сиенитах, наименьшее – в аналцимсодержащих алевролитах (1.96%), содержание K_2O в кородревесной золе составляло 5.70%.

Несмотря на низкое содержание калия в аналцимсодержащих алевролитах и кородревесной золе, данные добавки положительно повлияли на вегетирующие растения картофеля и повысили урожайность на 65-е и 85-е сут на 33.7 и 18.1, на 21.1 и 7.4% соответственно. Добавка калиевых сиенитов в почву привела к снижению урожайности на 6.3% на 65-е сут и на 0.5% на 85-е сут. Вероятно, это было связано с низкой миграционной способностью калия из структуры полевых шпатов.

Минеральные добавки на основе аналцимсодержащих алевролитов и кородревесной золы способствовали увеличению содержания в картофеле крахмала и витамина С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Середина В.П.* Калий и почвообразование: Уч. пособ. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. 354 с.
2. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
3. *Фокин А.Д.* Роль растений в формировании транспортных потоков вещества в почвах и организация почвенных систем. Пушкино: ИФХБШ РАН, 2007. Т. I. С. 50–52.
4. *Franzosi C., Castro L.N., Celeda A.M.* Technical evaluation of glauconies as alternative potassium fertilizer from the Salamanca Formation // Patagonia, Southwest Argentina. Nat. Resour. Res. 2014. № 23. P. 311–320.
<https://doi.org/10.1007/s11053-014-9232-1>
5. *Karimi E., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R., Aminey A.* The potential of glauconitic sandstone as a potassium fertilizer for olive plants // Arch. Agron. and Soil Sci. 2012. № 58. P. 983–993.
6. *Рудмин М.А., Галиханов А.В., Стеблецов М.Д.* Глауконит Бакчарского месторождения (Западная Сибирь): Особенности химического состава и возможность использования в агрохозяйстве // Матлы V Рос. школы по глинистым минералам – “Argilla Studium-2017”. 2017. С. 98–103.
7. *Rudmin M., Banerjee S., Makarov B., Mazurov A., Ruban A., Oskina Y., Tolkachev O., Buyakove A., Shal-dybin M.* An investigation of plant growth by the addition of glauconitic fertilizer // Appl. Clay Sci. 2019. V. 180. P. 105–178.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105178>
8. *Torqueti S.T.S., Boldrin K.V.F., do Nascimento A.M.P., Paiva P.D.O., Furtini Neto A.E., Luz I.C.A.* Alternative potassium source for the cultivation of ornamental sunflower. Fonte alternativa de potassio no cultivo do girassol ornamental // Ciencia e Agrotecnologia. 2016. V. 40. P. 257–264.
<https://doi.org/10.1590/1413-70542016403036115>
9. *Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A., Makarov B., Martemyanov D.* Economic potential of glauconitic rocks in Bakchar deposit (S-E Western Siberia) for alternate pot-ash fertilizer // Appl. Clay Sci. 2017. 150. P. 225–233.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.035>
10. *Dias K.G. de L., Guimaraes P.T.G., do Carmo D.L., Reis T.H.P., Lacerda J.J. de J.* Alternative sources of potassium in coffee plants for better soil fertility, productivity, and beverage quality // Pesq. Agrop. Brasil. 2018. V. 53. P. 1355–1362.
<https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001200008>
11. *Liang D., Zhang Q., Zhang W., Liu L., Liang H., Quirino R.L., Chen J., Liu M., Lu Q., Zhang C.* Tunable thermo-physical performance of castor oil-based polyurethanes with tailored release of coated fertilizers // J. Clean. Prod. 2019. V. 210. P. 1207–1215.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.047>

12. *Васильев А.А.* Глауконит – эффективное природное минеральное удобрение картофеля // Аграрн. вестн. Урала. 2009. № 6(60). С. 35–37.
13. *Назаров В.А., Медведев И.Ф., Зеленова А.Н.* Влияние глауконита на физико-химические и биологические свойства чернозема южного // Аграрн. научн. журн. 2015. № 10. С. 10–13.
14. *Castro L., Tourn S.* Direct application of phosphate rocks and glauconite as alternative sources of fertilizer in Argentina // *Explor. Mining Geol.* 2003. № 12. P. 71–78.
15. Управление продажами непрофильной продукции ОАО “Монди СЛПК”. URL: <https://studfile.net/preview/9536651/page:4> (дата обращения: 09.02.2023).
16. *Доспехов Б.А.* Методика полевого эксперимента (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
17. *Луганская В.Д., Луганский В.Н.* Химический анализ почв. Методические указания для проведения лабораторных занятий студентов очной и заочной форм обучения. Екатеринбург, 2011. С. 9–11.
18. *Shushkov D.A., Kotova O.B., Ibrahim J.-E.F.M., Harja M., Gomze L.A., Shchemelinina T.N., Ignatiev G.V.* Alancime-bearing rocks as advanced sorbents // *Epitofanyag Journal of Silicate Based and Composite Materials.* 2020. V. 72. № 5. P. 156–164.
19. *Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W.* Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // *Pure Appl. Chem.* 2015. V. 87. № 9–10. P. 1051–1069.
20. *Удортатина О.В., Травин А.В., Куликова К.В., Варламов Д.А.* Свидетельства раннепермского импульса ультракалийного магматизма на Среднем Тимане // Бюл. Моск. общ-ва испытателей природы. Отдел геол. 2016. Т. 91. Вып. 2–3. С. 29–35.
21. *Коршунова А.В.* Картофель России. В 3-х кн. М.: ВНИИКС, 2003. 1535 с.
22. *Власенко Н.Е.* Удобрение картофеля. М.: Агропромиздат, 1987. 219 с.

Investigation of the Potential of Potassium-Containing Additives Based on Mineral Raw Materials and Industrial Waste on the Quality and Yield of Potatoes

O. V. Brovarova^{a, #}, D. A. Shushkov^b

^a*A. V. Zhuravsky Institute of Agrobiotechnology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the RAS,
ul. Rucheynaya 27, Syktyvkar 167023, Russia*

^b*Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the RAS,
ul. Pervomayskaya 54, Syktyvkar 167982, Russia*

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

The soils of the Komi Republic are characterized as sod-podzolic. It is known that agricultural cultivation of such soils requires the introduction of various mineral and organic fertilizers, liming, deepening of the arable layer, and erosion control. The soils of the region are depleted of potassium, part of which is carried out by agricultural crops, therefore potash fertilizers, where potassium is in an affordable form, are among the most in demand in agriculture. This paper presents the results of a study of the material composition and textural characteristics of analcime-containing siltstones, potassium alkaline syenites and bark ash and their possible use as potash additives to improve potato productivity.

Keywords: potatoes, potassium-containing mineral additives, analcime, zeolites, illite, smectite, clay minerals, sanidine, syenites, bark ash.

УДК 632.954:632.5:633.63

ЗНАЧЕНИЕ СТРАХОВЫХ ГЕРБИЦИДОВ В СТАБИЛИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА БОРЬБЫ С СОРНЯКАМИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БЕТАНАЛОВ-ДЖЕНЕРИКОВ НА САХАРНОЙ СВЕКЛЕ

© 2024 г. Е. А. Дворянкин*

*Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, п. ВНИИСС, 86, Россия***E-mail: dvoryankin149@gmail.com*

В полевых условиях в 2014–2020 гг. провели испытания трехкомпонентных гербицидов бетаналов-дженериков против малолетних двудольных сорняков в посеве сахарной свеклы для сравнения с эффективностью применения оригинального гербицида Бетанал Эксперт ОФ (БЭОФ) в нормах расхода 1.0 л/га. Показано, что стабильность разбавленных эмульсий бетаналов-дженериков зависела от особенностей структуры и дисперсности рабочих растворов, способности к кристаллизации действующих веществ, реакции на различные условия среды. Препарат БЭОФ в норме расхода 1.0 л/га отличался от бетаналов-дженериков в этой же норме применения более высокой эффективностью действия на сорняки. Сорняки, сформировавшие 2 настоящих листа, заметнее проявляли фазовую устойчивость к дженериковым бетаналам. Эффективность БЭОФ на сорняки в фазе семядолей была больше, чем дженериков на 6–8, при обработке сорняков в фазе 2-х настоящих листьев – на 18%. Установлено, что в диапазоне температур 19–22°C эффективность дженериковых бетаналов была наиболее близка эффективности оригинала БЭОФ. Для стабилизации эффективности действия на сорную растительность с оригинальным препаратом БЭОФ 1.0 л/га норму расхода бетаналов-дженериков увеличивали на 15–20%. Смесь бетаналов-дженериков со страховыми гербицидами Митроном и Карибу, примененная 3-кратно в рекомендованных нормах расхода в соответствии с фазой развития сахарной свеклы, обеспечивала высокую чистоту посева и урожайность культуры на уровне варианта контроля с ручной прополкой. Гербициды помимо широколистных двудольных сорняков хорошо подавляли молодые растения осотов и вьюнка полевого. Страховые гербициды Митрон и Карибу нивелировали недостатки дженериковых бетаналов при совместном применении в борьбе с сорной растительностью в посеве сахарной свеклы.

Ключевые слова: сахарная свекла, гербициды, сорняки, эффективность, фитотоксичность, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188124060079, **EDN:** CXSSYR

ВВЕДЕНИЕ

Полемика об эффективности и качестве применяемых гербицидов-дженериков в посевах сельскохозяйственных культур относительно гербицидов фирм-оригинаторов периодически возобновляется в зависимости от успешности борьбы с сорняками. Например, свекловоды время от времени предъявляют претензии к качеству дженериковых бетаналов, особенно примененных в условиях переувлажненной или засушливой погоды [1, 2]. Возникает вопрос – насколько обоснованы эти претензии?

Есть мнение, что сейчас многие препараты-дженерики не хуже, чем препараты фирм-оригинаторов. Проведение соответствующих исследований

может прояснить этот вопрос: в чем же различие оригинальных гербицидов от гербицидов-дженериков, и в каких условиях они могут быть идентичны по эффективности и качеству.

Оригинальный препарат создает на уровне изобретения крупная химическая компания, располагающая большим финансовым капиталом и возможностями для масштабных исследований нового действующего вещества. Она разрабатывает препаративную форму, технологии производства и эффективного применения препарата при участии многих известных ученых в области химии, биологии, земледелия и растениеводства. Глубокие исследования, которые проводят фирмы-разработчики оригинальных препаратов,

необходимы для научного обоснования нормы внесения, кратности и сроков обработки, оценки спектра эффективного действия и экологической безопасности. Компании-производители имеют исключительные права и возможности в течение ряда лет, чтобы вернуть затраты и получить прибыль от распространения нового препарата без конкуренции со стороны других организаций [1]. По истечении срока действия патента формула химического вещества становится достоянием широкого круга заинтересованных в его производстве организаций, но сама рецептура и технологический процесс производства препарата не разглашаются. Поэтому, когда другие фирмы желают производить на основе этого действующего вещества свой препарат, они преимущественно закупают его у оригинатора или выпускают свое. В случае самостоятельной полной или частичной разработки компонентов препарата его качество зависит от возможностей фирмы-производителя, ее финансовых вложений и стремления к поддержанию своего статуса. В случае нарушения рецептуры возможно отклонение в соотношении компонентов между собой или вообще отсутствие отдельных составляющих препарата. Производители дженериков для снижения себестоимости могут применять более дешевые компоненты в рецептуре препаративной формы, роль которых для качества препарата очень высока. Поэтому эффективность дженериков в зависимости от внешних условий бывает нестабильной.

Таким образом, дженерик — это копия оригинального препарата, которая должна обеспечивать такую же биологическую эффективность и экологическую безопасность в одинаковой препаративной форме и тех же нормах расхода как и оригинал. Дженерики, так же как и оригинальные препараты, проходят полевые испытания при регистрации в “Списке разрешенных к применению пестицидов”, подвергаются строгой проверке и сертификации. Качественные гербициды-дженерики на рынке пестицидов являются конкурентной продукцией для фирм-оригинаторов.

Эффективность большинства бетаналов-дженериков заявлена как сопоставимая в одинаковых нормах расхода с эффективностью оригинальных бетаналов [3]. Поэтому представило интерес оценить биологическую эффективность отдельных трехкомпонентных гербицидов группы бетаналов-дженериков в сравнении с оригинальным препаратом Бетанал Эксперт ОФ в нормах расхода препаратов 1.0 л/га и установить причины возможной нестабильной эффективности дженериков в борьбе с сорной растительностью, а также найти приемы стабилизации эффективности и качества бетаналов-дженериков в борьбе с сорняками в посевах сахарной свеклы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В многолетнем исследовании (2014–2020 гг.) изучали биологическую эффективность трехкомпонентных гербицидов группы бетаналов-дженериков (всего 9 препаратов в форме концентрата эмульсии (КЭ): Эксперт Трио, Лидер, Секира Элит, Бетахим Эксперт, Триплекс, Беташанс Трио, Профессор, Горизонт, Ратник) с формуляцией действующих веществ 112 + 91 + 71 (этофуме-зат + фенмедифам + десмедифам) в норме расхода 1.0 л/га, где в качестве эталона использовали оригинальный препарат фирмы Байер КропСайенс АГ Бетанал Эксперт ОФ, КЭ, 1.0 л/га (**БЭОФ**) с уникальными физико-химическими характеристиками [4]. Гербицид БЭОФ характеризуется наиболее высокими показателями вязкости, плотности концентрата эмульсии и относительно сильной кислотностью рабочих растворов.

Для первичной оценки эффективности гербицидов опыты размещали на паровом поле, что позволяло в течение одного вегетационного сезона 3–4 раза воспроизвести опыт в разных условиях погоды. Для этого было необходимо прокультивировать новый участок парового поля и получить всходы сорняков [5]. Почва опытного участка — чернозем выщелоченный малогумусный средне-мощный тяжелосуглинистый.

Гербициды вносили по отросшим сорнякам в фазе семядолей—2-х настоящих листьев ранцевым опрыскивателем, оборудованным штангой (2.7 м) с 6-ю щелевыми распылителями (рис. 1).

Схема опытов включала: контроль абсолютный и варианты с гербицидами. Площадь делянки 16.5 м², повторность опытов трехкратная, размещение делянок последовательное. Гербициды на делянке вносили однократно в вечернее время, учеты сорняков проводили через 8–10 сут после обработки гербицидами методом наложения рамки (0.25 × 1.0 м²).

По аналогичной схеме в других опытах исследовали эффективность трехкомпонентных дженериковых бетаналов в зависимости от увеличения нормы расхода препаратов на 10–30%, величины рН использованной воды, скорости кристаллизации препаратов в растворе, возраста сорной растительности по ранее приведенным методикам [5–8].

В посевах сахарной свеклы изучали эффективность 3-компонентных бетаналов-дженериков в комбинации со страховыми гербицидами Карибу и Митроном на опытном поле ВНИИСС в 2019–2020 гг. согласно схеме полевого опыта (табл. 1).

Для борьбы со злаковыми сорняками в опыте применяли препарат Пантера, 1.0 л/га, эффективность которого составила 97–100%. В опыте отмечены единичные растения осота розового — 0.12 шт./м², против которых специальные гербициды не применяли.



Рис. 1. Ранцевый опрыскиватель типа SOIO 425 (473Р), оборудованный штангой с 6-ю распылителями, рассчитанными на 6 рядков сахарной свеклы.

Таблица 1. Схема полевого опыта

Вариант, №	Послевсходовое внесение, л/га, кг/га		
	1-е внесение	2-е внесение	3-е внесение
1.	Контроль без прополки		
2.	Контроль с ручной прополкой		
3.	БЭОФ, 1.0	БЭОФ, 1.3	БЭОФ, 1.5
4.	Бетанал-дженерик, 1.0	Бетанал-дженерик, 1.3	Бетанал-дженерик, 1.5
5.	Бетанал-дженерик, 1.2	Бетанал-дженерик, 1.5	Бетанал-дженерик, 1.7
6.	БЭОФ, 1.0 + Митрон, 1.0	БЭОФ, 1.3 + Митрон, 1.25	БЭОФ, 1.5 + Митрон, 1.5
7.	БЭОФ, 1.0 + Митрон, 1.0 + Карибу, 0.02	БЭОФ, 1.3 + Митрон, 1.25 + Карибу, 0.02	БЭОФ, 1.5 + Митрон, 1.5 + Карибу, 0.02
8.	Бетанал-дженерик, 1.0 + Митрон, 1.0	Бетанал-дженерик, 1.3 + Митрон, 1.25	Бетанал-дженерик, 1.5 + Митрон, 1.5
9.	Бетанал-дженерик, 1.0 + Митрон, 1.0 + Карибу, 0.02	Бетанал-дженерик, 1.3 + Митрон, 1.25 + Карибу, 0.02	Бетанал-дженерик, 1.5 + Митрон, 1.5 + Карибу, 0.02

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 2.

Опыт закладывали в двухкратной повторности, размер делянки 16 м². После всходов обработки посевов сахарной свеклы гербицидами проводили по сорнякам в ранних фазах развития двудольных растений. Расход рабочей жидкости 250 л/га. Дробное внесение гербицидов применяли по мере появления новых волн нарастания сорняков.

Засоренность посева учитывали перед каждым внесением гербицидов и через 7–8 сут после их внесения. Учеты проводили на фиксированных площадках, ≥16 повторений в варианте, что по методике [9] соответствовало 5%-ному уровню значимости. Посев, уход за посевами, уборку проводили согласно общепринятым зональным рекомендациям. В период уборки урожайность и сахаристость сахарной свеклы определяли на поточной линии “Венема”. Математическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа [10] с применением компьютерной расшифровки показателей продуктивности сахарной свеклы.

Исследование проводили в условиях недобора влаги в августе–сентябре, что оказало влияние на повышенную сахаристость корнеплодов при уборке урожая.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что все испытанные бетаналы-джереники в норме расхода 1.0 л/га в разной степени уступали в эффективности действия на сорную растительность оригинальному гербициду БЭОФ, 1.0 л/га при расходе рабочей жидкости 250 л/га. Кроме того, всем исследованным дженерикам были

свойственны одинаковые недостатки в сравнении с гербицидом БЭОФ, поэтому для удобства восприятия материала результаты для этих препаратов усреднены и приведены в данной работе под названием “джерениковые бетаналы”.

Метеозависимость действия гербицидов группы бетанала на растения заметно проявлялась в полевых условиях. При низких температурах воздуха замедлялись процессы роста и развития растений, снижалась активность гербицидов. При температурах <15°C увеличивался период летального действия гербицидов, особенно дженериковых препаратов, на сорняки из-за снижения активности обменных процессов в растениях. С повышением температуры до 25°C возрастала скорость поглощения гербицидов в растения и тем самым увеличивалась их эффективность на сорняки. При температуре >25°C уменьшалась миграционная способность гербицидов группы бетанала, появлялась опасность усиления их токсичности и контактного действия на растения, в результате чего эффективность гербицидов группы бетанала снижалась. Подобная зависимость эффективности действия гербицидов на сорную растительность от температуры воздуха характерна для всех исследованных препаратов бетанальной группы с той разницей, что активность дженериковых препаратов на сорняки была существенно меньше в сравнении с активностью оригинального гербицида БЭОФ в условиях критических температур для роста и развития растений (рис. 2).

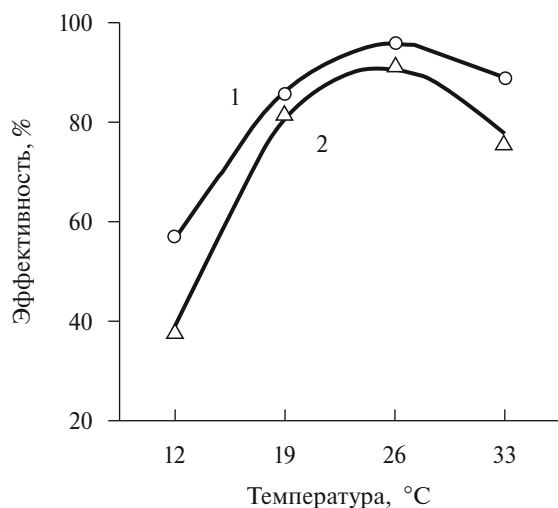


Рис. 2. Влияние температуры воздуха на среднюю эффективность трехкомпонентных дженериковых препаратов группы бетанала в сравнении с БЭОФ: 1 — БЭОФ, 1.0 л/га, 2 — дженериковые бетаналы, 1.0 л/га. То же на рис. 3, 5–7.

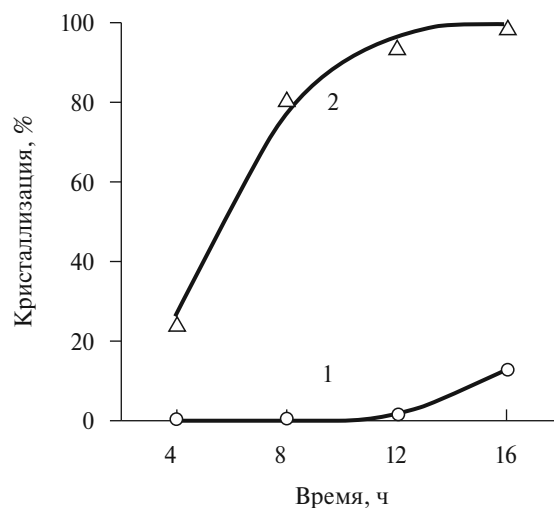


Рис. 3. Образование твердых кристаллов у трехкомпонентных гербицидов группы бетаналов.

В диапазоне температур 19–22°C эффективность дженериковых бетаналов была наиболее близка эффективности оригинала БЭОФ.

Стабильность разбавленных эмульсий гербицидов группы бетаналов в значительной степени определялась скоростью кристаллизации действующих веществ и качеством примененных ингибиторов кристаллизации, замедляющих рост кристаллов [5]. Гербицид БЭОФ отличался от бетаналов-дженериков низкой скоростью образования кристаллов при любых концентрациях рабочего раствора в пределах рекомендованных норм расхода препарата (рис. 3).

Дженериковые бетаналы характеризовались повышенной скоростью кристаллизации, которая заметно варьировала у разных препаратов, особенно в растворах с низкой нормой расхода действующего вещества. Это предьявлялось как недостаток препарата, т.к. после смешения с водой активные ингредиенты должны оставаться внутри масляной фазы раствора, не подвергаясь быстрой кристаллизации [11].

У большинства дженериков начало процесса образования твердых кристаллов отмечено через 4 ч после приготовления раствора. Это позволяло провести обработку растений в отсутствие крупных кристаллов действующих веществ в растворе при своевременном его применении.

В случае задержки применения рабочего раствора на культуре биологическая активность гербицидов группы бетаналов на сорный компонент снижалась вследствие кристаллизации действующих

веществ. Аналогичные процессы проходили и на листьях растений после внесения раствора гербицида [5]. Особенно это касалось растворов бетаналов-дженериков, образование и рост кристаллов которых проходили быстрее, чем в растворе БЭОФ. При нарастании величины кристаллов возрастало время подавления сорняков, уменьшалась эффективность действия препарата (рис. 4).

Гербициды, характеризующиеся высокой скоростью кристаллизации, отличались от гербицидов, защищенных ингибиторами кристаллизации, более мягким действием на сорняки. Крупные кристаллы не проникали в ткань растений, поэтому их можно отнести к потерям активных ингредиентов, что отражалось на эффективности борьбы с сорняками.

В условиях высокой освещенности, высоких температур воздуха и почвы скорость кристаллизации гербицидов группы бетанала на листьях растений резко снижалась, а их фитотоксичность для растений культуры возрастала, вплоть до обширных ожогов листьев особенно под действием дженериковых бетаналов с низкой плотностью концентрата эмульсии и резким запахом растворителя.

Физико-химические особенности препарата оказывали большое влияние на хозяйственные показатели — эффективность и качество примененного гербицида при разных условиях погоды. Благодаря формуляции БЭОФ, где использовано сочетание специфических производных растительного масла с другими компонентами, обеспечивалось создание пленки, которая дольше удерживалась на поверхности листьев и поддерживала наиболее высокий уровень контроля над сорняками. При выпадении осадков или обильной росы гербициды бетаналы-дженерики легче смывались с листьев растений, поэтому для этих препаратов требовалось больше времени с момента внесения гербицида до ожидаемых осадков. Методом искусственного дождевания делянок в течение 3-х мин через разное время после внесения гербицидов оценивали способность к смыву тонкой пленки препаратов в норме расхода 1.0 л/га с поверхности листьев сорняков. Эффективность гербицидов определяли через 8 сут после обработки. Контролем служили обработанные растения сорняков без применения дождевания. Показатели эффективности гербицидов в контроле были близки к показателям применения гербицидов при дождевании через 6–12 ч после внесения препаратов.

Препарат БЭОФ отличался от бетаналов-дженериков более высокой эффективностью действия на сорняки при выпадении кратковременных осадков в течение 4-х ч после внесения гербицидов (рис. 5).

При дождевании сорных растений через 4 ч после внесения гербицидов различия

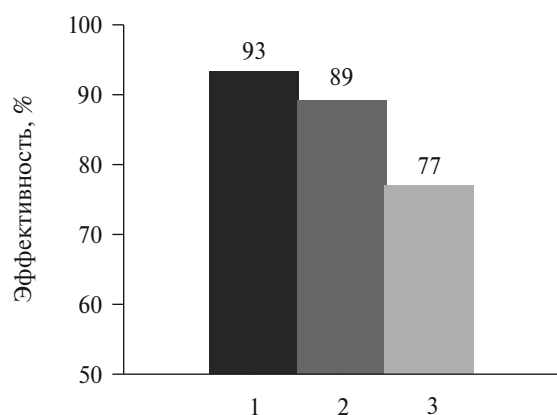


Рис. 4. Эффективность действия кристаллических растворов дженериковых бетаналов на сорняки в зависимости от величины кристаллов в растворе: 1 — раствор применен сразу после приготовления, 2 — раствор применен через 6–7 ч после приготовления (кристаллы размером 10–15 мкм), 3 — раствор применен через 12–16 ч после приготовления (кристаллы размером 40–80 мкм).

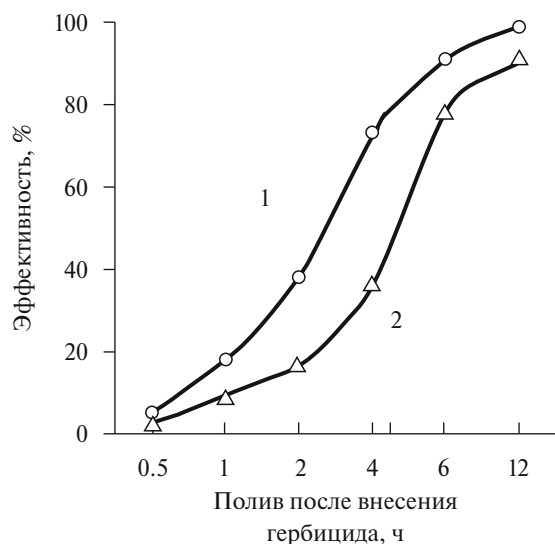


Рис. 5. Эффективность гербицидов группы бетаналов в зависимости от времени дождения растений после внесения препаратов в норме расхода 1.0 л/га.

в эффективности между оригиналом и дженериками в среднем составили 40%. Относительное выравнивание показателей эффективности действия на сорняки гербицидов-дженериков с оригиналом отмечали при дождении растений через 6 и особенно 12 ч после обработки гербицидами.

Гербициды группы бетаналов очень чувствительны к pH воды [7, 12]. Щелочная реакция воды заметно снижала эффективность действия гербицидов группы бетаналов на сорняки (рис. 6).

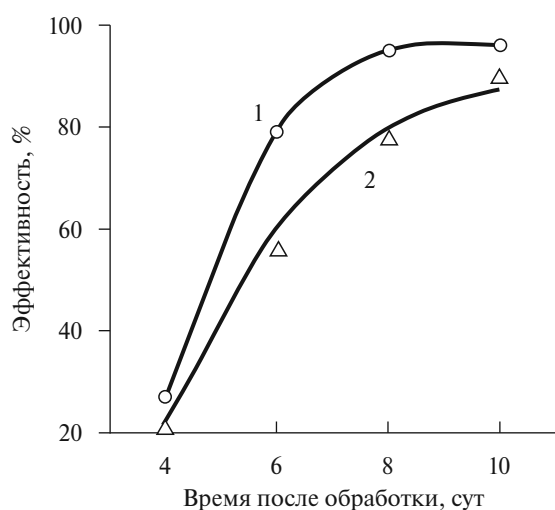


Рис. 7. Динамика гибели сорняков в возрасте семядолей—2 настоящих листа под действием гербицидов группы бетаналов.

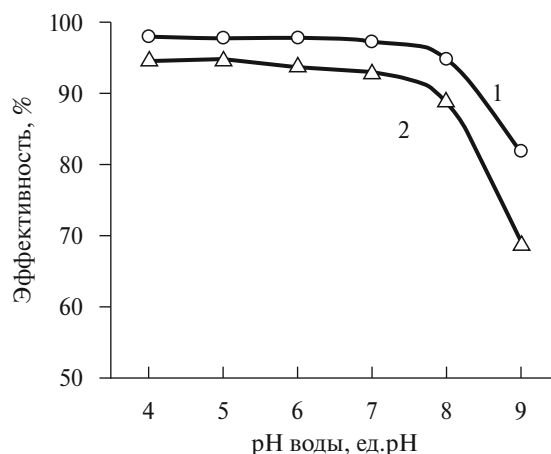


Рис. 6. Влияние pH воды на эффективность действия гербицидов группы бетаналов.

В благоприятной для реализации активности гербицидов кислой среде (pH 5.0–6.0) эффективность БЭОФ была больше на 5–6%, чем бетаналов-дженериков. В щелочной среде (pH 8.5–9.0) различия в эффективности гибели сорняков между БЭОФ и бетаналами-дженериками возросли до 9–14%, т.е. реакция на щелочную среду для бетаналов-дженериков была сильнее, чем оригинала. Отмечен более высокий рост кристаллов действующих веществ в щелочной среде, особенно в растворах бетаналов-дженериков.

По рекомендациям фирм производителей гербициды группы бетаналов в норме расхода 1.0 л/га применяли по двудольным сорнякам в возрасте семядолей. Однако в полевых условиях подобной возрастной однородности всходов сорняков чаще всего не встречалось. Неоднородность возраста сорняков зависела от характера пика всхожести растений. Теплая весна с достаточным количеством влаги в почве предопределяла дружные всходы семян сорняков и высокую их однородность по фазе развития. В условиях засушливой погоды неоднородность всходов сорняков заметно возрастала. Гербициды группы бетаналов в опыте применяли преимущественно в фазе семядолей—начала отрастания 1-й пары настоящих листьев (до 80–90%).

Динамика гибели сорняков во времени (10 сут) заметнее нарастала под действием БЭОФ и достигала максимума через 6–8 сут после внесения гербицида, тогда как период летального действия на сорняки дженериковых бетаналов увеличивался на 2–4 сут и часто завершался началом отрастания новой волны сорняков (рис. 7).

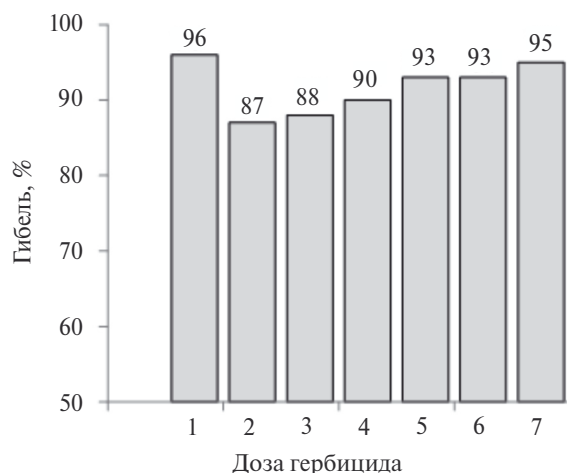


Рис. 8. Средняя эффективность действия трехкомпонентных дженериковых бетаналов на сорную растительность в зависимости от нормы расхода препаратов в сравнении с оригиналом БЭОФ: 1 – БЭОФ, 1.0 л/га; дженериковые бетаналы: 2 – 1.0, 3 – 1.1, 4 – 1.15, 5 – 1.20, 6 – 1.25, 7 – 1.30 л/га.

Прорастание новых сорняков на фоне ранее обработанных растений при замедленном характере действия гербицидов затрудняло планирование следующей обработки посева гербицидами.

В отличие от дженериковых бетаналов, гербицид БЭОФ в норме расхода 1.0 л/га хорошо уничтожал также сорняки в возрасте 1-й пары настоящих листьев (73%). Потенциал летального действия БЭОФ на сорняки в норме расхода 1.0 л/га

был больше, чем бетаналов-дженериков в этой же норме расхода.

Сорняки, сформировавшие 2 настоящих листа, заметнее проявляли фазовую устойчивость к дженериковым бетаналам, примененным в норме расхода 1.0 л/га. При обработке сорняков в возрасте семядолей эффективность БЭОФ была больше, чем дженериков на 6–8%, а при обработке сорняков в фазе 2-х настоящих листьев – на 18%.

Следовательно, дженериковые бетаналы в норме расхода 1.0 л/га вполне удовлетворительно уничтожали сорняки в фазе семядолей, но учитывая неоднородность развития сорняков, не имели достаточной эффективности для борьбы с подрастающими сорняками в период формирования 2-х настоящих листьев. После применения дженериков в этой норме расхода формировалась высокая остаточная засоренность, что налагало более высокие требования к последующим обработкам гербицидами. Поэтому, свекловоды, как правило, применяют бетаналы-дженерики в повышенных нормах расхода препаратов, т.е. для равноценной эффективности действия на сорную растительность с оригинальным препаратом БЭОФ, 1.0 л/га, норму расхода бетаналов-дженериков увеличивали в среднем на 15–20% (рис. 8).

В посеве сахарной свеклы при дробном внесении БЭОФ в нормах расхода (1.0 + 1.3 + 1.5) л/га эффективность гибели сорняков составила 87%. Трехкомпонентные бетаналы-дженерики уступали на 15% в эффективности действия на сорную растительность оригинальному препарату в заявленных нормах расхода (табл. 2, вариант 4).

Таблица 2. Биологическая эффективность, остаточная засоренность и продуктивность сахарной свеклы в схемах гербицидов с применением бетаналов-дженериков в сравнении с оригинальным бетаналом БЭОФ

Вариант (кг/га, л/га)	Гибель сорняков на 15.07, %	Остаточная засоренность на 01.09, шт./м ²	Урожайность, т/га	Сахаристость, %	Сбор сахара, т/га
1.	1.5	174	17.3	19.2	3.32
2.	99	0.2	47.3	19.0	8.99
3.	87	4.6	43.8	18.9	8.28
4.	72	8.3	40.5	18.8	7.61
5.	79	6.4	42.2	18.8	7.93
6.	95	0.6	44.4	19.0	8.45
7.	99	0.3	46.4	18.9	8.77
8.	93	3.8	43.9	19.0	8.28
9.	96	0.7	45.8	18.7	8.57
НСР ₀₅			3.6	0.4	

Увеличение нормы расхода дженериков на 15–20% компенсировало дополнительные затраты на препарат повышением эффективности борьбы с сорняками на 7% и прибавкой урожая корнеплодов на 1.7 т/га (табл. 2, вариант 5). Вместе с тем результаты исследования свидетельствовали о недостаточной чистоте посева сахарной свеклы при внесении лишь гербицидов группы бетаналов и прежде всего дженериковых препаратов даже в завышенных нормах расхода. Например, в контроле с ручной прополкой урожайность корнеплодов составила 47.3 т/га, в варианте с применением оригинального препарата БЭОФ, 1.0 л/га из-за остаточной засоренности посева – 43.8 т/га, в варианте с бетаналами-дженериками в этой же норме расхода – 40.5 т/га, в варианте с скорректированной нормой расхода бетаналов-дженериков – 42.2 т/га. В вариантах 3, 4 и 5 отмечена повышенная остаточная засоренность посева сахарной свеклы растениями ширицы запрокинутой и мари белой, заметно угнетенных гербицидами.

Чрезмерное завышение нормы расхода гербицидов группы бетаналов грозит повреждениями для растений сахарной свеклы и нежелательными воздействиями на окружающую среду. Поэтому в классических схемах борьбы с сорной растительностью помимо гербицидов группы бетаналов для усиления действия на двудольные сорняки в баковый раствор включали препараты других классов химических соединений, менее токсичных для сахарной свеклы и успешно применяемых в борьбе с отдельными группами трудноискоренимых сорняков.

Наиболее ощутимые результаты дало применение комбинации препаратов, где увеличение эффективности смеси на сорняки достигали химическим взаимодействием действующих веществ бетаналов-дженериков с менее токсичными для сахарной свеклы гербицидами на основе трифлусульфурон-метила и метамитрона.

Смесь БЭОФ с Митроном, примененная трехкратно в рекомендованных нормах расхода в соответствие с фазой развития сахарной свеклы, обеспечивала высокую чистоту посева с низкой остаточной засоренностью в конце вегетации культуры. Урожайность корнеплодов в варианте 6 достигала уровня контроля с ручной прополкой. Дополнение этой схемы препаратом Карибу по 20 г/га (трехкратно) обеспечивало полную чистоту посева сахарной свеклы (99% гибели сорняков). Схема применения гербицидов помимо широколистных двудольных сорняков хорошо подавляла молодые растения осотов и вьюнка полевого. Расчетный сбор сахара в варианте 7 был на уровне контроля с ручной прополкой – 8.77 против 8.99 т/га в контроле.

Применение страховых гербицидов в комбинации с бетаналами-дженериками активизировало и усиливало действие последних, т.к. эффективность

смеси заметно возрастала и позволяла решить все проблемы с сорняками в посеве сахарной свеклы как на уровне применения схем с оригинальным препаратом БЭОФ, так и на уровне контроля с ручной прополкой. Особенно близкие результаты урожайности и расчетному сбору сахара с полотым контролем получены в варианте 9, где применили смесь страховых гербицидов Митрона с Карибу в комбинации с дженериковыми бетаналами.

Таким образом, страховые гербициды Митрон и Карибу нивелировали недостатки дженериковых бетаналов при их совместном применении в борьбе с сорной растительностью в посеве сахарной свеклы. Главным достоинством дженериковых бетаналов является их низкая цена, что позволяет значительно сэкономить средства сельхозпроизводителей.

ВЫВОДЫ

1. В полевых условиях ярко проявлялась метеозависимость действия гербицидов группы бетанала на растения. Испытанные бетаналы-дженерики в норме расхода 1.0 л/га уступали в эффективности действия на сорную растительность оригинальному гербициду БЭОФ, 1.0 л/га при расходе рабочей жидкости 250 л/га особенно в условиях критических температур для роста и развития растений. При температурах воздуха <15°C резко снижалась эффективность бетаналов-дженериков, увеличивался период летального действия на сорняки из-за снижения активности обменных процессов в растениях. При температуре >25°C заметнее уменьшалась миграционная способность бетаналов-дженериков, появлялась опасность усиления их контактного действия на растения, в результате чего эффективность гербицидов снижалась. В диапазоне температур 19–22°C эффективность дженериковых бетаналов была наиболее близка эффективности оригинала БЭОФ.

2. Стабильность разбавленных эмульсий гербицидов группы бетаналов в значительной степени определялась скоростью кристаллизации действующих веществ. Гербицид БЭОФ отличался от испытанных бетаналов-дженериков низкой скоростью образования кристаллов при любых концентрациях рабочего раствора в пределах рекомендованных норм расхода препарата. Дженериковые бетаналы характеризовались повышенной скоростью кристаллизации, которая заметно варьировала у разных препаратов, особенно в растворах с низкой нормой расхода действующего вещества. В случае задержки применения рабочего раствора на культуре биологическая активность гербицидов на сорный компонент снижалась вследствие нарастания крупных кристаллов, которые не способны проникать в ткань растений. Щелочная среда заметно снижала эффективность

действия гербицидов группы бетаналов на сорняки. В благоприятной для реализации активности гербицидов кислой среде (рН 5.0–6.0) эффективность БЭОФ была больше на 5–6%, чем бетаналов-дженериков. В щелочной среде (рН 8.5–9.0) различия в эффективности гибели сорняков между БЭОФ и бетаналами-дженериками возросли до 9–14%. Отмечен более высокий рост кристаллов действующих веществ в щелочной среде, особенно в растворах бетаналов-дженериков.

3. Физико-химические особенности препарата оказывали большое влияние на хозяйственные показатели — эффективность и качество примененного гербицида при разных условиях погоды. Благодаря формуляции БЭОФ, где использовано сочетание специфических производных растительного масла с другими компонентами, обеспечивалось создание пленки, которая дольше удерживалась на поверхности листьев и поддерживала наиболее высокий уровень контроля над сорняками в условиях переменной погоды с ранним выпадением осадков после внесения раствора гербицида. Гербициды бетаналы-дженерики легче смывались с листьев растений в опытах с искусственным дождеванием в течение 4-х ч после внесения препарата. Эффективность действия на сорняки БЭОФ в этот период времени была больше, чем дженериков, в 2 раза.

4. Потенциал летального действия БЭОФ на сорняки в норме расхода 1.0 л/га был больше, чем бетаналов-дженериков в этой же норме расхода. Сорняки, сформировавшие 2 настоящих листа, заметнее проявляли фазовую устойчивость к дженериковым бетаналам. При обработке сорняков в возрасте семядолей эффективность БЭОФ была больше, чем дженериков, на 6–8%, при обработке сорняков в фазе 2-х настоящих листьев — на 18%. Из-за неоднородности развития сорняков период летального действия на них дженериковых бетаналов увеличивался на 2–4 сут. Для равноценной эффективности действия на сорную растительность с оригинальным препаратом БЭОФ, 1.0 л/га норму расхода бетаналов-дженериков увеличивали на 15–20%.

5. Смесь бетанала-дженерика со страховыми гербицидами Митроном и Карибу, примененная трехкратно в рекомендованных нормах расхода в соответствии с фазой развития сахарной свеклы, обеспечивала высокую чистоту посева (99%) с низкой остаточной засоренностью в конце вегетации культуры (0.3 шт./м²). Схема применения гербицидов помимо широколистных двудольных сорняков хорошо подавляла молодые растения осотов и вьюнка полевого.

6. Урожайность корнеплодов в варианте с применением бетанала-дженерика в комбинации с Митроном и Карибу была на уровне контроля с ручной прополкой. Расчетный сбор сахара в варианте

составил 8.57 т/га против 8.99 т/га в контроле с ручной прополкой и 8.77 т/га — в варианте с применением БЭОФ со страховыми гербицидами. Страховые гербициды Митрон и Карибу нивелировали недостатки дженериковых бетаналов при совместном применении в борьбе с сорной растительностью в посеве сахарной свеклы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуреев И.И. Эффективность обработки сахарной свеклы гербицидами группы бетанала — оригинальными и дженериками // Сахар. 2016. № 9. С. 17–19.
2. Чернышова Е., Трофимов А. Под защитой. Как избежать ошибок при выборе СЗР // Агротехника и технологии. 2019. № 3–4.
3. Гаджиева Г.И. Эффективность гербицида кианит, кэ в посевах сахарной свеклы // Актуальные проблемы в защите растений. Мат-лы Международ. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию кафедры защиты растений (г. Горки, 23–25 июня 2010 г.). С. 76–79.
4. Дворянкин Е.А. Отдельные физико-химические показатели гербицидов группы бетанала // Сахар. свекла. 2012. № 6. С. 35–37.
5. Дворянкин Е.А. Оптимизация возделывания сахарной свеклы. Воронеж, 2019. 252 с.
6. Дворянкин Е.А. Качество и эффективность рабочих растворов гербицидов группы бетанала // Сахар. свекла. 2013. № 8. С. 33–38.
7. Дворянкин Е.А. Эффективность действия свекловичных гербицидов на сорную растительность в посеве сахарной свеклы в зависимости от величины рН используемой воды и ее загрязненности бытовыми моющими средствами // Агрохимия. 2022. № 8. С. 33–43.
8. Дворянкин Е.А. Эффективность гербицидов в борьбе с сорняками и их фитотоксичность для сахарной свеклы в зависимости от возраста обрабатываемых растений и нормы расхода препаратов // Агрохимия. 2023. № 3. С. 70–81.
9. Паденов К.П., Довбан В.К. Сорные растения, их вредоносность, методы учета и меры борьбы. Минск, 1979. 55 с.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.
11. Международный кодекс поведения в области распределения и использования пестицидов. Рук-во по контролю за качеством пестицидов. 2-я редакция. World Health Organization. 2012. 43 с.
12. Дворянкин Е.А. Коррекция рН баковых растворов гербицидов группы бетаналов и эффективность их действия на сорняки в посеве сахарной свеклы // Сахар. 2021. № 7. С. 24–26.

Significance of Insuring Herbicides for Stabilization of Weed Control Effectiveness and Quality when Using Betanals-Generics for Sugar Beet

E. A. Dvoryankin[#]

*A. L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar,
VNIIS86, Ramonsky district, Voronezh region 396030, Russia*

[#]*E-mail: dvoryankin149@gmail.com*

In the field in 2014–2020, three-component herbicides of betanal generics were tested against juvenile dicotyledonous weeds in sugar beet crops to compare with the effectiveness of the use of the original herbicide Betanal Expert OF (BEOF) at application rate of 1.0 l/ha. It is shown that the stability of dilute emulsions of generic betanals depended on the characteristics of the structure and dispersion of working solutions, the ability to crystallize active substances, and reactions to various environmental conditions. The BEOF herbicide in the application rate of 1.0 l/ha differed from generic betanals in the same application rate by a higher effect on weeds. The weeds that formed 2 real leaves showed phase resistance to generic betanals more noticeably. The effectiveness of BEOF on weeds in the cotyledon phase was 6–8% higher than that of generics, and 18% higher when treating weeds in the phase of 2 real leaves. It was found that in the temperature range of 19–22°C, the efficiency of generic betanals was closest to the efficiency of the original BEOF. To stabilize the generic betanals efficacy on weeds with the original BEOF 1.0 l/ha, their application rate was increased by 15–20%. A mixture of generic betanals with the insurance herbicides Mitron and Caribou, applied 3 times in the recommended application rates in accordance with the phase of development of sugar beet, provided high purity of sowing and crop yield at the level of the control group with manual weeding. Herbicides, in addition to broad-leaved dicotyledonous weeds, effectively suppressed young plants of aspens and field bindweed. The insurance herbicides Mitron and Caribou offset the disadvantages of generic betanals when used together in the fight against weeds in sugar beet crops.

Keywords: sugar beet, herbicides, weeds, efficiency, phytotoxicity, productivity.

УДК: 631.82:58.036:633.15:631.559(470.55/.58)

ВЛИЯНИЕ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТРЕССА НА УРОЖАЙНОСТЬ КУКУРУЗЫ НА СИЛОС В СТЕПНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО УРАЛА[§]

© 2024 г. В. Ю. Скороходов*

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН
460000 Оренбург, ул. 9 Января, 29, Россия***E-mail: skorohodov.vitali1975@mail.ru*

В современном земледелии Южного Урала важным агрономическим приемом является противодействие засухе. Особое значение в увеличении кормовой базы имеет возделывание кукурузы на силос, обеспечивающей максимальные урожаи в экстремальных условиях. Целью исследования было определение потенциальных возможностей увеличения урожайности зеленой массы кукурузы на силос при влиянии температурного стресса в сопряжении с пролонгированным действием минеральных удобрений и предшественников в засушливых условиях. Исследование выполнено в центральной зоне Оренбургской обл. с 1993 по 2022 г. на стационарном участке, почва которого относится к черноземам южным карбонатным тяжелосуглинистым с содержанием гумуса 3.2–4.0%. Эксперимент проводили при внесении минеральных удобрений и без них. Содержание в почве нитратного азота определяли ионометрическим методом по Тюрину, подвижного фосфора – по Мачигину, обменного калия – по Масловой. Для определения влажности почвы использовали термостатно-весовой метод. В среднем за 30 лет исследования при возделывании кукурузы на силос в 6-польном севообороте отмечали прибавку урожайности при использовании минеральных удобрений от 0.23 до 0.84 т/га. Ежегодное внесение минеральных удобрений в бессменном посеве кукурузы обеспечивало прибавку урожайности зеленой массы 2.51 т/га. В годы с сильной засушливостью урожайность листостебельной массы на удобренном фоне снижалась в среднем на 1.61 т/га. В очень засушливые годы растения кукурузы потребляли меньше нитратного азота (в 2 и более раза), чем в различные по влажности годы, но при этом возрастало потребление калия.

Ключевые слова: кукуруза на силос, урожайность, минеральные удобрения, температурный стресс, предшественники, бессменный посев, занятый пар, севооборот.

DOI: 10.31857/S0002188124060088, **EDN:** CXFEAQ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых сложных проблем в современном земледелии Южного Урала является противодействие засухе [1]. В засушливых условиях Южного Урала при недостаточном количестве продуктивной влаги в период вегетации сельскохозяйственных культур, особое значение для увеличения кормовой базы имеет возделывание кукурузы на силос, обеспечивающего максимальные урожаи в экстремальных условиях [2].

В рационе сельскохозяйственных животных значительную долю составляет кукуруза, в том

числе в виде кукурузного силоса. Кукуруза является источником легкодоступной энергии, имеет наибольший суточный прирост органической массы, что делает ее непревзойденной по продуктивности культурой [3]. Кукуруза является высокоурожайной культурой разностороннего использования. В Оренбургской обл. кукурузу возделывают в основном на корм. В 100 кг зеленой листостебельной массы кукурузы в фазе молочно-восковой спелости початков содержится 20 к.е. и 1.5 кг переваримого протеина [4, 5]. Теплолюбивая культура кукурузы начинает прорастать при прогревании почвы до 8–10°C, при этом отмечен замедленный рост и, как следствие, поражение болезнями. Оптимальная температура почвы для всходов кукурузы в полевых условиях – 10–12°C с последующим нарастанием. Для создания единицы сухого

[§] Исследование выполнено в ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН в соответствии с планом НИР на 2022–2024 гг. (FNWZ-2022-0014).

вещества кукурузе требуется меньше влаги в сравнении с пшеницей, овсом и ячменем (транспирационный коэффициент кукурузы – 230–370, пшеницы – 410–420, овса – 460–475, ячменя – 405–410). При этом ввиду высокой урожайности культуры требуется больше влаги на единицу площади [6–8].

Биологические особенности кукурузы и интенсивность развития ее корневой системы обуславливают высокую устойчивость кукурузы к засухе. В первой половине вегетации кукурузы отмечают активный рост корневой системы, когда в верхнем слое почвы содержится достаточно высокое количество влаги. Во второй половине вегетации, как правило, наступают экстремальные условия, и растения за счет хорошо развитых корней обеспечиваются влагой из низлежащих, более увлажненных почвенных слоев [9, 10].

По данным Оренбургского НИИСХ, средняя урожайность зеленой массы кукурузы за 30 лет исследования (1990–2019 гг.) в севообороте составила 22.6, в бессменных посевах – 20.8 т/га (т.е. практически была одинаковой) [11].

Также необходимо отметить, что зависимость роста урожайности от удобрения определяется не только количеством осадков, но и дозой азота [12], и что минеральные удобрения, особенно в высоких дозах, в севообороте и в посевах бессменной кукурузы способствуют подкислению почвы [13, 14]. Цель работы – определить потенциал возможностей увеличения урожайности зеленой массы кукурузы на силос при влиянии температурного стресса и пролонгированном действии минеральных удобрений и предшественников в севообороте в условиях степной зоны Южного Урала.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проводили в центральной зоне Оренбургской обл., вблизи с. Нежинка, на стационарном опытном (богарном) участке с 1993 по 2022 г. Координаты расположения опытного стационара – 51.775125° с.ш., 55.306547° в.д. Почва стационара относится к черноземам южным карбонатным среднесильным тяжелосуглинистым с содержанием в ней гумуса 3.2–4.0% (в пахотном слое 0–30 см почвы), общего азота – 0.2–0.3%, доступного фосфора – 150–250, обменного калия – 300–380 мг/кг почвы и рН 7.0–8.1.

Схема эксперимента состояла из 6-ти вариантов, в которых кукурузу на силос возделывали в 4-х 6-польных севооборотах (четвертым полем в севообороте), в 2-польном (при чередовании с яровой твердой пшеницей) и в бессменной культуре с 1993 по 2022 г. (табл. 1).

Схема опыта имела вид: 2А × 6В, где А – фон почвенного питания (внесение N40P80K40 и без удобрения) и В – вариант предшественника (севооборот, бессменный посев).

Предшественником посевов кукурузы на силос в 6-польных севооборотах выступала яровая твердая пшеница (после озимой ржи) и яровая мягкая пшеница (после твердой пшеницы с разными видами пара); в двупольном севообороте – чередование с твердой пшеницей. Размеры опытных делянок в 6-польном севообороте – 3.6 × 90 м, из которых 3.6 × 30 м – удобренный фон, 3.6 × 60 м – неудобренный. В 2-польном севообороте и в бессменном посеве кукурузы на силос ширина делянок составляла 7.2 м при той же длине, что и в 6-польных севооборотах.

Таблица 1. Схема опыта при возделывании кукурузы на силос в системе 2-, 6-польного севооборотов и в бессменном посеве

Севооборот, бессменная культура	Номер поля					
	1	2	3	4	5	6
	Культура, пар					
Шестипольный севооборот	пар черный	озимая рожь	твердая пшеница	кукуруза на силос вариант 1	мягкая пшеница	ячмень
	пар черный	твердая пшеница	мягкая пшеница	кукуруза на силос, вариант 2	мягкая пшеница	ячмень
	пар почвозащитный	твердая пшеница	мягкая пшеница	кукуруза на силос, вариант 3	мягкая пшеница	ячмень
	пар занятый сидеральный	твердая пшеница	мягкая пшеница	кукуруза на силос, вариант 4	мягкая пшеница	ячмень
Двупольный севооборот	твердая пшеница	кукуруза на силос, вариант 5	твердая пшеница	кукуруза на силос	твердая пшеница	кукуруза на силос
Бессменный посев	кукуруза на силос, вариант 6	твердая пшеница (вариант 6)		—		

Учет продуктивности кукурузы на силос проводили в период молочно-восковой спелости зерна. На удобренном фоне (по длине делянки 30 м) срезали 2 ряда растений кукурузы, на неудобренном (длина делянки 60 м) — один рядок. Срезанную зеленую массу кукурузы взвешивали на площадочных весах и путем математического расчета приводили к урожайности с 1 га. Технология возделывания кукурузы на силос — принятая для условий Оренбургской обл. При закладке полевых опытов использовали методику Б.А. Доспехова. Опытные делянки располагались систематически в 4-х повторностях во времени и пространстве. Содержание в почве нитратного азота определяли ионометрическим методом по Тюрину, подвижного фосфора — по Мачигину, обменного калия — по Масловой. Для определения влажности почвы использовали термостатно-весовой метод. Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Stastica 12.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены показатели гидротермического коэффициента (ГТК) по месяцам в годы исследования (с 1993 по 2022 г.), а также ГТК в целом

за вегетационный период года с характеристикой его засушливости по шкале Селянинова. Исходя из этой шкалы, 18 лет из 30-ти отнесены к очень засушливым, когда ГТК <0.6, что составило 60% из всех лет исследования. Незначительно засушливые (ГТК >0.8) вегетационные периоды отмечены в 1993, 1994, 1997, 2000, 2003, 2013 и 2022 гг. (23% из всех лет исследования).

Многолетнее исследование формирования продуктивности листостебельной массы кукурузы было разделено на 2 кластера в зависимости от различий погодно-климатических условий. Первая группа представляла весь период исследования, включавший погодные условия влажных и очень засушливых лет (за 1993–2022 гг.). Второй кластер представлял ряд очень засушливых лет за весь период наблюдений. Большой интерес для науки представляет возможность формирования продуктивности культуры (в нашем случае — кукурузы на силос) в условиях температурного стресса в отсутствии или при небольшом количестве атмосферных осадков и при использовании растениями минеральных удобрений.

Наибольшая урожайность кукурузы на силос без применения минеральных удобрений была получена в варианте возделывания культуры в 6-польном

Таблица 2. Гидротермический коэффициент и характеристика вегетационных периодов (1993–2022 гг.)

Период вегетации полевых культур, месяц		Время эксперимента, годы														
		1993	1994	1995*	1996*	1997	1998*	1999	2000	2001*	2002*	2003	2004*	2005*	2006	2007
ГТК	05	0.24	0.63	0.09	0.61	1.16	0	1.51	2.48	0.29	0.65	1.47	0.24	0.24	0.79	1.05
	06	0.73	1.55	0.28	0.64	0.87	0.26	0.43	2.26	1.01	0.85	1.57	0.72	0.64	0.38	0.57
	07	1.38	2.49	0.42	0.06	1.70	0.16	0.39	1.12	0	0	1.11	0.62	0.79	1.08	1.39
	08	0.67	0.47	0.24	0.16	0.12	0.35	0.11	0.18	0.23	0.35	0.22	0.48	0.11	0.27	0
	май–август	<u>0.81</u> I	<u>1.30</u> I	<u>0.28</u> III	<u>0.35</u> III	<u>0.96</u> I	<u>0.21</u> III	<u>0.61</u> II	<u>1.52</u> I	<u>0.38</u> III	<u>0.46</u> III	<u>1.09</u> I	<u>0.52</u> III	<u>0.45</u> III	<u>0.63</u> II	<u>0.75</u> II
		2008	2009*	2010*	2011*	2012	2013	2014*	2015*	2016*	2017*	2018*	2019	2020*	2021*	2022
ГТК	05	1.21	0.75	0.02	0.95	0.35	0.20	0.14	0.11	0.99	0.74	0.58	0.80	0.55	0.62	2.80
	06	0.51	0.29	0.01	0.67	0.59	0.36	0.64	0.27	0.22	0.71	0.34	0.60	0.36	0.53	0.40
	07	0.68	0.20	0.13	0.35	0.31	1.06	0.08	0.44	0.31	0.48	0.25	0.59	0.09	0.61	0.76
	08	0.40	1.02	0.44	0.39	0.10	1.67	0.13	0.47	0.03	0.06	0.16	0.58	0.19	0.42	0
	май–август	<u>0.70</u> II	<u>0.57</u> III	<u>0.15</u> III	<u>0.59</u> III	<u>0.34</u> III	<u>0.82</u> I	<u>0.25</u> III	<u>0.32</u> III	<u>0.39</u> III	<u>0.50</u> III	<u>0.33</u> III	<u>0.64</u> II	<u>0.30</u> III	<u>0.55</u> III	<u>0.99</u> I

Примечание. Над чертой — показатель ГТК, под чертой — характеристика вегетационного периода (I — незначительно засушливый, ГТК >0.8; II — засушливый, ГТК = 0.6–0.8; III — очень засушливый, ГТК <0.6); *очень засушливый год.

севообороте с занятым сидератами паром и составила в среднем за 30 лет исследования 13.5 т/га (табл. 3). При применении минеральных удобрений максимальная урожайность кукурузной массы была получена в 6-польном севообороте с занятым суданской травой паром (14.3 т/га).

Посевы кукурузы на силос положительно реагировали на применение минеральных удобрений. В среднем за 30 лет исследования при возделывании кукурузы на силос в 6-польном севообороте отмечали прибавку урожайности при применении минеральных удобрений от 0.2 до 0.8 т/га. Ежегодное внесение минеральных удобрений в бессменном посеве кукурузы на силос приводило к прибавке урожайности зеленой массы 2.5 т/га. В 2-польном севообороте урожайность кукурузы снижалась на 0.4 т/га на удобренном фоне. Данное обстоятельство, отмеченное в этом севообороте, объясняется большей засоренностью предшественника на удобренном фоне и выносом питательных веществ не культурой, а сегетальной растительностью. Максимальное пролонгированное действие

минеральных удобрений отмечено в 6-польном севообороте с занятым суданской травой паром (прибавка составила 0.8 т/га). В очень засушливые годы урожайность кукурузы на силос снижалась. В среднем на фоне без удобрений она составила в вариантах от 11.1 до 12.4 т/га. Влияние температурного стресса в засушливые годы проявлялось меньшей прибавкой урожайности культуры при применении минеральных удобрений. Например, прибавка урожайности зеленой массы кукурузы в 6-польном севообороте с занятым суданской травой паром составила 0.1 т/га, что было меньше по сравнению со средней прибавкой, полученной за все годы исследования. Запаханная сидеральная масса в 6-польном севообороте оказывала положительное влияние на продуктивность кукурузы, особенно в острозасушливые годы. В этом варианте в острозасушливые годы прибавка урожайности на удобренном фоне составила 0.5 т/га.

В годы с сильной засушливостью растения кукурузы подвергались различным стрессам. Данное обстоятельство в нашем опыте наблюдали

Таблица 3. Урожайность зеленой массы кукурузы (среднее за 1993–2022 г. и за очень засушливые годы)

Предшественник, севооборот	Показатель	Урожайность зеленой массы кукурузы, т/га					
		средняя за 1993–2022 гг.			средняя за очень засушливые годы		
		фон		прибавка	фон		прибавка
		удобренный	неудобренный		удобренный	неудобренный	
Яровая твердая пшеница в севообороте с озимыми зерновыми	Урожайность, т з.м./га*	13.6 ± 6.4	13.1 ± 5.4	+0.5	10.8 ± 5.3	11.7 ± 4.5	–0.9
	<i>HCP</i> ₀₅	2.7	2.3		2.6	2.3	
Яровая мягкая пшеница в севообороте с черным паром	*	13.9 ± 6.1	13.4 ± 5.6	+0.5	11.7 ± 4.3	11.2 ± 4.1	+0.5
	<i>HCP</i> ₀₅	2.6	2.4		2.2	2.1	
Яровая мягкая пшеница в севообороте с занятым суданской травой паром	Урожайность, т з.м./га	14.3 ± 6.7	13.4 ± 5.6	+0.9	12.5 ± 5.7	12.4 ± 5.4	+0.1
	<i>HCP</i> ₀₅	2.8	2.3		2.9	2.3	
Яровая мягкая пшеница в севообороте с сидеральным паром	Урожайность, т з.м./га	13.8 ± 5.4	13.5 ± 5.8	+0.3	12.5 ± 5.1	12.0 ± 4.5	+0.5
	<i>HCP</i> ₀₅	2.3	2.4		2.6	2.3	
Яровая твердая пшеница в 2-польном севообороте	Урожайность, т з.м./га	12.3 ± 5.6	12.7 ± 5.1	–0.4	10.7 ± 4.1	11.1 ± 3.6	–0.4
	<i>HCP</i> ₀₅	2.4	2.2		2.1	1.8	
Бессменный посев кукурузы на силос	Урожайность, т з.м./га	13.7 ± 5.8	11.2 ± 5.5	+2.5	12.1 ± 5.2	11.1 ± 4.3	+1.0
	<i>HCP</i> ₀₅	2.4	2.3		2.6	2.2	

* з.м. — зеленая масса.

Таблица 4. Влажность почвы под посевами кукурузы в 6-, 2-польном севооборотах и в бессменной культуре в период ее посева и уборки (среднее за 1993–2022 гг. и очень засушливые годы), мм

Период исследования, годы	Время года	Предшественник кукурузы					
		яровая твердая пшеница в 6-польном севообороте с озимыми культурами		яровая твердая пшеница в 2-польном севообороте		бессменный посев кукурузы на силос	
		слой почвы, см					
		0–30	0–100	0–30	0–100	0–30	0–100
1993–2022 гг.	Весна	42.2 ± 14.8	147.7 ± 34.6	39.5 ± 8.9	130.4 ± 34.9	35.6 ± 10.3	130.0 ± 29.5
	Осень	14.5 ± 9.4	57.5 ± 23.5	13.4 ± 11.9	49.8 ± 35.0	15.0 ± 12.0	49.3 ± 26.9
	Расход	–27.7	90.2	–26.1	–80.6	–20.6	–80.7
Очень засушли- вые годы	Весна	41.1 ± 15.9	131.9 ± 39.3	37.7 ± 9.7	75.5 ± 34.5	33.4 ± 8.8	124.3 ± 26.94
	Осень	11.3 ± 5.3	51.0 ± 20.1	10.1 ± 8.0	41.7 ± 31.2	11.7 ± 7.5	41.4 ± 23.0
	Расход	–29.8	–80.9	–27.6	–33.8	–21.7	–82.9

в бессменных посевах кукурузы. В засушливые годы урожайность листостебельной массы культуры на удобренном минеральными удобрениями фоне снижалась в среднем на 1.6 т/га. В связи с этим уменьшалась эффективность минеральных удобрений в засушливые годы, и прибавка урожайности при их применении составляла 1.9 т/га за весь срок исследования, при учете влажных лет она составляла 2.5 т/га.

Возделывание кукурузы после твердой пшеницы в 6-польном и 2-польном севооборотах на удобренном фоне приводило к отрицательному эффекту в очень засушливые годы. Повышение урожайности культуры на фоне без удобрений составляло в 6-польном севообороте 0.9, в 2-польном – 0.4 т/га. Помимо температурного стресса растения кукурузы испытывали и водный стресс. Например, весной в 1-метровом слое почвы в очень засушливые годы запас продуктивной влаги в 2-польном севообороте (после яровой твердой пшеницы) был равен 75.5 мм, что составляло 57.9%

от средних показателей во все годы исследования (130.4 мм) (табл. 4).

В бессменных посевах кукурузы на силос была отмечена небольшая разница (5.7 мм) между запасами продуктивной влаги в разные годы исследования.

В табл. 5 представлено содержание макроэлементов в почве под посевами кукурузы на силос в среднем за весь период исследований и за очень засушливые годы. Под пропашной культурой кукурузы во все годы исследования, включая и очень засушливые, отмечали увеличение содержания нитратного азота в течение летнего периода.

В очень засушливые годы растения кукурузы потребляли меньше нитратного азота (в 2 и более раза), чем в различные по влажности годы. Данное обстоятельство подтверждено нашими исследованиями при возделывании кукурузы в 6-, 2-польном севооборотах и в бессменном посеве на двух фонах почвенного питания. При возделывании кукурузы на силос в 6-польном севообороте в годы

Таблица 5. Содержание макроэлементов под посевами кукурузы на силос при возделывании в 6-, 2-польном севооборотах и в бессменном посеве на двух фонах почвенного питания (среднее за 1993–2022 гг. и за очень засушливые годы), мг/кг почвы

Периоды исследования, годы	Фон питания	Время года	Предшественник кукурузы								
			яровая твердая пшеница в 6-польном севообороте с озимыми			яровая твердая пшеница в 2-польном севообороте			бессменный посев кукурузы на силос		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K
1993–2022	Удобрённый	Весна	91.5 ± ± 75.6	58.5 ± ± 14.3	458 ± ± 85.1	93.9 ± ± 52.1	56.9 ± ± 16.9	401 ± ± 60.8	84.7 ± ± 50.2	51.4 ± ± 13.1	352 ± ± 73.6
		Осень	93.9 ± ± 55.5	53.6 ± ± 12.9	439 ± ± 88.1	110 ± ± 103	50.6 ± ± 13.2	368 ± ± 59.1	101 ± ± 90.4	48.3 ± ± 12.5	331 ± ± 82.5
		Расход	+2.4	–4.9	–19.5	+15.7	–6.3	–33.1	+16.0	–3.1	–20.5

Окончание таблицы 5

Периоды исследования, годы	Фон питания	Время года	Предшественник кукурузы								
			яровая твердая пшеница в 6-польном севообороте с озимыми			яровая твердая пшеница в 2-польном севообороте			бессменный посев кукурузы на силос		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K
1993–2022 Очень засушливые годы	Неудобренный	Весна	62.6 ± ± 30.5	41.2 ± ± 10.7	417.4 ± ± 91.6	77.6 ± ± 39.2	38.3 ± ± 11.4	381.5 ± ± 56.9	77.5 ± ± 39.2	35.7 ± ± 11.3	345.4 ± ± 64.9
		Осень	89.3 ± ± 59.5	40.1 ± ± 10.5	403 ± ± 94.2	93.0 ± ± 79.9	39.4 ± ± 9.6	360 ± ± 65.6	85.4 ± ± 71.6	38.6 ± ± 12.7	318 ± ± 61.9
		Расход	+26.7	–1.1	–14.7	+15.4	+1.1	–21.4	+7.9	+2.9	–27.7
	Удобренный	Весна	96.1 ± ± 76.7	57.8 ± ± 15.8	459 ± ± 66.6	88.9 ± ± 40.2	59.7 ± ± 15.7	409 ± ± 50.0	77.5 ± ± 30.4	53.6 ± ± 14.0	357 ± ± 61.2
		Осень	102 ± ± 62.9	55.1 ± ± 15.2	420 ± ± 68.1	128 ± ± 115	51.8 ± ± 15.5	370 ± ± 57.3	112 ± ± 79.2	50.7 ± ± 13.7	335 ± ± 80.9
		Расход	+5.8	–2.7	–38.8	+39.2	–7.9	–38.1	+34.3	–2.9	–22.0
	Неудобренный	Весна	64.2 ± ± 30.0	42.7 ± ± 12.1	409 ± ± 62.5	76.6 ± ± 35.3	40.8 ± ± 12.1	375 ± ± 46.0	76.9 ± ± 32.6	39.2 ± ± 11.8	354 ± ± 58.7
		Осень	106 ± ± 67.4	39.9 ± ± 9.2	377 ± ± 67.1	109 ± ± 86.5	40.3 ± ± 10.8	375 ± ± 69.3	100 ± ± 66.8	40.9 ± ± 14.6	334 ± ± 63.4
		Расход	+41.4	–2.8	–31.8	+32.1	–0.5	–0.7	+23.2	+1.7	–19.9

с сильной засушливостью в период с 1993 по 2022 г. культура не использовала 41.4% нитратного азота при внесении минеральных удобрений, что составило 5.8 мг/кг почвы. На неудобренном фоне не было востребовано 64.5% нитратного азота, т.е. к осени его количество увеличивалось до 41.4 мг/кг почвы в сравнении с содержанием весной. Возделывание кукурузы в 2-польном севообороте и бессменном посеве в условиях гидротермического стресса также приводило к накоплению и не использованию нитратного азота.

В годы с сильной засушливостью отмечали увеличение потребления калия растениями кукурузы. В 6-польном севообороте за вегетацию использовалось на удобренном фоне в среднем 38.8 мг калия/кг, на неудобренном — 31.8 мг/кг почвы.

ВЫВОДЫ

1. Посевы кукурузы на силос положительно реагировали на применение минеральных удобрений в условиях Южного Урала. В среднем за 30-летний период исследования при возделывании кукурузы на силос в 6-польном севообороте отмечали прибавку урожайности зеленой массы при внесении минеральных удобрений от 0.23 до 0.84 т з.м./га.

2. Влияние температурного стресса в засушливые годы проявлялось в меньшей прибавке урожайности культуры при применении минеральных удобрений. Например, прибавка урожайности зеленой массы кукурузы в 6-польном севообороте с занятым суданской травой паром составила 0.1 т/га., что было меньше по сравнению со средней прибавкой, полученной за все годы исследования.

3. В очень засушливые годы растения кукурузы потребляли меньше нитратного азота (в 2 и более раза), чем в различные по влажности годы. При этом температурный стресс стимулировал потребление калия растениями кукурузы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скороходов В.Ю. Урожайность кукурузы на силос в севооборотах и при бессменном возделывании в зависимости от предшественника на двух уровнях интенсификации в степной зоне Южного Урала // Изв. Оренбург. ГАУ. 2020. № 2(82). С. 68–72.

2. Скороходов В.Ю. Продуктивность звеньев севооборотов с кукурузой на силос и различными видами пара в условиях Оренбургского Предуралья // Изв. Оренбург. ГАУ. 2021. № 1(87). С. 78–85.

3. *Виноградов И.С., Лазарев Н.Н.* Комплексная оценка гибридов кукурузы для производства силоса // Кормопроизводство. 2023. № 1. С. 26–30.
4. *Пестерева Е.С., Павлова С.А., Захарова Г.Е., Кузьмина А.В., Жиркова Н.Н.* Урожайность и питательная ценность кукурузы и ее смесей для заготовки сочных кормов в условиях центральной Якутии // Аграрн. наука. 2018. № 9. С. 54–56.
5. *Аветисян А.Т., Данилов В.П., Мудрова В.Е.* Продуктивность кукурузы и основные приемы ее возделывания в условиях лесостепи Красноярского края // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2017. Т. 47. № 6. С. 57–65.
6. *Табаленкова Г.Н., Силина Е.В., Дымова О.В., Далькэ И.В., Головки Т.К.* Формирование урожая и качество зеленой массы кукурузы в условиях центрального агроклиматического района Республики Коми // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2021. Т. 22. № 5. С. 689–697.
7. *Головки Т.К., Далькэ И.В., Шморгунов Г.Т., Триандафилов А.В., Тулинов А.Г.* Рост растений и продуктивность кукурузы в холодном климате // Рос. сел.-хоз. наука. 2019. № 2. С. 19–23.
8. *Демин Е.А., Еремина Д.В.* Влияние минеральных удобрений и сроков посева на урожайность зеленой массы кукурузы в лесостепной зоне Зауралья // Вестн. Крас. ГАУ. 2020. № 10. С. 27–33.
9. *Табаленкова Г.Н., Дымова О.В., Головки Т.К.* Продуктивность и состав биомассы кукурузы в условиях центрального агроклиматического района Республики Коми // Аграрн. вестн. Урала. 2020. Т. 194. № 3. С. 57–65.
10. *Цимбаленко И.Н., Гилев С.Д., Копылов А.Н., Ефремов В.П., Лопарева Е.И.* Скороспелая кукуруза — важный резерв системы кормопроизводства засушливого Зауралья // Кормопроизводство. 2022. № 5. С. 8–13.
11. *Скорыходов В.Ю., Кафтан Ю.В.* Продуктивность севооборотов с кукурузой на силос и их экономическая эффективность в степной зоне Южного Урала // Вестн. мясн. скот-ва. 2016. № 4(96). С. 165–170.
12. *Багринцева В.Н., Ивашенко И.Н.* Влияние погодных условий в Ставропольском крае на эффективность доз азотного удобрения на кукурузе // Агрохимия. 2020. № 2. С. 77–83.
13. *Фролова Л.Д., Новиков М.Н.* Биологизация земледелия как фактор оптимизации кормовых севооборотов с кукурузой в Нечерноземной зоне // Агрохимия. 2020. № 4. С. 13–18.
14. *Сидоров А.В., Моисеев А.А., Ивойлов А.В.* Влияние минеральных удобрений на химический состав зерна кукурузы и вынос основных элементов питания в условиях лесостепи Среднего Поволжья // Агрохимия. 2020. № 9. С. 18–23.

Effect of Prolonged Action of Mineral Fertilizers under Conditions of Temperature Stress on Silage Maize Yield in the Steppe Zone of the Southern Urals

V. Yu. Skorokhodov[#]

*Federal Scientific Center for Biological Systems and Agricultural Technologies of the RAS,
ul. January-9 29, Orenburg 460000, Russia*

[#]*E-mail: skorokhodov.vitali1975@mail.ru*

In modern agriculture in the Southern Urals, an important agronomic technique is to counteract drought. Of particular importance in increasing the feed base is the cultivation of maize for silage, which ensures maximum yields in extreme conditions. The aim of the study was to determine the potential possibilities of increasing the yield of green mass of maize for silage under the influence of temperature stress in conjunction with the prolonged action of mineral fertilizers and precursors in arid conditions. The study was carried out in the central zone of the Orenburg region from 1993 to 2022 on a stationary site with the southern carbonate heavy loamy chernozem soils with a humus content of 3.2–4.0%. The experiment was carried out with and without mineral fertilizers. The content of nitrate nitrogen in the soil was determined by the ionometric method of Tyurin, mobile phosphorus — by Machigin, exchangeable potassium — by Maslova. A thermostatic-weight method was used to determine soil moisture. On average, over 30 years of research, when cultivating maize for silage in a 6-field crop rotation, an increase in yield was noted with the use of mineral fertilizers from 0.23 to 0.84 t/ha. The annual application of mineral fertilizers in permanent sowing of maize provided an increase in the yield of green mass of 2.51 t/ha. In years with severe aridity, the yield of leaf-stem mass on a fertilized background decreased by an average of 1.61 t/ha. In very dry years, maize plants consumed less nitrate nitrogen (by 2 or more times) than in years with different humidity, but at the same time, potassium consumption increased.

Keywords: maize for silage, yield, mineral fertilizers, temperature stress, precursors, permanent sowing, fallow land, turnover.

УДК 631.46:632.122.2:631.445(479.24)

СКРИНИНГ АКТИВНЫХ НЕФТЕДЕСТРУКТОРОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ЗОН ГОРОДСКИХ ПОЧВ (НА ПРИМЕРЕ Г. БАКУ)

© 2024 г. С. И. Наджафова^{1,*}, Н. М. Исмаилов¹¹Институт микробиологии министерства науки и образования Азербайджана
AZ 1004 Баку, ул. М. Мушвига, 103, Азербайджан

*E-mail: nadjafovas@yahoo.com

Провели скрининг активных культур углеводородразлагающих микроорганизмов из почв различных функциональных зон г. Баку. Показано, что выделенные в результате непрерывного скрининга 15 культур углеводородразлагающих микроорганизмов относились к родам *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Mycobacterium*, *Actinomyces*, *Arthrobacter*, *Micrococcus* и были способны использовать различные углеводороды (сырую нефть, парафиновые и ароматические углеводороды и нефтепродукты) в качестве единственного источника углерода и энергии. По степени разлагаемости нефтяные углеводороды ранжировали в ряду: смесь парафинов > нефтепродукты > ароматические углеводороды > сырая нефть, при этом наиболее активными были штаммы микроорганизмов, выделенные из почв промышленной и транспортной зон г. Баку, по сравнению с почвами рекреационной зоны. Выделенные активные штаммы можно считать перспективными для создания биопрепаратов для увеличения устойчивости почв к загрязнителям и активизации процессов самоочищения уже загрязненных почв.

Ключевые слова: деструктивная активность, нефтезагрязнения, штаммы-деструкторы нефтепродуктов.

DOI: 10.31857/S0002188124060098, **EDN:** CXDFEM

ВВЕДЕНИЕ

Баку — столица Республики Азербайджан, крупный промышленный центр, занимающий весь Апшеронский п-ов и примыкающие участки морских и наземных нефтепромыслов и включающий острова Бакинского и Апшеронского архипелагов.

На Апшеронском полуострове эксплуатируются >150 месторождений полезных ископаемых, вблизи расположения которых сильно нарушены природная структура почв, условия развития растительности и животного мира. Например, на Апшеронском п-ве площадь техногенно загрязненных земель составляет: битуминизированных — 7475, замазученных — 5525, загрязненных кислотнo-щелочными отходами — 750, свалок — 800, песков, пропитанных нефтью, — 650, песков, загрязненных отработанным маслом, — 375 га, площадь водоемов, загрязненных отходами нефти, — >1325 га [1].

Самоочищающую способность природных ландшафтов, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, определяет, в первую очередь, ассимиляционный потенциал почв [2–4], от которого зависит потенциал их восстановления в случае загрязнения [5]. Хотя в процессе ассимилирования углеводородов участвуют не только

микроорганизмы, однако по сравнению с растениями и животными в этом процессе несомненно ведущая роль принадлежит почвенным микроорганизмам [6, 7], т.к. высокая активность их обменных процессов и способность быстро адаптироваться к новым условиям существования позволяет им использовать самые разнообразные органические вещества в качестве источника углерода. Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами вносит дополнительный источник углерода в экосистему, что является стимулом для развития углеводородокисляющих бактерий, поэтому в загрязненных экосистемах численность этой группы бактерий бывает всегда больше по сравнению с чистыми. Эта группа микроорганизмов способна потреблять различные углеводороды в качестве субстрата для своего роста как непосредственно, так и в процессе соокисления, способствуя углублению процесса самоочищения почвы. Принимая во внимание значимость углеводородокисляющих микроорганизмов в самоочищении почв от загрязнения нефтью и нефтепродуктами (НП), цель работы заключалась в выделении углеводородокисляющих микроорганизмов из почв и определение их активности по отношению к загрязнению нефтяными углеводородами почв г. Баку.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования — серо-бурые почвы (согласно классификации WRB — Gypsisols) из различных функциональных зон г. Баку. Образцы почв отбирали методом конверта в различных зонах г. Баку: на территориях нефтепромыслов (Баил, Сураханы, Балаханы, Бинагади, Лок-Батан, Биби-Эйбат), в транспортной зоне (просп. Метбуат, Тбилиси, Азадлыг, ул. 28 Мая, просп. Нефтяников, Бабека, Г. Алиева, Н. Нариманова, Зыхское шоссе) и в рекреационной зоне (Ботанический сад, Приморский и Ясамальский парки) [8].

Угледородоокисляющие бактерии выделяли высевом на твердую минеральную среду Раймонда с внесением *n*-гексадекана в качестве источника углерода и энергии [9].

Определение способности штаммов потреблять различные углеводороды (сырую нефть, парафиновые и ароматические углеводороды) и нефтепродукты (керосин, бензин) проводили в модельных экспериментах в колбах на качалках с 50 мл жидкой минеральной среды Раймонда. В колбы вносили соответствующие углеводороды и НП в количестве 2 мл/100 мл среды. Колбы располагали на круговых качалках и культивировали бактерии в течение 72 ч. Через определенные промежутки времени из колб отбирали пробы для определения роста микроорганизмов. По показателю оптической плотности среды (оптическую плотность определяли на нефелометре) судили о степени использования углеводородов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования было выделено 187 культур микроорганизмов: из нефтезагрязненных почв — 86, из придорожных почв автомагистралей с интенсивным движением автотранспорта — 57, из чистых почв парков и скверов — 44, из которых путем первичного скрининга по интенсивности роста на среде Раймонда отобрали 27 активных

штаммов: из нефтезагрязненных почв — 15, из придорожных почв — 7, из чистых почв — 5 (табл. 1).

Далее из 27-ми штаммов микроорганизмов отобрали наиболее активные штаммы: из нефтезагрязненных почв — 8, из придорожных — 5, из чистых — 2. Выделенные в результате непрерывного скрининга микроорганизмы относились к родам *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Mycobacterium*, *Actinomyces*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*.

У всех штаммов исследована способность к потреблению сырой нефти, парафиновых и ароматических углеводородов, а также нефтепродуктов — бензина и керосина.

На рис. 1 показана интенсивность потребления *n*-гексадекана штаммами микроорганизмов, выделенных из почв различных зон (нефтезагрязненных, транспортных, парковых) в качестве источников углерода и энергии.

Показано, что наиболее активными были штаммы микроорганизмов, выделенные из почв промышленной и транспортной зон г. Баку, по сравнению с почвами рекреационной зоны.

Установлено, что все выделенные 15 культур углеводородразлагающих микроорганизмов были способны расти на смеси *n*-парафинов C_{12} – C_{18} , потребление же остальных определялось природой субстрата: например, разложение ароматических фракций углеводородов наблюдали реже (42% штаммов), чем разложение парафинов и нефтепродуктов (40–100% штаммов).

На рис. 2 показана способность одного из активных штаммов — *Pseudomonas* sp.11 на жидкой среде Раймонда при непрерывном культивировании потреблять парафиновые углеводороды, сырую нефть и нефтепродукты.

Показано, что выделенный штамм потреблял все исследованные источники углеводородов. Наилучший рост был на смеси *n*-парафинов C_{10} – C_{18} , наиболее слабый — на сырой нефти. Известно, что в составе сырой нефти имеются

Таблица 1. Культуры угледородоокисляющих бактерий, выделенные из почв различных районов г. Баку

Почвы	Количество штаммов, растущих на <i>n</i> - C_{16}
Нефтезагрязненные (районы нефтепромыслов Баил, Сураханы, Балаханы, Бинагади, Лок-Батан, Биби-Эйбат)	86
Придорожные около автомагистралей (просп. Метбуат, Тбилиси, Азадлыг, ул. 28 Мая, просп. Нефтяников, Бабека, Г. Алиева, Н. Нариманова, Зыхское шоссе)	57
Чистые (Центральный ботанический сад, Приморский парк, парки Деде Коркуд, им. Низами, им. Г. Алиева, им. Шахрияра, парк около озера, Ясамальская долина)	44
Всего	187

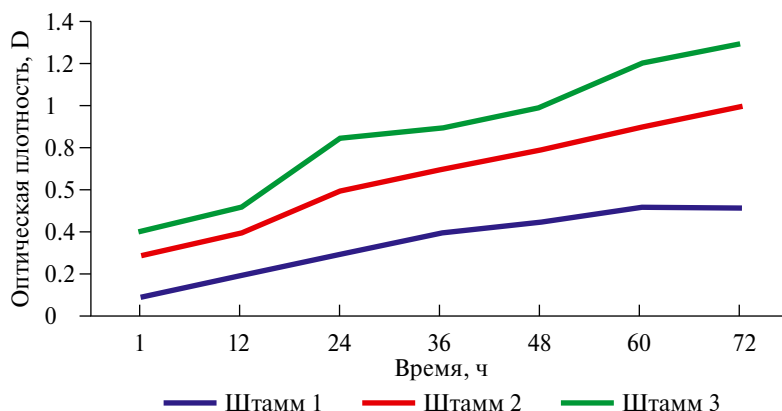


Рис. 1. Потребление *n*-гексадекана микроорганизмами, выделенными из почв различных зон г. Баку. Штаммы 1, 2, 3 выделены соответственно из парковой, транспортной и промышленной зон г. Баку.

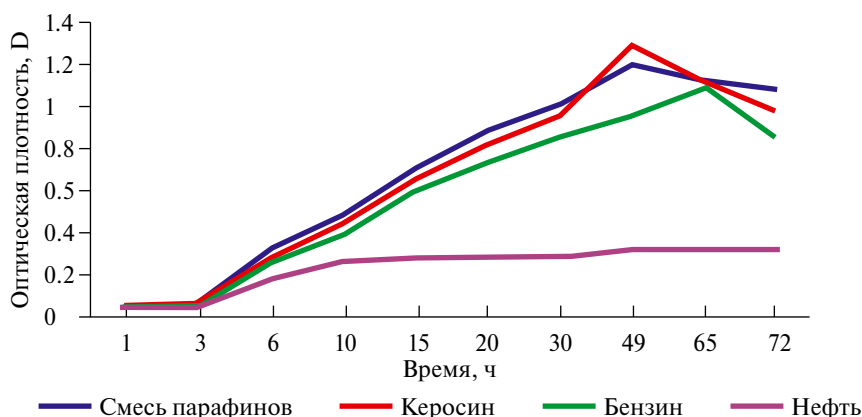


Рис. 2. Потребление штаммом *Pseudomonas* sp.11 сырой нефти, парафиновых углеводородов и нефтепродуктов.

парафиновые, циклопарафиновые и ароматические углеводороды. Все эти углеводороды различной химической структуры присутствуют и в нефтепродуктах в тех или иных количествах. В этой связи представляло интерес изучение закономерности разложения данным штаммом индивидуальных углеводородов различной химической структуры.

Биодеградация парафинов и ароматических углеводородов различной структуры и длины цепи штаммом *Pseudomonas* sp.11 представлены на рис. 3а.

Показано, что все испытанные *n*-парафиновые углеводороды потреблялись штаммом *Pseudomonas* sp.11 в качестве источников углерода и энергии. Интенсивность потребления однозначно коррелировала с длиной углеводородной цепи: с удлинением цепи интенсивность потребления парафиновых углеводородов микроорганизмами нефтезагрязненных почв повышалась вплоть

до *n*-гексадекана, который деградировал наиболее интенсивно по сравнению с другими исследованными парафинами. Октадекан утилизировали несколько слабее *n*-гексадекана, однако лучше, чем углеводороды C_8-C_{10} .

Показано (рис. 3б), что все испытанные индивидуальные ароматические углеводороды потреблялись активной культурой, за исключением *o*-ксилола, т.е. интенсивность использования углеводородов зависела от структуры ароматического субстрата. Однозамещенные бензольного ядра — бензол и толуол использовались слабее, чем двухзамещенные бензола — *мета*- и *пара*-ксилолы, метилбензол, этилбензол.

Наличие в почвах таких групп микроорганизмов, способных разлагать углеводороды нефти, объясняется тем, что в г. Баку почвенный покров непрерывно загрязняется углеводородами и нефтепродуктами.

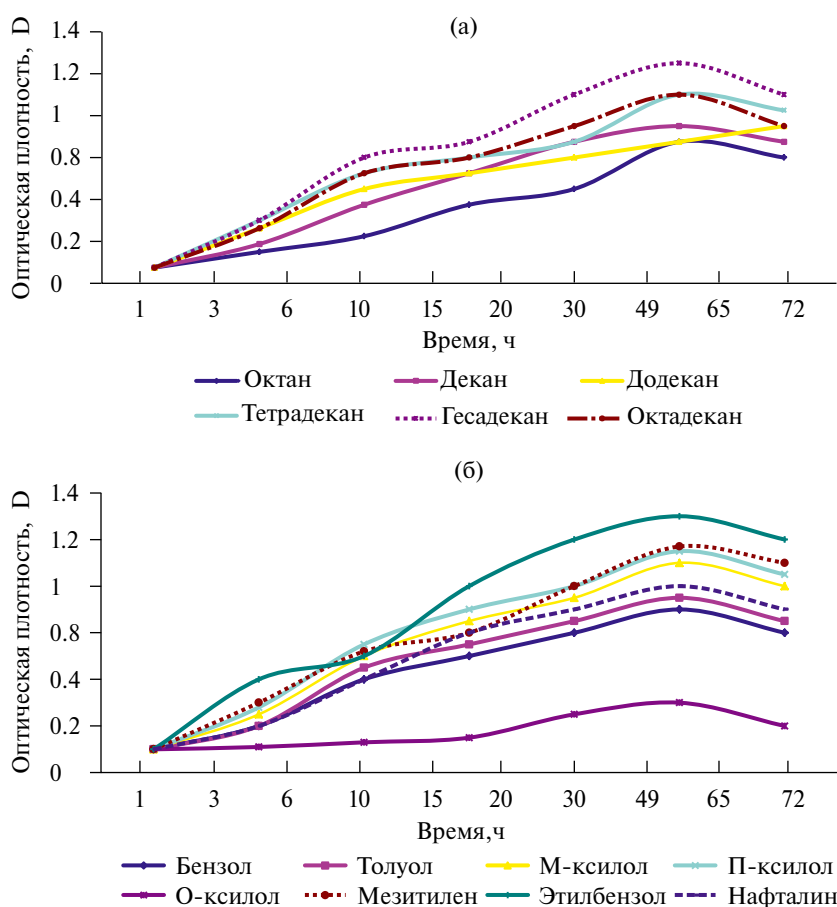


Рис. 3. Потребление штаммом *Pseudomonas sp. 11*: (а) — *n*-парафинов различной длины цепи, (б) — моно- и бициклических ароматических углеводородов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате скрининга микроорганизмов-деструкторов нефтепродуктов было отобрано 15 наиболее активных штаммов из 187 культур, 8 из которых были выделены из нефтезагрязненных почв, 5 — из придорожных почв и 2 — из чистых почв.

У всех штаммов исследовали способность к потреблению сырой нефти, парафиновых и ароматических углеводородов, а также нефтепродуктов — бензина и керосина. Показано, что все выделенные микроорганизмы были способны расти на смеси *n*-парафинов C_{12} — C_{18} , потребление же остальных определялось природой субстрата: например, разложение ароматических фракций углеводородов наблюдали реже (42% штаммов), чем разложение парафинов и нефтепродуктов (40—100% штаммов), при этом наиболее активными были штаммы микроорганизмов, выделенные из почв промышленной и транспортной зон г. Баку, по сравнению с почвами рекреационной зоны. Исследованные углеводороды по степени разлагаемости ранжировали в ряду: смесь парафинов > нефтепродукты > ароматические углеводороды > сырая нефть.

Таким образом, полученные данные свидетельствовали, что в составе микробиоценоза изученных городских почв г. Баку имеются микроорганизмы различных физиологических групп, способные использовать нефтяные углеводороды, а также о том, что в почвах города происходят процессы самоочищения почв, однако их интенсивность недостаточно высока, т.к. в условиях сухих субтропиков г. Баку формируются наихудшие гидротермические условия для процессов микробиологической минерализации компонентов нефти.

С научной и практической точек зрения вопрос о вероятности управления данными процессами с целью повышения устойчивости городских почв Баку и усиления степени актуальной самоочищающей способности почв от нефти и нефтепродуктов, загрязняющих почвенный покров города, сохраняет свою актуальность. Выделенные активные штаммы можно считать перспективными для создания биопрепаратов для увеличения устойчивости почв к загрязнителям и активизации процессов самоочищения уже загрязненных почв, в том числе и Апшеронского полуострова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исмаилов Н.М., Наджафова С.И., Гасимова А.* Апшеронский промышленный регион – факторы экологической напряженности // *Аридн. экосист.* 2015. Т. 21. № 3(64). С. 92–100.
2. *Исмаилов Н.М., Наджафова С.И., Кейсерухская Ф., Гасимова А.С.* К вопросу о показателе ассимиляционного потенциала почв как составной части паспорта почв и ассимиляционного потенциала ландшафтов // *Аридн. экосист.* 2020. Т. 26. № 1(82). С. 69–75.
DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10085
3. *Исмаилов Н.М., Наджафова С.И.* Оценка экологических рисков эксплуатации магистральных нефтепроводов на территории Азербайджана с точки зрения биогеоустойчивости почв к загрязнению сырой нефтью // *Вестн. МГУ. Сер. 17: Почвовед.* 2022. № 3. С. 93–100.
4. *Коршунова Т.Ю., Четвериков С.П., Бакаева М.Д.* Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор) // *Прикл. биохим. и микробиол.* 2019. Т. 55. № 4. С. 338–349.
DOI: 10.1134/S0555109919040093
5. *Babaev M.P., Ismailov N.M., Nadzhafova S.I., Keiserukhskaya F.Sh., Orudzheva N.I.* Approaches to determining maximum permissible concentrations of oil and oil products for different soil types on the basis of the assimilation potential (by the example of Azerbaijan soils) // *Euras. Soil Sci.* 2020. V. 53. № 11. P. 1629–1634. DOI: 10.1134/S1064229320110046
6. *Поляк Ю.М., Сухаревич В.И.* Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // *Агрохимия.* 2020. № 3. С. 83–93. DOI: 10.31857/S0002188120010123
7. *Наджафова С.И., Кейсерухская Ф.Ш., Исмаилов Н.М.* Оценка биогенных ресурсов ассимиляционного потенциала основных типов почв Азербайджана в отношении органических загрязнителей // *Агрохимия.* 2022. № 5. С. 85–93.
DOI: 10.31857/S0002188122050064
8. ГОСТ 28168-89. Почвы. Отбор проб. М.: Изд-во стандартов, 2008. 7 с.
9. *Звягинцев Д.Г.* Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Издательский центр “Академия”, 2005. 267 с.

Screening of Active Oil Destructors from Various Zones of Urban Soils (on the Example of Baku)

S. I. Nadjafova^{a, #}, N. M. Ismaylov^a

^a*Institute of Microbiology of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan,
M. Mushviq str. 103, Baku AZ 1004, Azerbaijan*

[#]*E-mail: nadjafovas@yahoo.com*

Active cultures of hydrocarbon-decomposing microorganisms from soils of various functional zones of Baku were screened. It was shown that 15 cultures of hydrocarbon-decomposing microorganisms isolated as a result of continuous screening belonged to the genera *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Mycobacterium*, *Actinomyces*, *Arthrobacter*, *Micrococcus* and were able to use various hydrocarbons (crude oil, paraffin and aromatic hydrocarbons and petroleum products) as the only source of carbon and energy. According to the degree of decomposition, petroleum hydrocarbons were ranked in the series: a mixture of paraffins > petroleum products > aromatic hydrocarbons > crude oil, while the most active strains of microorganisms were isolated from the soils of the industrial and transport zones of Baku, compared with the soils of the recreational zone. The isolated active strains can be considered promising for the creation of biological products to increase soil resistance to pollutants and activate the processes of self-purification of already contaminated soils.

Keywords: destructive activity, oil pollution, strains-destructors of petroleum products.

УДК 631.433.5:631.81

ЭМИССИЯ CO₂ КАК МЕРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. В. Н. Башкин*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия***E-mail: vladimirbashkin@yandex.ru*

Принимая во внимание накопленный за последние годы огромный массив данных о выбросах парниковых газов (в первую очередь CO₂, метана, или парниковых газов (ПГ)), можно рассмотреть проблему энергоэффективности (выбросы углекислого газа происходят, прежде всего, при сжигании топлива, а также метана и CO₂ в качестве прекурсоров для азотных удобрений) в цепочке от производства удобрений до их логистики, применения, производства и утилизации отходов. При этом выбросы ПГ можно рассматривать как меру энергоэффективности при оценке жизненного цикла минеральных удобрений. Соответствующие примеры приведены в обзоре.

Ключевые слова: производство удобрений, выбросы углерода, азота, энергоэффективность, оценка жизненного цикла, логистика, внесение удобрений, переработка сельскохозяйственных отходов.

DOI: 10.31857/S0002188124060109, **EDN:** CWTKCI

ВВЕДЕНИЕ

В производстве минеральных удобрений к основным загрязняющим веществам (поллютантам), выбрасываемым в атмосферу, относятся NO_x, CH₄, SO₂, SO₃, H₂SO₄, CO, соединения фтора, NH₄NO₃. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот требует больших затрат энергии, получаемой обычно за счет сжигания органического топлива с выделением значительных объемов парниковых газов. При этом некоторые предприятия (например, по производству карбамида) частично используют образующийся CO₂ в качестве исходного сырья, что позволяет уменьшить эмиссию диоксида углерода. Тем не менее работа большинства предприятий сопровождается выбросами в атмосферу, связанными со сжиганием природного газа, угля или дизельного топлива в турбинах, котлах, компрессорах и других системах для выработки энергии и тепла. При этом размеры эмиссии поллютантов зависят от используемого сырья и вида топлива, которые и определяют в большей степени технику и технологию получения энергии.

При этом одним из важнейших факторов является энергоэффективность. Например, в России длительный этап восстановления и модернизации производственных мощностей отрасли минеральных удобрений, введенных в эксплуатацию в 1970–1980-х гг., завершился к концу 2010 г. Дальнейшее увеличение действующих мощностей и более глубокая модернизация сопряжены с резким

увеличением капитальных затрат. Что касается энергоэффективности, то основные принципы регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности заложены в Федеральном законе от 23 ноября 2009 г. № 261 ФЗ “Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации” и ГОСТ Р ИСО 50001-2012.

Потребление энергоресурсов неразрывно связано с проблемой экологического воздействия на окружающую среду, которое оказывают выработка энергии и транспорт, а также с выбросами парниковых газов (ПГ) в результате сжигания углеводородного топлива. При производстве азотных удобрений расходуется значительная часть энергии, в частности, на связывание атмосферного азота, необходимого для производства аммиака. При производстве нитрата аммония, азотной кислоты из аммиака, серной кислоты из серы вырабатываются полезные энергоресурсы, которые можно использовать для производства электроэнергии, применяя для этого паровые турбины. Для выпуска фосфорсодержащих удобрений требуется энергия для производства фосфорной кислоты, ее дальнейшей переработки в готовые продукты. Несмотря на то что в промышленности по производству удобрений всегда расходуется большое количество энергии в процессах, которые проходят при высоких температурах и давлении, эти производства стали более энергосберегающими благодаря

усовершенствованию применяемых технологий. Предприятия по выпуску аммиака, построенные в 1990 г., потребляли приблизительно на 30% меньше энергии на 1 т азота по сравнению с теми, которые были введены в эксплуатацию в 1970 г.

Среди предприятий рассматриваемой отрасли промышленности, те предприятия, которые выпускают серную кислоту (из серы) и азотную кислоту, являются поставщиками энергоресурсов, таких как пар высокого, среднего или низкого давления или горячая вода. Если, при рассмотрении идеализированного варианта, всю тепловую энергию преобразовать в электроэнергию посредством паровой турбины, тогда поставки на сторону полезных энергоресурсов значительно сократятся, но при этом выработанная электроэнергия будет использована непосредственно в производстве. Это уже рассматривается как один из путей повышения энергоэффективности.

Например, крупнейший российский производитель минеральных удобрений – ПАО «ФосАгро» к 2028 г. планирует снизить выбросы парниковых газов на 14% по сравнению с 2018 г. Для этого у него есть программа энергоэффективности для энергосбережения, сокращения потребления и потерь энергии [1].

Следует при этом отметить, что при производстве минеральных удобрений может увеличиваться выброс CO_2 , но это компенсируется за счет высоких урожаев. Сельское хозяйство – одна из областей производства, значительно влияющая на выброс парниковых газов, а также потребляющая большое количество энергии. При этом энергопотребление и выбросы парниковых газов зачастую связаны прямо пропорциональной зависимостью. Следовательно, наиболее важным путем снижения выбросов ПГ является увеличение энергоэффективности сельского хозяйства.

По данным [2], проведение в России энергосберегающей политики, совершенствование и реализация новых энергоэкономных технологий, энергоэффективного оборудования и техники, рациональное использование энергоресурсов позволят снизить удельные энергозатраты при производстве сельхозпродукции, т.е. снизить энергоемкость производства и выйти на запланированный уровень ее снижения – к 2030 г. – на 60 и к 2035 г. – на 65%.

Можно выделить 4 направления энергосбережения в сельском хозяйстве:

- абсолютное сокращение объемов потребляемой энергии за счет рационализации методов хозяйствования, повышения интенсификации, внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий производства;

- замещение дорогостоящих и дефицитных энергоресурсов менее дефицитными;
- расширение области использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- изменение системы управления организацией, построение и внедрение в практику организационно-экономического механизма энергосбережения.

Принимая во внимание огромный массив данных, накопленных за последние годы о выбросах парниковых газов (в первую очередь CO_2 и метана), можно рассмотреть проблему энергоэффективности (выбросы углекислого газа происходят, прежде всего, при сжигании топлива, а также при переработке метана как сырья для азотных удобрений) в цепочке от производства удобрений до их логистики, применения, образования и утилизации отходов.

Поскольку подавляющая часть выбросов ПГ обусловлена процессами энергопотребления, рост энергоэффективности играет определяющую роль в воздействии на уровень эмиссии. За период 1990–2017 гг. энергоемкость ВВП России снизилась на 30%, энергоемкость мирового ВВП – на 35%. Это было ключевым фактором сдерживания выбросов CO_2 , тогда как вклад процесса снижения углеродоемкости потребляемой энергии (зависит от топливной структуры) пока остается существенно менее значимым. В перспективе ведущая роль фактора энергоэффективности сохранится [3].

Цель работы – анализ сопряженных процессов потребления энергии и выбросов парниковых газов в системе “производство минеральных удобрений – транспортировка – внесение в агроэкосистемах – утилизация агроотходов” и оценка факторов энергоэффективности. При этом размеры выбросов ПГ на всех этапах жизненного цикла можно рассматривать как меру энергоэффективности.

ПРОИЗВОДСТВО УДОБРЕНИЙ

Производство минеральных удобрений, как часть химической промышленности (и в то же время тяжелой промышленности), является одной из наиболее энергоемких отраслей и может играть решающую роль в реализации обязательств по энергосбережению и сокращению выбросов. Показано, что среди факторов, которые могут привести к снижению выбросов CO_2 в тяжелой промышленности Китая, должны учитываться структура промышленности, инвестиции в основной капитал и исторически сложившиеся размеры эмиссии поллютантов. При этом энергоэффективность является ключевым фактором сокращения

выбросов углекислого газа. Реализация политики обязательного сокращения выбросов может снизить выбросы CO₂ [4].

На долю химической промышленности в России приходится $\approx 2\%$ потребления первичных энергоресурсов страны и 2.5% общего объема выбросов парниковых газов, из которых 60% составляют выбросы от производственных процессов и сжигания топлива. Оставшиеся 40% относятся к косвенным выбросам, связанным с потреблением электроэнергии и тепла. Ожидается, что на протяжении 2-х ближайших десятилетий отрасль продолжит быстрый рост, и для ограничения роста энергопотребления ей необходимо будет внедрять рентабельные меры по энергосбережению. При реализации всех выявленных мер в 2030 г. выбросы парниковых газов могут быть меньше сегодняшнего уровня. Однако в отсутствие указанных изменений выбросы возрастут приблизительно на 85%.

Повышение энергоэффективности предполагает установку более энергоэффективного оборудования на химических заводах, оптимальное использование катализаторов и применение более эффективных технологий, снижающих энергопотребление. Самой высокой рентабельностью и наиболее значительным потенциалом отличается комплекс мер по повышению энергоэффективности оборудования химических предприятий (двигателей конвейеров, смесительных машин и др.). С их помощью можно добиться экономии энергоресурсов в размере 6.3 млн т условного топлива (у.т.) и сократить выбросы на 6.5 млн т CO₂-экв/год в 2030 г. Также необходима реализация целого ряда мер по совершенствованию производственных процессов и катализаторов, которые помогут снизить интенсивность выбросов в химических процессах. Важнейшим представляется улавливание и/или разрушение закиси азота (N₂O) в отходящих газах при производстве азотной кислоты. С помощью определенных технологий фильтрации (каталитического разложения или каталитического восстановления) удастся ускорить разложение N₂O в отходящих газах. Реализация этой меры, хотя и позволит сократить выбросы, но является высоко затратной. Далее, необходимо изменение структуры топливного баланса химической отрасли с целью перехода на топливо, выделяющее меньшее количество парниковых газов при сжигании. В ряде регионов мира это потребует перехода химических предприятий с нефти и угля на газ. Можно также рассматривать внедрение технологии улавливания и хранения углекислого газа. Это развивающаяся технология, которая, как ожидается, позволит улавливать углекислый газ, выделяющийся при сгорании топлива и в ходе производственных процессов на химических предприятиях (например, при производстве аммиака).

Еще одним фактором, определяющим энергоэффективность производства минеральных удобрений и снижение выбросов ПГ, является учет климатических рисков. К ним относятся риски, связанные с изменениями в природных процессах и явлениях в результате изменения климата (физические факторы). Также они связаны с принятием политических, экономических, финансовых и иных решений правительствами, международными организациями, финансовыми структурами, объединениями производителей и потребителей, другими общественными организациями с целью снижения темпов климатических изменений. Это может быть обеспечено на основе сокращения выбросов парниковых газов путем введения углеродного регулирования, ограничений на использование ископаемого топлива и потребление электроэнергии, полученной из невозобновляемых источников энергии (переходные факторы). При этом следует подчеркнуть, что в настоящее время климатические изменения происходят прежде всего за счет природных процессов (изменение солнечной активности, изменения угла наклона орбиты Земли, вулканическая активность и пр.). Антропогенные процессы играют подчиненную роль [5].

В ПАО «ФосАгро» в 2020 г. на основании принципов устойчивого развития, опубликованных в Кодексе поведения контрагента, была разработана система оценки поставщиков по ESG-критериям, включающим вопросы охраны окружающей среды, социальной ответственности и управления качеством. Оценка основывается на данных анкеты «Показатели устойчивого развития по закупкам», содержащей 61 ESG-показатель, и механизме учета этих показателей в зависимости от категории поставщиков/подрядчиков. Данная система оценки включает в себя критерии/требования для 6-ти основных направлений устойчивого развития, что позволяет оценить деятельность контрагентов с разных сторон: экологии, охраны труда, управления персоналом, разрешительной документации, контроля качества, качества управления.

Увеличение использования «зеленой» электроэнергии является частью климатической стратегии ПАО «ФосАгро», в рамках которой только для парниковых газов к 2028 г. планируется снижение эмиссии на 14% от базового уровня 2018 г. во всех 3-х охватах. При этом удельная эмиссия парниковых газов первого охвата уже снижена за период с 2018 по 2021 г. на 16%, в то время как валовая эмиссия за этот период сократилась почти на 4% при непрерывном росте производства.

В состав мероприятий по повышению энергоэффективности ПАО «ФосАгро» также входит поэтапный переход к возобновляемым источникам энергии. В 2021 г. осуществлен ввод в действие

1-го комплекса из 2-х солнечных электростанций по 40 кВт. В настоящее время обеспеченность электроэнергией собственного производства достигла 40.3%. Компания планирует снизить выбросы ПГ до 794.7 тыс. т CO₂-экв к 2028 г. в охвате 1 и до 893.3 тыс. т CO₂-экв в охвате 2 [1].

Стратегией энергоэффективности определены следующие цели (табл. 1):

- сокращение выбросов парниковых газов при увеличении производства продукции;
- повышение энергетической и экологической эффективности основных технологических процессов;
- снижение энерго- и углеродоемкости выпускаемой продукции;
- выход на новые формирующиеся рынки зеленой продукции.

Как результат, удельное потребление энергии на единицу производимой продукции и полуфабрикатов снизилось с 5.58 ГДж/т в 2018 г. и составляло в 2021 г. 5.06 ГДж/т. При этом произошло снижение потребления всех видов природного топлива, даже потребление наиболее экологически чистого природного топлива — метана снизилось за этот период до 0.075 м³/т продукции.

В 2022 г. Кировский филиал ПАО «ФосАгро» (г. Киров, Россия) увеличил объем «зеленой» электроэнергии, используемой в производстве, до 300 млн кВт ч. Таким образом, 17.8% его продукции в прошлом году было выпущено с использованием «зеленой» электроэнергии, выработанной на гидроэлектростанциях ТГК-1. ПАО «ФосАгро» последовательно работает над снижением углеродного следа своей продукции. В том числе это касается требований к поставщикам товаров и услуг.

Рассмотрим еще несколько примеров российских предприятий, производящих минеральные удобрения. Например, ПАО «Минеральные удобрения» (г. Пермь, Россия) является одним

из крупнейших производителей азотных удобрений Урала и Западной Сибири. Оно производит аммиак безводный сжиженный, аммиак водный технический, карбамид, а также жидкую низкотемпературную двуокись углерода и жидкую двуокись углерода высокого давления.

Для этого предприятия было предложено строительство фотоэлектрической солнечной электростанции на его территории, которая предназначена для генерации электрического тока с последующим его использованием в пределах внутренней электросети предприятия. Эта электростанция может устанавливаться как на крыше здания, так и на поверхности свободных земельных участков. Возможна установка аккумуляторных батарей, которые обеспечат стабильную работу резервированной нагрузки в случае отключения внешнего питания [6].

Другой пример направлен на оценку входящих и выходящих продуктов. На одном из крупнейших производителей азотных удобрений в Пермском регионе выполнен сбор данных о материальных потоках производства аммиака [7]. Расчет углеродного следа производства аммиака на рассматриваемом предприятии выполнен в соответствии с методическими указаниями, утвержденными в России (Приказ Минприроды РФ № 300 от 30 июня 2015 г.). Согласно данному документу, обязательному учету на производстве аммиака подлежит такой парниковый газ, как диоксид углерода (CO₂). Установлено, что в год производство образует 2.433 млн т CO₂. Согласно расчетным данным, на 1 т аммиака приходится 2.027 т CO₂, что удовлетворяет требованиям критериев проектов устойчивого (в том числе «зеленого») развития в РФ — совокупный выброс меньше 2.104 т CO₂/т аммиака. Но для уточнения величины совокупного выброса требуется более детальное рассмотрение источников электроэнергии, а также анализ косвенных выбросов CO₂ на 1 т аммиака (охват 2). В табл. 2 показано, что расход природного газа на 1 т аммиака

Таблица 1. Перечень и основные характеристики действующих метрик, которые были введены для мониторинга показателей деятельности в рамках климатической стратегии ПАО «ФосАгро»

Наименование метрик, единица измерения	Годы			
	2018	2019	2020	2021
Объем общих глобальных выбросов (охват 1 + 2) на единицу валюты общей выручки, т CO ₂ -экв/млн долл. США	1552.3	1467.1	1621.6	975.5
Объем общих глобальных выбросов (охват 1 + 2) на эквивалент одного сотрудника на полную ставку, т CO ₂ -экв.	331.0	321.6	319.6	304.0
Закупаемая электроэнергия на единицу производимой продукции и полуфабрикатов, тыс. кВт ч/т	0.071	0.069	0.068	0.066
Затраты на повышение энергоэффективности, млн руб.	Нет данных	82.0	10 500.0	17.4
Доля поставщиков сырья, предоставивших необходимые исходные данные о выбросе парниковых газов (охват 3), %	Нет данных		4.0	2.7

Таблица 2. Материальные потоки при производстве 1 т аммиака (АО “Азот” ОХК “Уралхим”, г. Березники) [8]

Входящие потоки			Выходящие потоки		
наименование	единица измерения	на 1 т аммиака	наименование	единица измерения	на 1 т аммиака
Природный газ	м ³	1275	Выбросы NO _x	кг	1.86
Азот	м ³	38	Выбросы CO ₂	кг	1.45
Электроэнергия	кВт ч	159			
Подпиточная вода	м ³	3.65			

составляет 1275 м³, при этом выбросы CO₂ равняются 1.45 кг, что меньше требуемого показателя.

По результатам оценки выбросов CO₂, а также согласно анализу технологии и данным об основных материальных потоках получения аммиака, выявлены основные направления разработки “зеленых” проектов, позволяющие снизить углеродный след от производства аммиака на рассмотренном предприятии:

- переработка извлеченной фракции CO₂ (например, вовлечение в процесс производства карбамида, использование для создания защитной среды при сварке металлов, для сушки литейных форм, для пожаротушения);
- разработка и внедрение технологий, позволяющих снижать потребление сырья при производстве аммиака (например, установка выделения горючих газов из фракции CO₂ в отделении очистки от CO₂, реконструкция компрессора синтезгаза и паровой турбины);
- повышение энергоэффективности как следствие отмеченных выше факторов.

Резюмируя приведенные в этом разделе материалы можно заключить, что в настоящее время производство минеральных удобрений вследствие технологических процессов даже с использованием нормативно-технической документации (НДТ) связано с эмиссией ПГ. Однако повышение энергоэффективности производства влечет за собой неминуемое сокращение выбросов ПГ.

ЛОГИСТИКА УДОБРЕНИЙ

Транспортная логистика — это оптимизация управления транспортировкой грузов, т.е. выполнения операций перемещения и хранения сырья, полуфабрикатов, объектов незавершенного производства, готовой продукции из мест происхождения в места потребления. К примеру, при перемещении товарных партий минеральных удобрений от производителей и коммерческих посредников

к потребителям используют комбинацию автомобильного, железнодорожного и водного видов транспорта (специализированные вагоны и транспортные средства). Основная цель транспортной логистики в АПК, как и логистики в целом, — снижение затрат на физическое товародвижение. Эта цель достигается путем соблюдения следующих основополагающих принципов: максимально полное использование грузоподъемности или грузоместимости транспортных средств, организация доставки грузов без складов (по технологии кросс-докинга), кратность транспортной единицы груза единицам заказа, отправки и складирования (например, использование контейнера), стандартизация тары, экономия от масштаба и дальности перевозки грузов, т.к. в этом случае расходы на 1 т-км минимальны, концентрация грузопотоков на отдельных каналах распределения товаров и отказ от неэкономичных каналов, доставка грузов по технологии “точно в срок”. Реализация этих принципов на практике позволяет добиться максимальной экономической эффективности для транспортного, производственного или торгового предприятия. Это также определяет энергоэффективность транспорта минеральных удобрений и оптимизирует выбросы ПГ.

Автомобильный транспорт производит значительное количество выбросов ПГ, таких, как диоксид углерода (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O). Расчеты выбросов от транспортных средств основаны на данных об общем потреблении топлива. Удельная теплота сгорания и коэффициенты выбросов для каждого типа топлива должны быть рассчитаны с учетом специфики используемого топлива. С учетом протяженности перемещения минеральных удобрений оценивают как энергопотребление, так и выбросы ПГ.

Методика расчета выбросов от сжигания топлива от автомобильного транспорта подразделяется на 2 части: оценка эмиссий двуокиси углерода и оценка эмиссий других газов. Оценка выбросов CO₂ лучше всего рассчитывается на основе количества и типа сгораемого топлива и содержания углерода в нем. Количество окисленного углерода практически не варьирует в зависимости

от применяемой технологии сжигания топлива. Оценка выбросов других газов с парниковым эффектом более сложна, т.к. зависит от типа автомобиля, топлива, характеристик эксплуатации транспортного средства, типа технологии контроля за выхлопными газами.

Оценка выбросов диоксида углерода от сжигания топлива автомобильным транспортом. Расчет выбросов диоксида углерода от сжигания топлива в двигателях внутреннего сгорания рекомендуют проводить на основе учета видов топлива и типов двигателя. Выбросы углекислого газа по этому методу оценивают следующим образом. Сначала оценивают потребление каждого вида топлива по типам транспорта (легковой, грузовой, автобусы, спецмашины), затем – общие выбросы CO_2 путем умножения количества потребленного топлива на фактор выбросов для каждого типа топлива и типа транспорта по формуле:

$$E = M \times K1 \times \text{ТНЗ} \times K2 \times 44/12,$$

где E – годовой выброс CO_2 в весовых единицах (т/год); M – фактическое потребление вида топлива за год (т/год); $K1$ – коэффициент окисления углерода в топливе (показывает долю сгоревшего углерода) (табл. 3); ТНЗ – теплотворная нетто-величина (Дж/т) (табл. 3); $K2$ – коэффициент выбросов углерода (т С/Дж) (табл. 3); $44/12$ – коэффициент для пересчета выбросов углерода C в двуокись углерода CO_2 .

На основании этих данных рассмотрим пример оценки влияния конструкции тракторов на выбросы ПГ. В табл. 4 приведены сравнительные расчеты при выполнении транспортных работ в составе тракторов Doutz-Fahr Agrottron L720 и “Беларус 2022” с прицепом ПСТ-12, тракторов John Deere 6110В и “Беларус 82.1” с прицепом 2ПТС-6 в пределах фермерского хозяйства. Тракторы Doutz-Fahr Agrottron L720 и “Беларус 2022” одного тягового класса, отличаются более совершенной коробкой перемены передач (КПП) у зарубежного аналога, способной реализовать высокие эксплуатационные свойства. Также более совершенна КПП у трактора John Deere 6110В, она имеет 4 диапазона по 6 передач, что способствует более рациональному использованию эксплуатационных свойств по сравнению с трактором “Беларус 82.1” [9].

Представленные расчеты показывают, что на выброс ПГ существенное влияние оказывает система

машин в целом, а также отдельно взятые тракторы, зерно- и кормоуборочные комбайны и другие энергетические средства. При этом очень важное значение имеет правильное комплектование агрегатов как с точки зрения снижения расхода топлива, снижения выбросов CO_2 , CH_4 , NO_x , так и негативного воздействия на почву – переуплотнение, эрозия, необоснованное применение СЗР и др.

Рассмотрим также сравнение транспортных параметров, определяющих расход энергии и выбросы ПГ, при 2-х различных системах выращивания пшеницы [10]. Известно, что оптимизированную оценку жизненного цикла проводят для сравнения потенциала глобального потепления (ПГП) и использования первичной энергии при производстве и доставке пшеницы, выращиваемой по традиционной и органической технологии в США. Оценивают различия в воздействии сельскохозяйственных ресурсов, выращивания зерна и транспортных процессов.

Оценка логистики и детальный анализ транспортных цепей с учетом расстояний были проведены с помощью интернет-интерфейса указания маршрутов по шоссе. В табл. 5 приведено потребление первичной энергии (Дж) и потенциал глобального потепления (ПГП, измеряемый в г CO_2 -экв/100-летний период времени) при оптимизированной системе производства и доставки пшеницы в количестве 670 г, необходимых для 1 кг буханки хлеба. Оценены традиционная система выращивания пшеницы с использованием минеральных удобрений и органическая система.

Поэтому можно заключить, что хотя органическая система выращивания пшеницы требует несколько меньшего использования энергии и сопровождается меньшими показателями ПГП, эти различия в целом не существенны. Показано, что ПГП буханки органического пшеничного хлеба весом 1 кг примерно на 30 г CO_2 -экв меньше, чем у обычной буханки. Однако необходимо учитывать и транспортное плечо. Так при более длинных транспортных маршрутах доставки зерна пшеницы (>420 км) различия между 2-мя сравниваемыми системами выращивания практически исчезают. Кроме того, важное значение имеют другие факторы, например, накопление углерода в почве и выбросы закиси азота из двух систем.

Таблица 3. Коэффициенты для пересчета сожженного топлива в выбросы CO_2 для автотранспорта

Виды топлива	Теплотворная нетто-величина низшая (ТНЗ), ТДж/тыс. т	Коэффициент выбросов углерода ($K2$), т С/ТДж	Фракция окисленного углерода ($K1$)
Бензин	44.21	19.13	0.995
Дизельное топливо	43.02	19.98	0.995
СНГ	47.17	17.91	0.99
Природный газ	34.78	15.04	0.995

Таблица 4. Показатели, характеризующие транспортные агрегаты и выбросы ПГ

Основные показатели	Транспортные агрегаты			
	Беларус 82.1 + 2ПТС-6	John Deer 6110B + 2ПТС-6	Беларус 2022 + ПСТ-12	Doutz-Fahr Agrotron L720 + ПСТ-12
Грузоподъемность, кН	60.02	60.02	86.05	86.05
Средняя скорость движения, км/ч	22.7	25.1	26.2	27.7
Коэффициент использования скорости движения	0.77	0.77	0.77	0.77
Тяговое сопротивление прицепа с грузом, кН	4.35	4.35	6.06	6.06
Часовая производительность, т/ч	4.86	5.38	8.3	8.95
Сменная производительность, т	34	37.6	58.1	62.6
Расход топлива на перевезенную 1 т, кг/т	2.62	2.08	2.7	1.73
Выбросы CO ₂ на перевезенную 1 т, кг/т	8.216	6.522	8.446	5.425

Таблица 5. Оценка величин использования энергии и глобального потенциала потепления при применении 2-х систем выращивания пшеницы

Процесс	Традиционная (контроль)		Органическая (сравнение)	
	Использование энергии (J)	Глобальный потенциал потепления, ПГП (г CO ₂ -экв)	Использование энергии (J)	Глобальный потенциал потепления, ПГП (г CO ₂ -экв)
Производство удобрений азотных	820	46	21	1.7
фосфорных	770	42	0.0	0.0
Производство пестицидов	50	3.8	21	1.7
Транспорт удобрений и пестицидов	22	1.6	0.0	0
Использование энергии	29	2.1	31	2.2
Производство энергии	22	1.5	25	1.8
Выращивание кукурузы	7.0	0.5	5.4	0.4
Вспашка	490	36	650	48
Производство энергии	450	32	600	42
N ₂ O эмиссия из почв	37	4.4	49	5.8
ГПП от хранения навоза	п.а.	96	п.а.	96
Производство оборудования	п.а.	п.а.	п.а.	5.1
Сумма	85	7.3	85	7.3
Транспортировка муки (2000 км)	1400	190	790	160
Использование энергии	1900	140	1900	140
Производство топлива	1600	110	1600	110
Всего	310	25	310	25
	3300	330	2700	300

ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

В последние годы энергоемкость сельхозпроизводства снижалась, но доля энергозатрат в себестоимости неуклонно возрастала. Например, стоимость потребленных энергоресурсов в себестоимости основных

видов сельхозпродукции в среднем составляла 26–35% (в 1985–1990 г. – 7–15%). Высокие показатели энергозатрат свидетельствуют об опережающем росте стоимости энергоносителей и низкой эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, что отрицательно сказывается на себестоимости продукции (табл. 6).

Таблица 6. Энергоемкость производства сельхозпродукции в России [11]

Вид продукции	Электроэнергия, кВт ч/ц	Топливо (теплота), кг у.т./ц	Суммарные энергозатраты (энергоемкость), кг у.т./ц	Доля энергозатрат в себестоимости продукции, %
Молоко	34	19	23	34.5
Свинина	250	190	220	26.5
Говядина	170	80	100	12.0
Яйца (1000 шт.)	95	28	38	34.0
Зерновые	13	12	14	31.5

Существенными источниками выбросов в сельском хозяйстве России выступают прямой выброс закиси азота из сельскохозяйственных почв (52 557.0 тыс. т CO_2 -экв) и выбросы CH_4 при внутренней ферментации домашних животных (39 090.4 тыс. т CO_2 -экв), при этом по сравнению с 1990 г. их объемы соответственно сократились на 38.4 и 62.8%. В 2019 г. вклад закиси азота в общие сельскохозяйственные выбросы составил 59.6, CH_4 – 39.5, CO_2 – $\approx 0.8\%$ (табл. 7) [12].

Экологически безопасным и устойчивым методом ведения сельского хозяйства выступает органическое сельское хозяйство, ключевыми особенностями которого являются использование технологий вторичной переработки органического углерода в питательные вещества: прямая переработка навоза, эффективное компостирование, утилизация остатков. Применение органических удобрений исключает выбросы парниковых газов при внесении минеральных удобрений и при их производстве.

Благоприятно сказываются на энергоэффективности и выбросах ПГ такие агротехнологии как мульчирование, уменьшение эрозии почв и повышение их плодородия, увеличение оборота углерода за счет рециркуляции питательных веществ. В животноводстве смягчить выбросы ПГ может использование энергетически насыщенных кормов в рационе питания, изменение продолжительности, времени и места приема пищи и питья животных. Однако при органических системах земледелия, как правило, снижается производство товарной продукции по сравнению с традиционными системами, использующими минеральные удобрения.

В целом, ресурсосберегающее земледелие базируется на таких принципах, как минимальная механическая обработка почвы, предшествующая высадке семян, а также при внесении удобрений, уборке урожая и других операциях; сохранение растительных остатков на поверхности почвы (мульчирование), позволяющее защитить почву

Таблица 7. Источники выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве России в 1990–2019 гг., млн т CO_2 -экв

Категория источников	Газ	Год						Динамика сокращения (2019/1990), %
		1990	2000	2010	2017	2018	2019	
Внутренняя ферментация сельскохозяйственных животных	CH_4	105.2	51.2	40.5	39.4	39.4	39.1	37.2
	CH_4	13.4	5.6	4.5	5.3	5.4	5.4	40.3
Системы сбора, хранения, использования навоза и помета	Прямой выброс N_2O	8.5	4.1	4.0	4.0	3.9	3.6	42.4
	Косвенный выброс N_2O	7.0	3.2	3.1	3.3	3.4	3.2	45.7
Выращивание риса	CH_4	0.9	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	66.7
	Прямой выброс N_2O	85.3	46.4	43.5	51.2	50.8	52.6	61.7
Выбросы от сельскохозяйственных земель	Косвенный выброс N_2O	17.1	6.8	6.6	8.5	8.4	8.7	50.9
	CO_2	10.2	1.0	0.8	0.8	1.0	0.9	8.8
Известкование почв и внесение мочевины	CO_2	10.2	1.0	0.8	0.8	1.0	0.9	8.8
Всего		247.5	118.8	106.2	113.1	112.9	114.2	46.1

от водной и ветровой эрозии, повысить ее продуктивность, улучшить физические, химические и биологические свойства почвы; использование дифференцированных севооборотов для борьбы с сорняками, болезнями и вредителями, улучшения продуктивности земель под воздействием отдельных культур; эффективное управление пастбищными угодьями и др. Комплексное управление почвой, водными и биологическими ресурсами способствует сохранению, улучшению и повышению эффективности их использования.

Наиболее энергоемким технологическим процессом является обработка почвы, на которую в среднем расходуется 30–40% потребляемой энергии [13]. Снижение этих затрат, например, использование разработанного авторами предплужника, кинематически связанного с поворотной рамой плуга, позволяет уменьшить как энергетические затраты, так и выбросы ПГ на 10% при проведении вспашки.

Исследования по влиянию обработок почвы на запасы гумуса, проведенные в черноземной зоне Сибири (Россия), показали, что оптимальной является дифференцированная обработка почвы, при которой содержание гумуса в слое 0–30 см за 39 лет изменилось с 8.12 до 8.56%. Использование постоянной отвальной обработки почвы приводило к снижению содержанию гумуса в слое 20–30 см с 7.73 до 7.23%, однако его увеличение отмечено в слое 0–20 см с 8.38 до 8.52%. Безотвальная и нулевая обработки приводили к повышению содержания гумуса в слое 0–10 см, однако привели к снижению содержания гумуса в слоях почвы как в 0–20 см, так и в 0–30 см. Исходя из этого, можно сделать вывод, что переход на технологии No-Till в этой зоне для усиления секвестрации углерода в черноземной почве является малоэффективным приемом, хотя это и способствует энергоэффективности вследствие снижения затрат на пахоту [14–18].

Снижению выбросов парниковых газов способствует также сокращение потребления ископаемых топливно-энергетических ресурсов, применение возобновляемых источников энергии в органическом сельском хозяйстве, прежде всего солнечной и ветряной энергии. Использование жидкого биотоплива (биодизеля из масличных культур) или в смеси с обычным топливом однозначно имеет преимущества по сравнению с обычным топливом по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу. Кроме того, с одной стороны, углекислый газ поглощается при выращивании самих масличных культур, но, с другой стороны, их возделывание приводит к прямым и косвенным выбросам парниковых газов. Важное значение имеет фактор смены землепользования. Поэтому масличные культуры в умеренном климате также нужно выращивать с применением органических технологий

для удовлетворения собственных энергетических потребностей.

Аналогичные данные получены при оценке эмиссии N₂O и CO₂ на плантациях тропической масличной пальмы. Установлено существенное влияние почвенных условий выращивания, при этом применение удобрений не всегда приводило к увеличению эмиссии ПГ [19].

На основании многолетних исследований был оценен баланс углекислого газа в севооборотах с сахарной свеклой [20]. Авторы рассчитали, что этот показатель складывался из поглощения CO₂ основной и побочной продукцией, растительными остатками, а также закрепления при гумификации навоза, фиксации карбонатами почвы, поступления с осадками из атмосферы (приходные статьи); разложения растительных остатков и гумуса, дыхания почвы (увеличивались при внесении минеральных удобрений), известкования, разложения части навоза, выноса поверхностными и подземными водами, минерализации гумуса (расходные статьи). Сухое вещество сахарной свеклы при урожайности 55.0–60.0 т/га в условиях ЦЧР (Россия) способно связывать основной продукцией (корнеплодами) ≈24.8–28.5 т CO₂/га. Основные агроприемы возделывания культуры (запашка ботвы и растительных остатков, известкование, внесение навоза и минеральных удобрений) способствуют эмиссии в атмосферу порядка 8.7–11.7 т CO₂/га/год, при этом происходит связывание в органическом веществе почвы (при условии внесения навоза) порядка 4.4–11.2 т CO₂/га/год (по разным оценкам). Снижение минерализации запасов гумуса, органических удобрений, растительных остатков с помощью рациональной обработки почв, внесения научно обоснованных доз удобрений, оптимизации почвенной кислотности способно снизить эмиссию CO₂ в почвах свекловичных севооборотов. По предварительным расчетам, баланс углекислого газа при возделывании и переработке сахарной свеклы в ЦЧР является либо отрицательным (т.к. большое количество CO₂ связывается продукцией), либо близким к равновесному, т.е. свекловодство не является загрязнителем атмосферы выбросами CO₂, а при определенных условиях оно, возможно, соответствует требованиям карбонового земледелия.

Значительное количество исследований выполнено для оценки влияния различных энергоэффективных агротехнологий и улучшенных “зеленых” удобрений на эмиссию парниковых газов из почвы в агроэкосистемах. Например, применение азотных удобрений с добавлением гуминовой кислоты приводит к контролируемому высвобождению азота, что сопровождается повышением урожайности и усвояемости азота, повышением эффективности

использования азота и сокращением выбросов парниковых газов [21].

Детальный обзор ретроспективного применения удобрений в Китае приведен в работе [22]. Была проведена количественная оценка выбросов ПГ при производстве и внесении азотных минеральных удобрений при выращивании пшеницы и кукурузы в различных провинциях и сельскохозяйственных регионах Китая. Авторами показано, что в период 2015–2017 гг. усредненные дозы азота под пшеницу и кукурузу на высокогорных полях Китая были равны 222 и 197 кг/га соответственно. При этом в целом было внесено под эти культуры 12.63 млн т/год. В масштабе страны выбросы парниковых газов, связанные с производством минеральных азотных удобрений, оценивались в 41.44 и 59.71 млн т CO_2 /год для изученных культур. В то же время при внесении этих удобрений эмиссия N_2O вследствие процессов денитрификации, по оценкам авторов, составила 35.82 и 69.44 Gg/год. Сделан вывод, что производство и применение минеральных азотных удобрений для пшеницы и кукурузы на китайских пахотных землях является важным источником выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве.

Был также проведен полевой эксперимент для изучения влияния стабилизированного азотного удобрения в сочетании со свиным навозом на урожайность риса и выбросы закиси азота (N_2O) и метана (CH_4) [23]. Были изучены 4 способа применения различных комбинаций минеральных и органических удобрений: мочевины (U), свиной навоз (PM), $PM + U$, $PM +$ стабилизированное азотное удобрение (мочевина + 1% NBPT (N -(n -бутил) тиофосфорный триамид), 1% PPD (фенилфосфородиамидат) и 2% DMPP (3,4-диметилпиразолфосфат)) или $PM + U + I$. Показано, что по сравнению с вариантом PM , вариант $PM + U$ значительно увеличивал совокупные выбросы N_2O , но при внесении $PM + U + I$ не выявлено существенных отличий от PM по кумулятивным выбросам N_2O . Это свидетельствовало, что применение стабилизированного азотного удобрения в сочетании с PM эффективно снижало выбросы N_2O . Суммарная эмиссия CH_4 при внесении $PM + U + I$ была меньше, чем при внесении PM и $PM + U$. Следовательно, стабилизированное азотное удобрение в сочетании с PM может эффективно снижать и выбросы CH_4 . Урожайность риса в вариантах $PM + U$ и $PM + U + I$ существенно не отличалась от урожайности в вариантах внесения U и PM . Соответственно, сделан вывод, что местное традиционное внесение азота и возврат PM могут обеспечить достаточное количество азота для роста риса. Суммарный размер эмиссии ПГ в масштабе производства (yield-scaled emissions, YSE) в варианте PM был самым высоким, в то время

как в варианте $PM + U + I$ произошло значительное снижение величин YSE .

Выявлено, что эмиссия N_2O из агроземов никогда не превышала 5 мг N_2O /га/сут, если почва содержала <10 мг доступного $N_{\text{мин}}$ /кг почвы. Внесение в почвы азота с удобрениями практически всегда приводило к увеличению кумулятивного потока N_2O из почв. Максимально большие кумулятивные потоки N_2O из почв были отмечены при внесении навоза крупного рогатого скота, что было связано не только с поступлением в почвы большого количества доступного N , но также и с поступлением доступного C и влаги. Внесение в почвы навоза приводило к увеличению пространственной неоднородности эмиссии N_2O из почв, что существенно увеличивало ошибку измерений. Эмиссионный фактор (Φ), рассчитанный как доля азота, потерянного в форме N_2O , в % от общего количества азота, внесенного с удобрениями, для дерново-подзолистой супесчаной почвы в разные годы исследования был наибольшим для почв, получающих высокие дозы N с минеральными удобрениями (от $N90$) и варьировал в разные годы от 0.5–1.8%. При внесении зеленых или органических удобрений Φ в проведенных экспериментах не превышал 0.62% [24].

Резюмируя этот раздел, следует подчеркнуть, что в современной литературе накоплен огромный массив данных оценки эмиссии ПГ при выращивании различных культур в различных регионах мира. В рамках данного обзора можно отметить, что рациональное внесение минеральных удобрений так же, как и их различных комбинаций с органическими, приводит к увеличению урожаев выращиваемых культур и росту продуктовой безопасности. В то же время применение удобрений приводит практически повсеместно к во многом неизбежному росту эмиссии различных парниковых газов. Например, при внесении азотных удобрений происходит увеличение углерод- и азотминерализующей способности почвенного органического вещества ($ПОВ$). Это сопровождается ростом эмиссии как углекислого газа, так и оксидов азота. Аналогичный эффект проявляется при денитрификации как внесенного азота минеральных удобрений, так и минерализуемого азота $ПОВ$. В рисовых агроэкосистемах выбросы этих ПГ дополняются эмиссией метана. В целом агроэкосистемы являются чистым источником CO_2 . Поэтому вопрос о связи величин выбросов ПГ и энергоэффективности в агроэкосистемах обязательно должен рассматриваться в контексте роста урожайности выращиваемых культур.

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ

Во всем мире ежедневно образуется большое количество сельскохозяйственных отходов (*AWs*) в связи с ростом населения, численность которого в 2022 г. превысила 8 млрд. Необходимо разработать стратегию их своевременного использования. Это также повысит устойчивость сельского хозяйства и продовольственную безопасность. *AWs* генерируются из различных источников, среди которых растительные остатки, агропромышленный комплекс, животноводство и аквакультура. Основным компонентом растительных остатков и агропромышленных отходов является целлюлоза (наиболее распространенный биополимер), лигнин и гемицеллюлоза (лигноцеллюлозная биомасса). Отходы и их переработка являются глобальной проблемой. Необходимо решение, основанное на рециклинге. При этом рециклинг может быть направлен либо на получение энергии, либо на возврат в биогеохимический круговорот биофильных элементов, накопленных в отходах. Это будет способствовать как энергоэффективности сельского хозяйства в целом, так и снижению выбросов ПГ [25].

Используя в качестве примера систему накопления сельскохозяйственных отходов в провинции Цзянси (Китай), было исследовано, в какой степени данные оценки потоков ресурсов и показатели, характеризующие снижение выбросов парниковых газов, могут быть использованы для выработки политических мер в области устойчивого использования агроотходов [26]. Показано, что, когда доля агроотходов увеличивается с 4.41 до 8.61%, текущий потенциал снижения выбросов парниковых газов впоследствии увеличивается примерно в 3.3 раза. При этом максимальный потенциал снижения выбросов ПГ может составлять 16.44×10^8 т CO₂-экв в этой провинции.

Сельскохозяйственные отходы в значительной мере связаны с биоразлагаемым бытовым мусором. В этом мусоре запасается большое количество азота. Было отмечено, что биоразлагаемый бытовой мусор, например, в Китае в основном включал пищевые отходы, макулатуру и древесную щепу в количестве 31.56, 29.55 и 6.45×10^6 т/год соответственно. Поэтому запасы азота в Китае в этих отходах составляли 65.31×10^4 , 6.80×10^4 и 3.81×10^4 т/год. Запасы азота в пищевых отходах давали 86% от общего объема запасов азота в биоразлагаемом бытовом мусоре, что эквивалентно 11% от объема фактического поглощения минеральных азотных удобрений (6.20×10^6 т/год) сельскохозяйственными растениями в Китае [27].

Еще одной важной проблемой является рециклинг животноводческих отходов. Для этого важны оценки содержания азота (N) и фосфора (P) в твердом органическом удобрении, получаемом

из навоза крупного рогатого скота, например, на Северо-Западе России [28]. В исследовании сравнивали следующие подходы: нормативные показатели для России, данные, рассчитанные методом баланса массы, средние экспериментальные данные содержания N и P в навозе крупного рогатого скота, анализ содержания азота и фосфора в органическом удобрении. Рассматривали выбранный животноводческий комплекс с 1250 головками и выходом навоза 70 т/сут. Установлена разница между расчетными и экспериментальными данными, которая составляла максимум 10%, но экспериментальные данные и установленные нормы отличались более чем на 15%. Следовательно, даже увеличение содержания питательных веществ в органическом удобрении на 10% позволяет увеличить площади удобряемых сельскохозяйственных угодий с 451 до 526 га.

Для проведения расчета выбросов парниковых газов от животноводческих ферм необходимы исходные данные о поголовье скота. Расчеты были проведены для животноводческой фермы, в которой имеется 6 тыс. голов КРС [29]. Расчетным способом определена эмиссия метана от систем хранения биомассы КРС на животноводческой ферме, которая составила 27 600 кг CH₄/год. В пересчете на CO₂-экв эмиссия метана была равна 579.6 т/год. Эмиссия N₂O при хранении и использовании биомассы для изученной животноводческой фермы была равна 845.17 N₂O кг/год. В пересчете на CO₂-экв это составило 262.0 т/год. Сумма выбросов CH₄ и N₂O в CO₂-экв от систем сбора и хранения биомассы для этой фермы составила 841.6 т CO₂-экв/год.

По разработанной авторами программе расчета выхода биогаза из отходов животноводческих ферм рассчитано суточное производство биогаза. Для данной животноводческой фермы суточный выход биогаза составил 9850 м³/сут или 3.4 млн м³/год.

Переработка органических отходов в сельском хозяйстве способствует циркулярной экономике, возвращая в почву питательные вещества и уменьшая потребность в удобрениях на минеральной основе [30]. Также использование навоза позволяет создавать органические системы с регулируемым и оптимизируемым потоком ПГ [31]. В табл. 8 показаны коэффициенты ПГ для пастбищных экосистем.

Основной вклад в образование отходов в России создают пищевая и перерабатывающая промышленности. При анализе данных Министерства сельского хозяйства за 2015–2017 гг. выявлено, что на 15 635 тыс. т сельскохозяйственных культур приходится ≈ 335 тыс. т первичных и вторичных отходов, получаемых в результате технологических процессов преобразования сырья в пищевую

Таблица 8. Коэффициенты выбросов парниковых газов (ПГ) для пастбищных экосистем, ед. CO₂-экв/кг

Приход	ед. CO ₂ -экв/кг	ПГП, кг CO ₂ -экв/ед.	Источник
Трудозатраты	ч	0.36	[32]
Механизмы	МДж	0.071	[33]
Электричество	кВт	0.608	[24]
Топливо			
Дизель	л	2.76	[33]
Удобрения			
навоз	кг	0.040–0.063	[35–37]
муниципальные компосты	кг	0.031	[38]
азот (N)	кг	5.29	[39]
фосфор (P ₂ O ₅)	кг	0.52	[39]
калий (K ₂ O)		0.38	[39]
Средства защиты растений			
инсектициды	кг	5.1	[40]
фунгициды	кг	3.9	[41]
гербициды	кг	6.3	[41]
Оросительная вода	м ³	0.27	[32]
Пластиковые трубы	кг	2.2	[42]

Таблица 9. Количество энергии, образующейся при сжигании разных видов растительного сырья

Вид растительного сырья	Масса отходов, млн т/год	Теплота сгорания, МДж/т	Количество образующейся энергии при сгорании общей суммы отходов, млн ГДж/год
Лузга подсолнечника	7.1	17 000	12.08
Лузга рисовая	1.9	13 300	25.92
Остатки кукурузы	2.6	14 650	38.18
Солома	41.4	15 700	65.09
Хлопчатник	7.7	14 530	1.118
Зернобобовые	65.1	14 650	9.54
Итого			151.93

продукцию [43]. Авторами приведены данные расчетов и подбора оптимального варианта использования отходов сельского хозяйства с получением наибольшей энергоэффективности и минимальными показателями углеродного следа.

Одним из альтернативных вариантов использования отходов является сжигание сухого остатка в качестве топливных палет. Были рассмотрены физические свойства солоmistых остатков. Плотность солоmistого остатка массой 400 кг и объемом в 1 м³ будет составлять 0.4 кг/л. При этом масса сухого вещества составит 100 кг. Были найдены данные теплоты сгорания (МДж/т) для представленных видов остатков растительного сырья. Коэффициент пересчета выбросов CO₂ при сжигании древесных отходов составляет 0.068 т CO₂/т древесных отходов [44]. На основе расчетов показано, что

суммарное количество образующейся энергии при сгорании общей суммы отходов может составить 151.93 млн ГДж/год (табл. 9).

Применив полученные данные, можно рассчитать, что сжигание 1 т растительного сырья (солоmistых остатков) соответствует сжиганию 424 м³ природного газа — невозобновимого ископаемого топлива. Авторами проведен пересчет в энергетические единицы на основе коэффициентов выбросов диоксида углерода для разных видов сжигаемого топлива (табл. 10).

Стоит учесть, что сжигание отходов сельского хозяйства дает нулевой ПГП, т.к. CO₂, поступивший в воздух при горении, ранее был поглощен из атмосферы в процессе роста.

Еще одним из возможных методов переработки отходов сельского хозяйства является анаэробное

Таблица 10. Сравнительная оценка выбросов CO₂ при сжигании природного газа и растительного сырья с учетом коэффициентов выбросов

	Количество отходов, т	Природный газ, м ³
Ед. измерения	1	424
Коэффициент выброса CO ₂ (т/ед.)	100	54.4
Общее количество выбросов CO ₂ , т	100	23 065

сбраживание. Данный процесс представляет собой уменьшение исходного объема отходов с использованием биологической переработки в условиях безвоздушного пространства с последующим образованием биогаза. Анаэробное сбраживание зачастую связано с рекуперацией метана (CH₄) и сжиганием с целью получения энергии.

Таким образом, на 200 млн т отходов сельского хозяйства приходится 1739.7 млн МВт/ч/год чистой энергии (с учетом обслуживания самого комплекса теплом и электроэнергией, а также возможностью продажи потребителю). Средняя выработка ТЭЦ составляет порядка 3.5 млрд кВт ч/год [44]. Следовательно, показатели выработки электроэнергии меньше в 4 раза для биокомплекса, однако в генерации энергии участвует растительное сырье, а не ископаемое топливо, что позволяет в значительной мере использовать объем отходов сельскохозяйственного сырья. Проведенные расчеты показали, что наиболее энергоэффективными способами являются сжигание топливных брикетов из отходов (≈ 152 ПВт ч/год), а также генерация биотоплива (1740 ГВт ч/год).

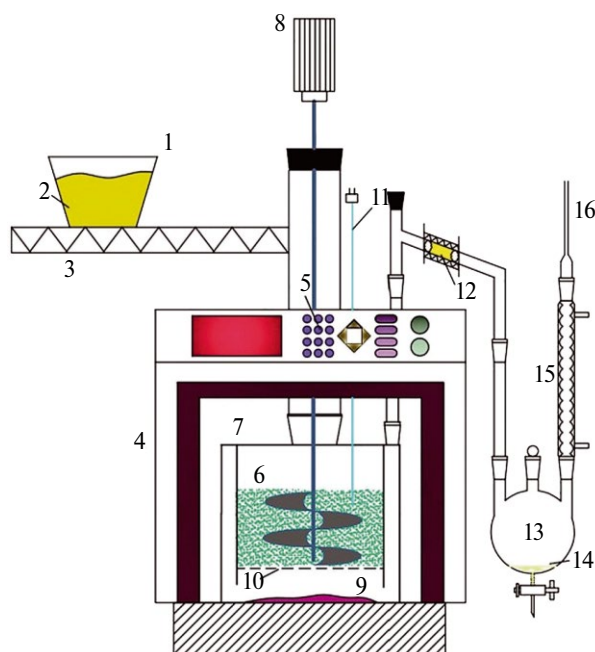
При этом показано, что можно дополнительно использовать каталитические добавки, и это положительно влияет на процесс горения, а также снижает эмиссии поллютантов [45]. Авторы исследования рассчитали, что применение предлагаемых каталитических добавок (CaO и KMnO₄) значительно повышает среднюю температуру в камере сгорания, делает процесс горения более эффективным и более полным с уменьшением выбросов оксидов углерода. В лучшем варианте добавление CaO уменьшило выбросы CO на 41%, и аналогичным образом добавление KMnO₄ в гранулы из биомассы уменьшило выбросы CO на 45%.

Еще одним примером рециклинга является производство биочара из агроотходов. Рассмотрим один из многочисленных примеров. Например, технология микроволновой торрефикации представляет собой новый метод нагрева органической массы, который позволяет теплу равномерно проникать в сырье [46].

Солома, навоз и другие сельскохозяйственные отходы, обрабатываемые с использованием процессов торрефикации, могут быть использованы в качестве сырья для производства биоугля. В свою очередь различные виды биоугля имеют широкий спектр применения, начиная от ремедиации загрязненных почв и заканчивая созданием новых удобрений на его основе. Это представляет энергоэффективным приемом снижения эмиссии ПГ.

Типичная экспериментальная система для микроволновой торрефикации показана на рис. 1.

Система включает в себя микроволновую печь, реактор, конденсатор, питатель, устройство подачи газа, термопару и жидкостный фракционирующий [47]. Перед запуском процесса исходное сырье добавляют в реактор, через который продувают газ-носитель для удаления воздуха из устройства. В других модификациях инертный газ продувает пиролизный пар в конденсатор газа. Процесс легко контролируется и не требует устройств для смешивания или псевдооживления. Кроме того, технология микроволновой торрефикации обладает высокой масштабируемостью и подходит для переработки многих видов биомассы в больших объемах [48, 49].

**Рис. 1.** Принципиальная схема системы торрефикации с использованием микроволновой печи [50].

ОБСУЖДЕНИЕ

Производительность сельского хозяйства основана на процессе фотосинтеза, который формирует первичную продукцию. В производственной сельскохозяйственной сфере считается, что сочетание технологий по сокращению выбросов и увеличению накопления углерода в почве может позволить этому сектору достичь чистых отрицательных выбросов при сохранении высокой производительности. Однако установлено, что агроэкосистемы являются чистым источником эмитируемых ПГ [51, 52]. Современные агротехнологии возделывания пропашных культур ответственны за $\approx 5\%$ выбросов парниковых газов в США и ЕС. В ряде стран (Россия, Китай, Индия и др.) эти величины даже больше. Чтобы сократить выбросы ПГ, значительные усилия сосредоточены на внедрении таких приемов как No-tillage, внесении больших доз органических и “зеленых” удобрений и в целом — на переходе к органическому низкоуглеродному земледелию. При этом потенциалом сокращения выбросов в значительной степени пренебрегали. Энергоэффективность также не всегда рассматривали в качестве ключевого процесса управления эмиссиями ПГ. По оценкам [53], а также других исследователей [54–58], благодаря сочетанию инноваций в цифровом сельском хозяйстве, генетике сельскохозяйственных культур и микробов, а также рекультивации возможно сокращение выбросов парниковых газов на 71% (1744 кг CO_2 -экв/га) при выращивании пропашных культур в течение следующих 15 лет (рис. 2).

Важно подчеркнуть, что рост величин энергоэффективности будет сопровождаться сокращением выбросов ПГ. Такая стратегия может снизить барьер

для широкого внедрения, пройдя несколько этапов со значительными улучшениями. В конечном итоге это будет способствовать поддержке сельским хозяйством своей важнейшей социальной функции обеспечения общества продовольствием, в то же время принося экологические выгоды.

Одной из важнейших практик реализации такого подхода является производство и широкое применение необходимого ассортимента комплексных удобрений для сельского хозяйства [59]. Основные преимущества новых форм комплексных удобрений заключаются в первую очередь в сбалансированности минерального питания растений, которую очень трудно обеспечить при использовании простых, стандартных форм минеральных удобрений. Во-вторых, обеспечивается снижение энергозатрат на 65–70% на внесение удобрений в почву за счет уменьшения проходов технических средств по полю. Это особенно актуально в весенний период, т.к. при этом существенно снижается переуплотнение почвы, неизбежно возникающее при использовании энергонасыщенных тракторов и машин для внесения удобрений. Кроме этого, обеспечивается более высокая равномерность распределения удобрений по поверхности почвы, что определяет лучшие условия минерального питания растений. Переход в аграрной отрасли на широкомасштабное применение новых форм комплексных минеральных удобрений позволит вывести растениеводческую отрасль сельского хозяйства на новый, более высокий и качественный уровень развития и обеспечит дальнейшее повышение продуктивности сельскохозяйственных культур без увеличения в целом потребности в удобрениях. Важным фактором при этом является повышение энергоэффективности агроэкосистем в целом.

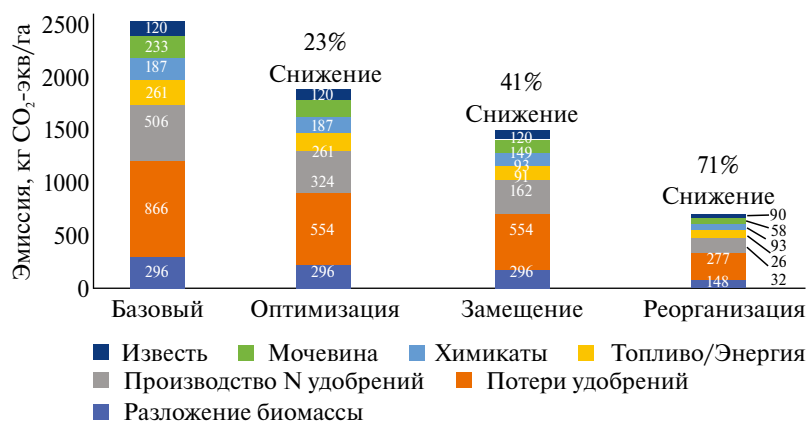


Рис. 2. Технические усовершенствования способствуют сильному снижению выбросов ПГ при производстве зерна. Числа — кг CO_2 -экв/га и разделены источником выбросов. Этапы (оптимизация, замещение и реорганизация) различаются по технической готовности стимулирующих инноваций. Реализация этапа оптимизации в значительной степени возможна с использованием существующих технологий, в то время как технологии этапа замещения могут быть доступны через 2–5 лет, технологии этапа реорганизации — через 5–15 лет.

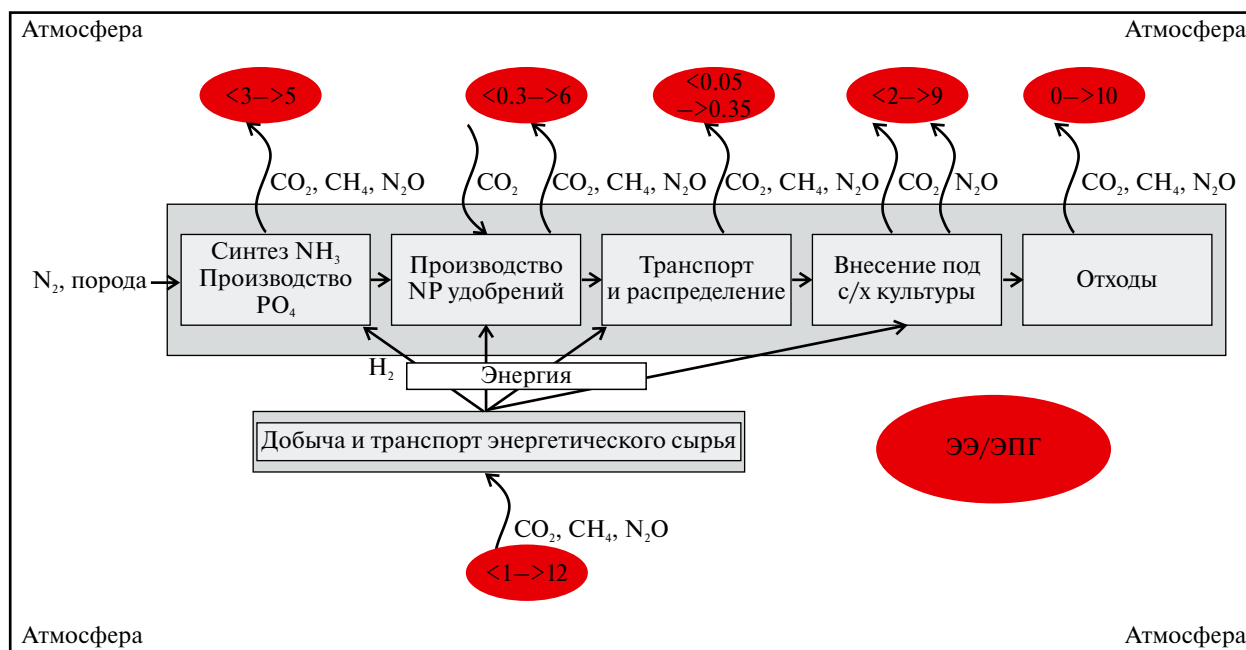


Рис. 3. Оценка жизненного цикла выбросов парниковых газов при производстве и использовании азотных и фосфорных удобрений и взвешенные коэффициенты выбросов для основных процессов. Атмосферный азот (N_2) соединяется с водородом с использованием энергии, получаемой из ископаемого топлива. Полученный NH_3 реагирует с CO_2 , азотной, соляной или фосфорной кислотой с получением различных удобрений. Эти удобрения транспортируются различными способами перед внесением на пахотные земли. Сплошная линия – расход материалов и N-удобрений, пунктирная – обмен ПГ между цепочкой производства и использования удобрений, включая переработку агроотходов, и атмосферой.

При этом основополагающей стратегией проведения исследований эмиссии углекислого газа как мере энергоэффективности на всех этапах для системы удобрений “производство – логистика – внесение – утилизация отходов” является оценка жизненного цикла как энергии, так и эмиссии ПГ (рис. 3).

Рассмотрим жизненный цикл, коэффициенты выбросов ПГ и использования различных источников энергии в системе “производство – логистика – внесение – утилизация отходов”. На основании данных [60], на каждую 1 т азота, произведенного и используемого на пахотных землях в Китае как в составе простых удобрений (мочевина), так и сложных (например, диаммофоса), выбрасывается в среднем 13.5 т CO_2 -экв. При этом наибольшие величины эмиссии ПГ наблюдают в технологических процессах синтеза аммиака. Это связано с энергоемким характером процесса производства минеральных удобрений, так же и в целом с химической промышленностью, где технологические процессы требуют высоких температуры и давления. Кроме того, важное значение имеет энергоемкость исходных теплоисточников. Например, уголь, используемый в ряде стран как основной источник энергии, имеет низкую энергоэффективность. Установки, работающие на угле, имеют коэффициент выбросов >5 т CO_2 -экв/т NH_3-N^{-1}

по сравнению с <3 т CO_2 -экв/т NH_3-N^{-1} для установок, работающих на природном газе [60–63]. Также имеет значение и масштаб производства. Например, при использовании того же источника энергии крупномасштабные установки выделяют несколько меньше ПГ на единицу N, чем средне- или мелкомасштабные установки. Следующий этап включает блок “производство удобрений”, направленный на преобразование аммиака и фосфатов в различные N-P-удобрения; процессы имеют взвешенный коэффициент выбросов 0.9 т CO_2 -экв/т N^{-1} , но широкий диапазон от 0.3 до >6 т CO_2 -экв/т N^{-1} [1, 52].

Даже в современных условиях уголь обеспечивает 86% энергии, потребляемой в вышеуказанных процессах. Выбросы метана, связанные с добычей угля, оказывают эффект глобального потепления в размере 11.4 г CO_2 -экв/МДЖ (10^6 Дж) по сравнению с <2 г CO_2 -экв/МДЖ при использовании природного газа или нефти [60, 62].

Взвешенный коэффициент выбросов может составлять 2.2 т CO_2 -экв/т удобрений при добыче и транспортировке ископаемого топлива, используемого в промышленности по производству минеральных удобрений (включая 1.8 т CO_2 -экв/т N^{-1} от добычи энергии, используемой для синтеза аммиака, и 0.4 т CO_2 -экв/т N^{-1} при его использовании

для производства, например, N-P-удобрений). Для условий Китая это составляет 16% от общего объема выбросов $13.5 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$ [60]. С учетом различных источников сырья эти величины могут широко варьировать: $<1\text{--}>12 \text{ т CO}_2\text{-экв/т произведенных и использованных удобрений}$.

В процессе логистики и при транспортировке азотных и фосфорных удобрений коэффициенты эмиссии составляют в среднем $0.1 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$ (разброс величин — от $<0.05\text{--}>0.25$).

Оценки эмиссии ПГ при выращивании сельскохозяйственных культур значительно варьируют ($<2\text{--}>9 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$). Например, размеры денитрификации азота могут быть в пределах от 5 до 90% от содержания минерального азота в почвах агроэкосистем [51]. Значительно варьируют также выбросы аммиака из щелочных почв, размеры вымывания нитратов и величины сухих и влажных выпадений. Для условий Китая коэффициент эмиссии составляет $5.2 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$, включая прямые выбросы N_2O ($4.3 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$) в результате нитрификации и денитрификации в почве и косвенные выбросы ($0.9 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$) [60].

В конце цепочки находятся выбросы парниковых газов при переработке и/или использовании агроотходов. Как отмечено выше, на переработку отходов существенно влияют используемые технологические процессы, имеющие очень большой разброс величин их энергоэффективности. Это сказывается и на величинах относительной эмиссии ПГ (от практически отсутствия до высоких величин (рис. 3)). Следовательно, величины эмиссии ПГ являются мерилем энергоэффективности в системе жизненного цикла минеральных удобрений “производство — логистика — внесение — утилизация отходов”.

В контексте глобального изменения климата и с учетом увеличения антропогенных выбросов парниковых газов устойчивость сельскохозяйственных систем может быть повышена за счет повышения эффективности использования энергоресурсов [64, 65]. Рассматриваются различные агротехнологические приемы сокращения выбросов ПГ и увеличения секвестрации углерода. При этом потенциалом сокращения выбросов в значительной степени пренебрегали. Энергоэффективность также не всегда рассматривали в качестве ключевого процесса управления эмиссиями ПГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в обзоре материалы свидетельствуют о ключевой роли энергоэффективности на протяжении всего жизненного цикла в системе “производство — логистика — внесение — утилизация отходов”. Величины эмиссии ПГ при этом выступают лишь в качестве меры данной энергоэффективности.

Далее, переработка агропромышленных отходов и сырья с помощью различных процессов (компостирование, производство биоэнергии, биоуглей, биогеохимическое рециклирование питательных элементов) может также дать существенное снижение эмиссии ПГ. Это также может потенциально привести к выбросам парниковых газов в результате процессов компостирования и транспортировки материалов. Однако эти процессы дают положительный эффект как непосредственно за счет связывания углерода, так и косвенно благодаря предотвращению последствий удаления отходов, улучшению качества почвы и минимизации потерь почвы.

В целом увеличение энергоэффективности в рассматриваемом жизненном цикле удобрений от производства до утилизации агроотходов может существенно снизить роль сельскохозяйственного производства в эмиссии парниковых газов (ПГ). Следует особо подчеркнуть, что снижение потенциала эмиссии ПГ при производстве удобрений зависит от источника используемой энергии, и перевод энергоустановок с угля на газ, и тем более на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), будет наиболее значимым. При выращивании сельскохозяйственной продукции большую роль играют факторы, связанные с применением современных систем земледелия, основанных на точном внесении удобрений, использовании электронных почвенных карт и повышении эффективности использования удобрений, в частности, азота и фосфора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Integrated Annual report of PJSC PhosAgro for 2021. 2022. 360 p. Available from: www.phosagro.ru
2. Тихомиров А.В. Концепция развития систем энергообеспечения и повышения энергоэффективности использования ТЭР в сельском хозяйстве // Вестн. ВИЭСХ. 2016. № 1(22). С. 11–17.
3. Колпаков А.Ю. Энергоэффективность: роль в сдерживании выбросов углекислого газа и определяющие факторы // Пробл. прогнозирования. 2020. № 6. С. 141–154. DOI: 10.47711/0868-6351-183-141-153
4. Ouyang X., Fang X., Cao Y., Sun C. Factors behind CO₂ emission reduction in Chinese heavy industries: Do environmental regulations matter? // Energy Policy. October 2020. № 145. 111765. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111765>
5. Снакин В.В. Динамика глобальных природных процессов и учение о биосфере В.И. Вернадского // Жизнь Земли. 2023. Т. 45. № 1. С. 27–38. DOI: 10.29003/m3147.0514-7468.2023_45_1/27-38
6. Гильманова Р.Б., Осинцев К.В. Разработка триггерационного цикла химических предприятий

- тиях по производству азотных удобрений // Молодой исследователь: Мат-лы 2-й научн. выстав-ки-конф. научн.-техн. и творч. работ студентов. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2015. 515 с. ISBN 978-5-696-04703-4166-170
7. *Шатаева А.Л., Ташикова И.Н.* Оценка эмиссий парниковых газов производства аммиака и выявление направлений разработки и реализации климатических проектов // Химия. Экология. Урбанистика: мат-лы Всерос. научн.-практ. конф. (с междуна-род. участием). В 4-х т. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2022. Т. 1. С. 146–150. URL: https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2022/06/Himiya.-Ekologiya.-Urbanistika.-Tom_1.pdf
8. Информационно-технический справочник по наи-лучшим доступным технологиям 2–2019 “Производ-ство аммиака, минеральных удобрений и неоргани-ческих кислот”. 2019. URL: <http://burondt.ru/index/its-ndt.html> (дата обращения: 08.03.2022).
9. *Иовлев Г.А., Голдина И.И.* Сельское хозяйство, транс-порт и углеродные проблемы // Транспорт. Транс-порт. средства. Экол. 2022. № 1. С. 25–35. DOI: 10.15593/24111678/2022.01.04
10. *Meisterling K., Samaras C., Schweizer V.* Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat // J. Clean Prod. 2009. № 17. P. 222–230. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.04.009
11. *Тихомиров А.В., Маркелова Е.А., Ухано-ва В.Ю.* Топливо-энергетические ресурсы на ос-нове энергосберегающих технологий и технических средств в сельском хозяйстве // Сел.-хоз. машины и технол. 2015. № 5. С. 43–48.
12. *Ахметишина Л.Г.* Возможности российского сельско-го хозяйства в снижении выбросов парниковых газов и адаптации к климатическим изменениям // Вестн. Алтай. акад. эконом. и права. 2022. № 1(4). С. 5–14. URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=2129> (дата об-ращения: 13.12.2022).
13. *Семенова Е.И., Семенов Ф.В.* Энергосбереже-ние и повышение энергетической эффективно-сти // Эконом., труд, управл.-е в сел. хоз-ве. 2020. № 3(60). С. 86–91. DOI: 10/33938/203-85
14. *Демина О.Н., Еремин Д.И.* Влияние минеральных удобрений на микрофлору пахотного чернозема ле-состепной зоны Зауралья // Вестн. КрасГАУ. 2020. № 2(155). С. 63–71. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-2-63-71
15. *Еремин Д.И., Ахтямова А.А.* Минерализация гуму-са в пахотном черноземе при использовании мине-ральных удобрений // Земледелие. 2018. № 7. С. 16–18. DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10704
16. *Еремин Д.И., Груздева Н.А., Еремина Д.В.* Изменение гумусового состояния серых лесных почв восточной окраины Зауральского плато под действием длитель-ной распашки // Почвоведение. 2018. № 7. С. 826–835. DOI: 10.1134/S0032180X18070110
17. *Рзаева В.В., Еремин Д.И.* Влияние основной обра-ботки почвы на содержание гумуса в черноземе вы-щелоченном // АгроФорум. 2021. № 6. С. 38–40.
18. *Еремин Д.И., Фисунов Н.В.* Гумусовое состояние чер-нозема при использовании систем основной обра-ботки почвы // Эпоха науки. 2020. № 24. С. 37–45. DOI: 10.24411/2409-3203-2020-12408
19. *Sakata R., Shimada S., Arai H., Yoshioka N., Yoshioka R., Aoki H., Kimoto N., Sakamoto A., Melling L., Inubushi K.* Effect of soil types and nitrogen fertilizer on nitrous ox-ide and carbon dioxide emissions in oil palm planta-tions // Soil Sci. Plant Nutr. 2014. P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.2014.960355>
20. *Минакова О.А., Косякин П.А.* Баланс CO₂ при возде-лывании сахарной свеклы в Российской Федерации (обзор) // Сахар. 2022. № 3. С. 32–37. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2022-3-32-37>
21. *Guo Y., Ma Z., Ren B., Zhao B., Liu P., Zhang J.* Effects of humic acid added to controlled-release fertilizer on summer maize yield, nitrogen use efficiency and green-house gas emission // Agriculture. 2022. № 12. P. 448. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040448>
22. *Chai R., Ye X., Ma C., Wang Q., Tu R., Zhang L., Gao H.* Greenhouse gas emissions from synthetic nitro-gen manufacture and fertilization for main upland crops in China // Carbon Balance Manag. 2019. V. 14. 20. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0133-9>
23. *Wu K.K., Gong P., Zhang L.L., Wu Z.J., Xie X.S., Yang H.Z., Li W.T., Song Y.C., Li D.P.* Yield-scaled N₂O and CH₄ emissions as affected by combined application of stabilized nitrogen fertilizer and pig manure in rice fields // Plant Soil Environ. 2019. № 65. P. 497–502.
24. *Рижия Е.Ю., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Балашов Е.В.* Долгосрочный мониторинг прямой эмиссии закиси азота из суглинисто-песчаных дерново-подзолистых почв // Мат-лы II Международ. научн. конф. “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”, посвящ. памяти акад. Е.И. Ермакова. СПб., 02–04 октября 2019 г. СПб.: АФИ, 2019. С. 117–122.
25. *Macura B., Johannesdottir S.L., Piniewski M., Had-daway N.R., Kvarnstrom E.* Effectiveness of ecotechnol-ogies for recovery of nitrogen and phosphorus from an-aerobic digestate and effectiveness of the recovery prod-ucts as fertilisers: a systematic review protocol // Environ. Evid. 2019. V. 8. P. 29. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0173-3>
26. *Yu B., Liu X., Ji C., Sun H.* Greenhouse gas mitigation strategies and decision support for the utilization of agricultural waste systems: A case study of Jiangxi Province, China // Energy. 2023. V. 265. № С. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126380

27. Wang L., Qin T., Zhao J., Zhang Y., Wu Z., Cui X., Zhou G., Li C., Guo L., Jiang G. Exploring the nitrogen reservoir of biodegradable household garbage and its potential in replacing synthetic nitrogen fertilizers in China // *Peer J.* 2022. V. 10. e12621. DOI: 10.7717/peerj.12621
28. Briukhanov A., Luostarinen S., Trifanov A., Shalavina E., Kozlova N., Vasilev E., Subbotin I. Revision of the total nitrogen and phosphorus content in a cattle manure-based organic fertilizer in North-West Russia // *Agricult. Food Sci.* 2021. V. 30. P. 44–52. <https://doi.org/10.23986/afsci.99191>
29. Колосова Н., Монах С. Оценка выбросов парниковых газов при хранении отходов животноводческих ферм // *Инж. сист. и техноген. безопасность.* 2015. Вып. 5(115). С. 49–52.
30. López-Cano I., Luz Cayuela M., Sánchez-García M., Sánchez-Monedero M.A. Suitability of different agricultural and urban organic wastes as feedstocks for the production of biochar. Part 2: Agronomical evaluation as soil amendment // *Sustainability.* 2018. № 10. P. 2077. DOI: 10.3390/su10062077
31. Diacono M., Persiani A., Testani E., Montemurro F., Ciaccia C. Recycling agricultural wastes and by-products in organic farming: biofertilizer production, yield performance and carbon footprint analysis // *Sustainability.* 2019. № 11. P. 3824. DOI: 10.3390/su11143824
32. Ozalp A., Yilmaz S., Ertekin C., Yilmaz I. Energy analysis and emissions of greenhouse gases of pomegranate production in Antalya province of Turkey // *Erwerbs-Obstbau.* 2018. V. 60. P. 321–329.
33. Dyer J.A., Desjardins R.L. Simulated farm fieldwork, energy consumption and related greenhouse gas emissions in Canada // *Biosyst. Eng.* 2003. V. 85. P. 503–513.
34. Khoshnevisan B., Rafiee S., Omid M., Yousefi M., Movahedi M. Modeling of energy consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks // *Energy.* 2013. V. 52. P. 333–338.
35. Cadena E., Colón J., Artola A., Sánchez A., Font X. Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment // *Inter. J. Life Cycle Assess.* 2009. V. 14. P. 401–410.
36. Fiore A., Lardo E., Montanaro G., Laterza D., Loiudice C., Berloco T., Dichio B., Xiloyannis C. Mitigation of global warming impact of fresh fruit production through climate smart management // *J. Clean Prod.* 2018. V. 172. P. 3634–3643.
37. Pergola M., Persiani A., Palese A.M., Di Meo V., Pastore V., D'Adamo C., Celano C. Composting: The way for a sustainable agriculture // *Appl. Soil Ecol.* 2018. V. 123. P. 744–750.
38. Møller J., Boldrin A., Christensen T.H. Anaerobic digestion and digestate use: Accounting of greenhouse gases and global warming contribution // *Waste Manag. Res.* 2009. V. 27. P. 813–824.
39. Smith A., Brown K., Bates J., Ogilvie S., Rushton K. Waste Management options and climate change. Final report to the European commission, DG Environment. Abingdon, UK: AEA Technology, 2001. P. 224.
40. Lal R. Carbon emission from farm operations // *Environ. Int.* 2004. V. 30. P. 981–990.
41. Graefe S., Tapasco J., Gonzalez A. Resource use and greenhouse gas emissions of eight tropical fruits species cultivated in Colombia // *Fruits.* 2013. V. 68. P. 303–314.
42. Martínez-Mate M.A., Martín-Gorriñ B., Martínez-Alvarez V., Soto-García M., Maestre-Valero J.F. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain // *J. Clean Prod.* 2018. V. 172. P. 1298–1310.
43. Матасов А.В., Макарова А.С., Авдеенкова Т.С. Количественная оценка выбросов парниковых газов технологий переработки отходов сельского хозяйства // *Вестн. МАСИ. Информатика, экология, экономика.* 2019. Т. 21. С. 21–25. URL: <https://cat.gpntb.ru/?id=EC/ShowFull&irbDb=ESVODT&bid=db97600f33fa0376581c4b176dc37b42>
44. Мировые тенденции в потреблении энергии. URL: <http://www.econews.uz> (дата обращения: 10.05.2019).
45. Najser T., Gaze B., Knutel B., Verner A., Najser J., Mikeska M., Chojnacki J., Nemcek O. Analysis of the effect of catalytic additives in the agricultural waste combustion // *Proc. Materials.* 2022. V. 15. P. 3526. <https://doi.org/10.3390/ma15103526>
46. Su K., Qin Q., Yang J., Li L., Deng S. Recent advance on torrefaction valorization and application of biochar from agricultural waste for soil remediation // *J. Renew. Mater. (JRM).* 2022. V. 10. № 2. DOI: 10.32604/jrm.2022.018146
47. Li L., Ma X., Xu Q., Hu Z. Influence of microwave power, metal oxides and metal salts on the pyrolysis of algae // *Biores. Technol.* 2013. V. 142(2). P. 469–474. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.05.080
48. Beneroso D., Bermúdez J.M., Arenillas A., Menéndez J.A. Microwave pyrolysis of microalgae for high syngas production // *Biores. Technol.* 2013. V. 144. P. 240–246. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.102
49. Hu Z., Ma X., Chen C. A study on experimental characteristic of microwave-assisted pyrolysis of microalgae // *Biores. Technol.* 2013. V. 107. P. 487–493. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.12.095
50. Zhou J., Liu S., Zhou N., Fan L., Zhang Y. Development and application of a continuous fast microwave pyrolysis system for sewage sludge utilization // *Biores. Technol.* 2018. V. 256(1). P. 295–301. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.02.034
51. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // *Агрохимия.* 2019. № 12. С. 3–15. DOI: 10.1134/S000218811912007X

52. *Bashkin V., Alekseev A., Levin B., Mescherova E.* Biogeochemical technologies for managing CO₂ flows in agroecosystems // *Adv. Environ. Eng. Res.* 2023. V. 4(1). 012. DOI: 10.21926/aeer.2301012
53. *Northrup D.L., Bassob B., Wang M.Q., Morgan C.L.S., Benfey P.N.* Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row-crop production // *PNAS*. 2021. V. 118. № 28. e2022666118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022666118>
54. *Udvardi M., Below F.E., Castellano M.J., Eagle A.J., Giller K.E., Ladha J.K., Liu X., Maaz T.M., Nova-Franco B., Raghuram N., Robertson G.P., Roy S., Saha M., Schmidt S., Tegeder M., York L.M. and Peters J.W.* A Research road map for responsible use of agricultural nitrogen // *Front. Sustain. Food Syst.* 2021. V. 5. 660155. DOI: 10.3389/fsufs.2021.660155
55. *Bashkin V.N.* Increasing the efficiency of nitrogen use: Assessing the nitrogen-mineralizing capability of soils // *Rus. Agricult. Sci.* 2022. V. 48. № 4. P. 283–289. DOI: 10.3103/S1068367422040012
56. *Башкин В.Н., Арабский А.К.* Роль природного газа в обеспечении глобальной продовольственной безопасности // *Газ. Бизнес.* 2022. № 2. С. 11–17.
57. *Bashkin V.N., Alekseev A.O.* Global food security and fundamental role of fertilizer. P. 1. Global food security and fertilizer production // *Iss. Risk Anal.* 2022. V. 19(3). P. 60–73. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-3-60-73>
58. *Bashkin V.N., Alekseev A.O.* Global food security and fundamental role of fertilizer. P. 2. Fundamental role of fertilizer in food production // *Iss. Risk Anal.* 2022. V. 19(4). P. 10–29. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-4-10-29>
59. *Лана В.В.* Система управления плодородием почв в республике Беларусь // *Мат-лы II Международ. научн. конф. “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”*, посвящ. памяти акад. Е.И. Ермакова. Санкт-Петербург, 02–04 октября 2019 г. СПб.: АФИ, 2019. С. 37–44.
60. *Zhang W.F., Dou Z.X., He P., Ju X.T., Powlson D., Chadwick D., Norse D., Lu Y.L., Zhang Y., Wu L., Chen X.P., Cassman K.G., Zhang F.S.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2013. V. 110. P. 8375–80.
61. *Самсонов Р.О., Башкин В.Н., Аконова Г.С.* Оценка рынка парниковых газов. М.: ИРЦ-Газпром, 2007. 80 с.
62. *Samsonov R.O., Kazak A.S., Bashkin V.N.* Master plan methodology for gas industry development. Moscow: Sci. World Publ. House, 2007. 304 p.
63. *Markelov V.A., Andreev O.P., Kobylkin D.N., Arabsky A.K., Arno O.B., Tsybulsky P.G., Bashkin V.N., Kazak A.S., Galiulin R.V.* Gas industry sustainable development. Moscow: Nedra, 2013. 211 p.
64. *Булаткин Г.А.* Экологические и энергетические основы воспроизводства почвенного плодородия и увеличение продуктивности агроэкосистем: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2007. 48 с.
65. *Bashkin V.N., Alekseev A.O.* Life cycle analyses of fertilizers: carbon emissions as a measure of energy efficiency // *Iss. Risk Anal.* 2023. V. 20(3). P. 28–49. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-28-49>

CO₂-Emissions as a Measure of Energy Efficiency in the Production and Application of Fertilizers

V. N. Bashkin[#]

*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the RAS,
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

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

Taking into account the huge amount of data accumulated in recent years on greenhouse gas emissions (primarily CO₂, methane, or greenhouse gases (GHGs)), it is possible to consider the problem of energy efficiency (carbon dioxide emissions occur primarily during fuel combustion, as well as methane and CO₂ as precursors for nitrogen fertilizers) in the chain from the production of fertilizers to their logistics, application, production and waste disposal. At the same time, GHGs emissions can be considered as a measure of energy efficiency in assessing the life cycle of mineral fertilizers. Relevant examples are provided in the review.

Keywords: fertilizer production, carbon and nitrogen emissions, energy efficiency, life cycle assessment, logistics, fertilization, processing of agricultural waste.

УДК 632.122.1:546.815

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ СВИНЦОМ НА РАСТЕНИЯ© 2024 г. В. В. Иванищев^{1,*}, Т. Е. Сиголаева¹, Л. В. Переломов¹¹Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого
300026 Тула, просп. Ленина, 125, Россия

*E-mail: avdey_vv@mail.ru

Рассмотрены вопросы, касающиеся проблемы загрязнения почв свинцом и влияния этого загрязнения на растения. Показано, что широкое использование этого металла в экономике обуславливает распространение загрязнения почв свинцом и возможное потенциальное увеличение степени загрязнения им окружающей среды в обозримом будущем. Описаны формы свинца в почве, факторы, влияющие на его биодоступность для растений. Рассмотрены механизмы проникновения ионов металла в растения, их влияние на формирование проростков, взрослых растений, а также физиолого-биохимические процессы в растениях.

Ключевые слова: свинец, загрязнение почвы, формы тяжелых металлов в почвах, физиолого-биохимические процессы в растениях.

DOI: 10.31857/S0002188124060118, **EDN:** CWSPHG

ВВЕДЕНИЕ

Индустриализация и урбанизация являются основными причинами загрязнения окружающей среды. В результате многие химические элементы проникают в растения и могут накапливаться там до высоких концентраций, вызывая токсические эффекты. Среди группы поллютантов, относимых к тяжелым металлам (ТМ), известны как физиологически значимые, так и те, которые не выполняют каких-либо известных физиолого-биохимических функций. Способность растворимых солей металлов поглощаться растениями из почвы и проникать в живые ткани, накапливаться и взаимодействовать с внутриклеточными компонентами приводят к разным проявлениям токсичности. Передаваясь по пищевым цепям, тяжелые металлы негативно воздействуют и на организм человека, вызывая явления нейротоксичности, гепатотоксичности, нефротоксичности и др. [1].

У растений токсические эффекты реализуются через влияние на мембранные структуры, белки и ферменты, генетический аппарат клетки [1]. Высокие количества ТМ в среде стимулируют проявления окислительного стресса, что приводит к увеличению образования активных форм кислорода и свободных радикалов [2].

Одним из наиболее известных представителей группы металлов, не выполняющих (как представляется сегодня) физиолого-биохимических функций, является свинец. Он относится к химическим элементам, широко используемым человечеством

на протяжении своей истории. На долю данного металла приходится наибольшая часть, составляющая $\approx 10\%$ общего загрязнения, вызванного всеми ТМ [3]. До сих пор не показано, что свинец имеет хотя бы какое-то биологическое значение в процессах, протекающих в живых организмах, в т.ч. растениях. При этом повышенное содержание этого металла в среде приводит к появлению проблем морфологического, физиологического и биохимического характера [1, 4, 5].

Как и другие ТМ, свинец первоначально аккумулируется в корнях растений. При этом только малая часть его ионов может транспортироваться в надземные органы [1, 3]. В результате наибольшая опасность состоит в аккумуляции металла в подземных органах растений, употребляемых человеком в пищу, например, моркови, свеклы и др. При слаборазвитой корневой системе ионы металла могут, по-видимому, в большей степени транспортироваться в надземную часть, что делает опасным потребление листовой зелени. В то же время, например, плоды томата могут содержать весьма незначительные количества металла. Также известно, что растения-гипераккумуляторы (например, *Brassica pekinensis* и *Pelargonium*), в противоположность обычным растениям, способны транспортировать большие количества свинца в надземную часть, что не оказывает значительного влияния на метаболизм в целом [3].

В связи с огромной важностью изучения свинца как загрязнителя почв и сельскохозяйственных культур возникает необходимость рассмотрения

проблемы, касающейся его накопления в среде, биодоступности, проникновения в растения, а также влияния на процессы роста, развития, физиологию и биохимию метаболических процессов.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СВИНЦОМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Важными свойствами свинца, как простого вещества, являются мягкость, пластичность, плохая электропроводность, устойчивость к коррозии и др., что объясняет его широкое использование во многих сферах человеческой деятельности [4]. При этом антропогенные источники загрязнения среды весьма разнообразны и относятся ко всем этапам обращения с ним — добыче металла, его выплавке, переработке и использованию [4, 6]. Свинец находит широкое применение в судостроении, строительстве, ремонте автомобилей, производстве аккумуляторов, электронно-лучевых трубок, металлических сеток, оружия, керамической посуды и др. [7], некоторых удобрений [8]. Он содержится в выбросах нефтеперерабатывающих предприятий и двигателей внутреннего сгорания транспортных средств, может попадать в окружающую среду при использовании красок и покрытий, труб, металлических сеток, при складировании и переработке разнообразных электронных отходов [1, 3]. Новые технологии для создания солнечных элементов для крупномасштабного производства энергии и портативной электроники также широко используют свинец [9]. До сих пор соединения свинца применяют в производстве игрушек, красок, книгопечатании, некоторых традиционных лекарственных препаратов [3].

Добыча свинца в мире составляет 4.1 млн т [4]. Широкое его использование затрудняет отказ от данного металла, в результате чего его содержание в окружающей среде только увеличивается, создавая все большую опасность для здоровья человека [1]. В результате почвы могут накапливать высокие концентрации этого металла, достигая величин в 400–800 мг/кг и более, особенно в промышленно развитых районах [10].

В соответствии с документами Госкомсанэпиднадзора России, свинец относят к веществам 1-го класса опасности, таким как ртуть, кадмий и др. При этом фоновое содержание его определяют величиной, равной 26 мг/кг почвы. Валовое содержание (ПДК, ОДК) оценивают в 130 мг/кг, а ПДК подвижных форм металла — в 6 мг/кг почвы [11].

Согласно ежегоднику [12], содержание свинца в почвах разных федеральных округов нашей страны меняется в широких пределах — от 0.4 до 27 мг/кг. При этом в промышленно развитых районах эта усредненная величина часто составляет

10–20 мг/кг, несмотря на гораздо большие локальные величины в отдельных городах и поселках, где содержание свинца в почве может достигать 100–250 мг/кг и более, особенно вблизи предприятий промышленности. Также со временем отмечают рост уровня загрязнения непромышленных территорий в результате переноса выбросов на расстояние и аккумуляции металла в почве.

Например, в промышленно развитой Тульской обл. содержание свинца в почвах относительно невелико и часто составляет 12–18 мг/кг, в том числе подвижных форм — 0–0.5 мг/кг почвы [13, 14]. Концентрация валового свинца в аллювиальных почвах р. Упа в пределах Тулы составляет 15.0–17.5 мг/кг, а подвижных форм (экстрагированных ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8) — 0.1–0.8 мг/кг [15]. При этом содержание элемента в почвах отдельных территорий намного больше вследствие выбросов промышленных предприятий и автомобильного транспорта. Показано, например, что кислоторастворимые формы свинца в поверхностных пробах почв составляют 180 мг/кг (д. Шилово, Ефремовский р-н), 310 мг/кг (г. Суворов), 700 мг/кг (д. Малое Колодезное Новомосковского р-на), 800 мг/кг (г. Плавск) [16].

ФОРМЫ СВИНЦА В ПОЧВЕ И ЕГО БИОДОСТУПНОСТЬ

Относительно токсичных для растений концентраций свинца в почве нет общей точки зрения. Некоторые ученые обнаружили признаки токсичности при концентрациях элемента, близких к фоновым [17], тогда как другие исследователи не смогли выявить токсических эффектов, связанных с этим металлом даже при его концентрациях >1000 мг/кг [18]. Очевидно, такая парадоксальность может объясняться разной чувствительностью растений, а также различной биологической доступностью соединений свинца в почвах. Биологическая доступность и токсичность ТМ зависят не только от их концентраций, но и от форм соединений в почвах [13]. В свою очередь, факторами, определяющими присутствие металлов в тех или иных формах, являются количество и состав соединений, унаследованных от материнской породы и поступающих из антропогенных источников, а также от взаимодействия антропогенных соединений свинца с компонентами почв и почвенных растворов при вторичном перераспределении.

На незагрязненных территориях почвы наследуют уровни содержания свинца от почвообразующих пород. Среднее содержание свинца в земной коре составляет ≈15 мг/кг. Содержание свинца в обычных типах горных пород меняется от ≈1 мг/кг

(эвапоритовые отложения, базальт и ультраосновные магматические породы) до 30 мг/кг (граниты, риолит и черный сланец). Установлено, что 70–95% общего содержания свинца в горных породах приходится на К-полевой шпат и плагиоклаз. Осадочные породы содержат сравнительно небольшое количество свинца – его средняя концентрация составляет 32 мг/кг для углистых сланцев, 23 мг/кг для алевролитов, аргиллитов и неуглеродистых сланцев, 17 мг/кг для песчаников, 11 мг/кг для известняков и доломита [19]. Обычные минералы химически осажденных осадочных пород (кальцит, доломит, гипс и галит) часто содержат свинец в количестве <10 мг/кг. Содержание этого металла в осадочных глинистых минералах меняется в широком диапазоне, но обычно составляет порядка 10–20 мг/кг [20].

Первичные минералы являются для почв основным природным источником всех ТМ. Однако, находясь в составе первичных минералов в микроминералогических (в составе акцессорных минералов, в виде микроскопических выделений в результате распада твердых растворов и включения остаточных растворов) и неминералогических (сорбированные поверхностью дефектов реальных кристаллов, входящие в структуру минерал-носителя по законам изоморфизма, находящиеся в структуре минерала-носителя в неупорядоченном состоянии) формах [21], ТМ в основной своей массе недоступны растениям.

В почве выделяющийся из первичных минералов или попадающий из антропогенных источников свинец сначала адсорбируется в результате быстрых реакций, затем следуют медленные реакции и перераспределение металла в различные химические формы с различной биодоступностью, подвижностью и токсичностью [22]. Это распределение контролируется реакциями свинца в почвах, такими как (i) – минеральное осаждение и растворение, (ii) – ионный обмен, адсорбция и десорбция, (iii) – комплексообразование, (iv) – биологическая иммобилизация и мобилизация и (v) – поглощение растениями [23].

В конечном итоге в результате распределения все ТМ образуют следующие обобщенные формы: прочносвязанные (входящие в состав первичных и вторичных минералов, солей, оксидов и гидроксидов, органического вещества, окклюдируемые и соосажденные с соединениями железа, алюминия, марганца и др.), подвижные соединения твердых фаз (сорбированные, ионообменные, осажденные) и растворимые соединения почвенного раствора [24]. Оценить нахождение свинца в той или иной форме позволяют экстракционные методы (вытяжки ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8, 1 н. HCl и др.), а детализировать

связь ТМ с компонентами почв можно, используя методы последовательных экстракций, обладающих определенной селективностью [25–27].

Формы и распределение ионов свинца зависят от многих факторов, включающих процессы окисления и восстановления, адсорбцию катионов на частицах почвы, возможность образования хелатов, взаимодействие с оксидами металлов, органическими кислотами, а также остатков растений, накопивших в тканях некоторые количества этого металла [19]. На поглощение свинца оказывают значительное влияние микрофлора ризосферы, чья деятельность влияет на доступность свинца в почве [28]. Все это обеспечивает растворимость свинца и его доступность для поглощения вегетирующими растениями. Сравнительные исследования токсичности Pb для почвенных организмов в различных почвах показали, что различия в токсичности в основном коррелировали с различиями в pH или катионообменной емкости (ЕКО) почв [29]. При этом отмечено, что в кислых почвах растения поглощают свинца больше, чем в щелочных [30].

Кроме форм свинца в почве его биодоступность контролируется особенностями поглощения элемента растениями. Ниже приведены 2 основных пути поглощения металлов растениями: (i) – пассивное поглощение, обусловленное градиентом мембранной концентрации, и (ii) – индуцируемое субстрат-специфическое и энергозависимое поглощение [4]. Присутствие в среде *in vitro* этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) или лимонной кислоты у некоторых растений (*Vicia faba* и *Typha angustifolia*) увеличивали поглощение свинца корневой системой, хотя у растений *Brassica juncea* такого эффекта не наблюдали [28]. Также показана возможность адсорбции свинца на поверхности частиц (например, оксидов железа, биологического материала и органических веществ) [3].

ПРОНИКНОВЕНИЕ СВИНЦА В РАСТЕНИЯ

Из воздушного пространства ионы металла могут проникать через кутикулу и устьица [4, 31]. Преодоление мембран позволяет ионам свинца попадать во внутреннее пространство растения, достигая эндодермы, где они прочно связываются с клеточной стенкой и плазматической мембраной. При этом оба пути переноса ионов – апопласт и симпласт после поясков Каспари заменяются симпластным путем [32]. Это делает необходимым включение вакуоли клетки в процессы нейтрализации ионов металла для минимизации его концентрации в цитоплазме клеток [10]. При высоких концентрациях избыток ионов свинца преодолевает барьер поясков Каспари и может проникать в надземную часть растений, где конкурирует

с ионами других металлов в процессе фотосинтеза, а также образует комплексы с органическими и аминокислотами [10]. Далее с транспирационным потоком ионы могут попадать в межклеточные пространства мезофилла [3].

Основная часть металла может поступать в растения обычным путем через корневую систему с последующим транспортом в сосуды ксилемы [31]. При прорастании семян свинец может проникать в семядоли двудольных растений через сосудистые ткани и накапливаться в отдельных участках в дистальных частях. При этом двудольные растения накапливают в корнях большее количество свинца, чем однодольные [1]. Также установлено, что в корнях накапливается больше металла, чем в побегах [3, 33]. Это обусловлено специальными механизмами, включающими синтез и накопление каллозы между плазматической мембраной и клеточной стенкой, взаимодействие металла с пектином, бляшки Fe/Mn, а также накопление свинца в вакуолях клеток корней [28]. Показано, что содержание свинца в различных органах растения имеет тенденцию к снижению в последовательности: корни > листья > стебель > соцветия > семена [1].

ВЛИЯНИЕ СВИНЦА НА ФОРМИРОВАНИЕ РАСТЕНИЙ

В ряде работ показано, что свинец ингибирует прорастание семян таких растений, как *Hordeum vulgare*, *Elsholtzia argyi*, *Spartina alterniflora*, *Pinus halepensis*, *Oryza sativa*, *Zea mays* и *Lupinus* [4, 10, 33]. При этом наблюдали замедление роста рассады, уменьшение размеров корней и гипокотилия, сухой массы корней и побегов [1, 5]. Аналогичные изменения в накоплении сырой и сухой биомассы показано для растений *Pisum sativum*, *Zea mays*, *Paspalum distichum*, *Cynodon dactylon*, *Lycopersicon esculentum*, *Ipomoea aquatic*, *Phaseolus vulgaris* и *Lens culinaris* [1]. Прорастание семян подавляется даже низкими концентрациями Pb^{2+} [1, 5]. Высокие концентрации металла (1 мМ) также негативно влияют на всхожесть семян и формирование проростков растений. При этом избыток свинца может в конечном итоге привести к их гибели [1, 34]. Изучение влияния нитрата свинца в широком диапазоне концентраций (1–25–50–100–200–500 мМ) на формирование 14-суточных проростков кукурузы показало, что даже при минимальной концентрации металла в среде в 1 мМ исследователи наблюдали снижение сырой и сухой массы побегов и корней на 30–50% против контроля [35].

В исследованиях с бирючиной (*Ligustrum lucidum* Ait.), способной накапливать свинец, в широком спектре концентраций нитрата свинца 200–600–1000–1400 мг/кг почвы, было обнаружено

снижение длины и сырой массы побегов на 10–30% [33].

В экспериментах с растениями нескольких сортов сорго (*Sorghum bicolor* L.) присутствие в среде возрастающих концентраций нитрата свинца (0, 100, 200, 400 и 800 мг/кг почвы) приводило к достоверному снижению всхожести семян на 18–36% при концентрациях соли 200 мг/кг и больше. У 80-суточных растений определяли морфологические характеристики. Установлено, что длина корня при увеличении концентрации соли в среде постепенно снижалась на 60–69, высота растений – на 43–59%. Число листьев на растениях уменьшалось на 45–59, сырая масса корня – на 61–78, сухая масса корня – на 71–78, сырая масса побега – на 46–84, сухая масса побегов – на 60–90% [36].

Нарушения в развитии корневой системы приводят к ухудшению водного баланса и минерального питания растений, а снижение скорости формирования надземной массы сопряжено с ухудшением транспирации и фотосинтеза. В результате можно наблюдать хлороз листьев и почернение корней [1, 31].

Исследования на соевых бобах показали, что токсичность свинца вызывала гистологические изменения в листьях, уменьшая размеры клеток ксилемы и флоэмы, диаметр сосудов ксилемы сосудистых пучков, в результате чего листовая пластинка становилась тоньше [10, 32]. Такие же патологические изменения на уровне ультраструктуры были зафиксированы и для других видов растений [1].

Исследования на взрослых растениях показали, что загрязнение свинцом почвы или при орошении плантаций загрязненной водой приводило к снижению размеров растений, уменьшению количества цветков и плодов. Такой эффект показан для растений кокосовой пальмы, подсолнечника, бамии. Также показано накопление свинца в листьях, стеблях, цветках и плодах, например, *Stevia rebaudiana* и ежевики, что важно для оценки пищевой ценности и безопасности таких растений для человека, используемых в питании и/или при лечении травами некоторых заболеваний [3].

ВЛИЯНИЕ СВИНЦА НА БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСТЕНИЯХ

Присутствие свинца в среде нарушает процессы синтеза ДНК, РНК (экспрессию генов), белков, состав белковых фракций, активность ферментов, важных для процессов прорастания семян, а также роста и развития проростков. Среди ключевых ферментов можно отметить протеазу, амилазу, АТФ-синтетазу [1, 3]. В то же время нарушается и состав липидной части мембраны, в результате чего происходит изменение ее проницаемости [1].

Такое многообразие изменений отражается на интенсивности главных физиологических процессов: фотосинтезе и дыхании, а также на работе защитных механизмов растений, включая антиоксидантную систему [1, 10, 28].

Изменения фотосинтеза проявляются в снижении его скорости, торможении синтеза хлорофилла, работы цикла Кальвина, накопления углеводов, отчасти вследствие закрытия устьиц и возникающего дефицита CO_2 . Присутствие нитрата свинца в среде водной культуры растений *Ceratophyllum demersum* (роголистника погруженного) вызывало изменения в ламеллярной структуре хлоропластов, что было обусловлено нарушением липидного состава мембран [3]. Описанные процессы сопровождались изменениями в ультраструктуре хлоропластов, замедлением синтеза каротиноидов и переносчиков электрон-транспортной цепи (ЭТЦ) фотосинтеза [33]. При этом из-за происходящего в таких условиях снижения поглощения магния и железа усиливалась деградация хлорофилла, отчасти вследствие ингибирования одного из ферментов биосинтеза хлорофилла — α -аминолевулилат-дегидрогеназы, а также активации фермента хлорофиллазы [10], причем хлорофилл *b* подвергался большему воздействию, чем хлорофилл *a* [1]. Эффекты свинца были описаны как для донорных, так и для акцепторных участков фотосистемы-2 (ФС II), комплекса цитохромов *b/f* и фотосистемы-1 (ФС I). Общеизвестно, что транспорт электронов ФС I менее чувствителен к ингибированию свинцом, чем фотосистемы ФС II [1, 37]. В экспериментах на изолированных хлоропластах также показано, что свинец влиял на работу электрон-транспортной системы фотосинтеза [38].

Установлено также, что присутствие свинца в среде приводило к изменению активности и количества ферментов цикла Кальвина [39], метаболизма углеводов и азота. В гомогенатах листьев шпината активность рибулозо-бисфосфаткарбоксилазы-оксигеназы ингибировалась даже при концентрации нитрата свинца 5 мкМ [1].

Было обнаружено, что свинец в значительной степени ингибирует АТФ-синтетазу/АТФазу, что может быть связано с нарушением структуры и функции мембран [40]. При этом механизм влияния свинца остается неясным.

Исследования митохондриальных препаратов растений в присутствии в среде ионов свинца показало уменьшение дыхания с увеличением концентрации свинца [41]. При этом установлено, что свинец влиял на работу электрон-транспортной системы дыхания [38]. Ингибирующий эффект свинца при более высоких концентрациях, по-видимому, обусловлен отключением окислительного фосфорилирования [42]. Интересно, что низкие концентрации металла стимулировали дыхание

целых растений, отдельных листьев, изолированных протопластов и митохондрий [1, 43].

Изучение влияния присутствия в среде ионов свинца на развитие окислительного стресса показало увеличение образования активных форм кислорода (АФК) даже при концентрации металла 0.1 и 0.5 мМ. Подобную ответную реакцию наблюдали у всех изученных растений. В ответ на это в клетках корней растений значительно возрастала активность антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, каталазы, пероксидазы, аскорбатпероксидазы), а также низкомолекулярных веществ (пролина, цистеина, небелкового тиола, аскорбиновой кислоты и глутатиона), которые могут снижать окислительный стресс за счет удаления АФК. При этом высокие концентрации свинца в среде, напротив, могут снижать активность антиоксидантных ферментов [4, 10, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные показали, что использование свинца в разных областях промышленности и человеческой деятельности постепенно увеличивает степень загрязнения окружающей среды этим металлом. При этом на сегодняшний день нет альтернативы для его замены другими, менее вредными металлами или веществами. В результате следует обратить внимание на особенности накопления и преобразования форм свинца в почвах, что обеспечивает его биодоступность для живых организмов и в первую очередь — для растений. Это связано с тем, что растения составляют значительную долю в рационе питания человека и основную — животных, которых человек также потребляет в качестве еды. В то же время решение проблемы снижения содержания свинца в растениях и животных, по-видимому, состоит не только в минимальном использовании загрязненных участков территории, но и в разработке и применении разных агротехнологий, обеспечивающих прочное связывание металла с компонентами почвы, что делает недоступным поступление свинца в растения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nas F.S., Ali M. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters // MOJ Eco. Environ. Sci. 2018. V. 3. № 4. P. 265–268. DOI: 10.15406/mojes.2018.03.00098
2. Гарифзянов А.Р., Жуков Н.Н., Иванищев В.В. Образование и физиологические реакции активных форм кислорода в клетках растений // Совр. пробл. науки и образов-я. 2011. № 2. 21 с. URL: www.science-education.ru/96-4600 (дата обращения: 02.09.2023).

3. Collin S., Baskar A., Geevarghese D.M., Ali M.N.V.S., Bahubali P., Choudhary R., Lvov V., Tovar G.I., Senatov F., Koppala S., Swamiappan S. Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants // J. Hazard. Mater. Lett. 2022. V. 3. 100064.
<https://doi.org/10.1016/j.hazl.2022.100064>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266691102200017X>
4. Aslam M., Aslam A., Sheraz M., Ali B., Ulhassan Z., Najeeb U., Zhou W., Gill R.A. Lead toxicity in cereals: mechanistic insight into toxicity, mode of action, and management // Front. Plant Sci. 2021. V. 11. 587785. DOI: 10.3389/fpls.2020.587785
5. Al-Ghzawi A.L.A., Al Khateeb W., Rjoub A., Al-Tawaha A.R.M., Musallam I., Al Sane K.O. Lead toxicity affects growth and biochemical content in various genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) // Bulg. J. Agricult. Sci. 2019. V. 25. № 1. P. 55–61.
6. Kumar A., Mms C.P., Chaturvedi A.K., Shabnam A.A., Subrahmanyam G., Mondal R., Yadav K.K. Lead toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches // Inter. J. Environ. Res. Public Health. 2020. V. 17. № 7. 2179.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17072179>
7. Obeng-Gyasi E. Sources of lead exposure in various countries // Rev. Environ. Health. 2019. V. 34. № 1. P. 25–34. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0037>
8. Xing W., Yang H., Ippolito J.A., Zhang Y., Schreckel K.G., Li L. Lead source and bioaccessibility in windows illdusts within a Pb smelting-affected area // Environ. Pollut. 2020. V. 266. P. 2. 115110.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115110>
9. Zou C., Zhang L., Hu X., Wang Z., Wik T., Pecht M. A review of fractional order techniques applied to lithium-ion batteries, lead-acid batteries, and supercapacitors // J. Power Sources. 2018. V. 390. P. 286–296.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.033>
10. Pourrut B., Shahid M., Dumat C., Winterton P., Pinelli E. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants // Rev. Environ. Contam. Toxicol. 2011. V. 213. P. 113–136. DOI: 10.1007/978-1-4419-9860-6_4
11. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых количеств (ОДК) химических веществ в почве (утв. Главн. Гос. сан. врачом СССР 19 ноября 1991 г. № 6229–91) (с изменениями и дополнениями). <https://base.garant.ru/372205/d866c9989c75bef029b67e7a33698205/>
12. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2022 году. Обнинск: НПО “Тайфун”, 2023. 139 с. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/tpp/tpp_2022.pdf
13. Переломов Л.В., Пинский Д.Л. Формы Mn, Pb и Zn в серых лесных почвах Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2003. № 6. С. 682–691.
14. Медведев А.В. Содержание тяжелых металлов в почвах Тульской области // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: Международ. научн.-техн. интернет-конф. Тула, 2011. URL: <http://kadastr.org/conf/2011/pub/monitpriir/sod-tyaj-met-pochv.html>
15. Perelomov L., Atroshchenko Y., Pinsky D., Minkina T., Perelomova I. Trace elements in fluvisols with different anthropogenic load // Inter. J. Environ. Res. 2021. V. 15. № 4. С. 751–758. DOI: 10.1007/s41742-021-00353-x
16. Арлянов В.А., Волкова Е.М., Нечаква И.А., Скворцова Л.С. Содержание тяжелых металлов в почве как индикатор антропогенного загрязнения Тульской области // Изв. Тул. Гос. ун-та. Естеств. науки. 2015. № 4. С. 194–204.
17. An Y.J. Assessment of comparative toxicities of lead and copper using plant assay // Chemosphere. 2006. V. 62. № 81. P. 1359–1365.
18. Cheyns K., Peeters S., Delcourt D., Smolders E. Lead phytotoxicity in soils and nutrient solutions is related to lead induced phosphorus deficiency // Environ. Pollut. 2012. V. 164. P. 242–247.
19. Kushwaha A., Hans N., Kumar S., Rani R. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2018. V. 147. P. 1035–1045. DOI:10.1016/j.ecoenv.2017.09.049
20. Lovering T.G. The distribution of minor elements in samples of biotite from igneous rocks – basic data // Open-File Rep. 1969. P. 69–152.
<https://doi.org/10.3133/ofr69152>
21. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
22. Shiowatana J., McLaren R.G., Chanmekha N., Samphao A. Fractionation of arsenic in soil by a continuous-flow sequential extraction method // J. Environ. Qual. 2001. V. 30. № 6. P. 1940. DOI:10.2134/jeq2001.1940
23. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // ISRN Ecol. 2011. P. 1–20. DOI: 10.5402/2011/402647
24. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 168 с.
25. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Analyt. Chem. V. 51. № 7. P. 844–851.
26. Zeien H., Brummer G.W. Ermittlung der mobilität und bindungsformen von schwermetallen in boeden mittels sequentieller extraktionen // Mitt. Dtsch. Bodenkundi Gesellsch. 1991. V. 66. № 1. S. 439–442.
27. Ure A.M., Quevauviller P., Muntau H., Griepink B. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of

- extraction techniques undertaken under the auspices of the BSR (Community Bureau of Reference) of the commission of European communities // *Inter. J. Environ. Anal. Chem.* 1993. V. 51. P. 135–151.
28. *Fahr M., Laplaze L., Bendaou N., Hocher V., Mzibri M.E., Bogusz D., Smouni A.* Effect of lead on root growth // *Front. Plant Sci.* 2013. V. 4. P. 175–182. DOI: 10.3389/fpls.2013.00175
 29. *Zhang L., Van Gestel C.A.M.* Effect of percolation and chemical form on Pb bioavailability and toxicity to the soil invertebrate *Enchytraeus crypticus* in freshly spiked and aged soils // *Environ. Pollut.* 2019. V. 247. P. 866–873.
 30. *Li J., Cao H.L., Jiao W.B., Wang Q., Wei M., Cantone I., Abate A.* Biological impact of lead from halide perovskites reveals the risk of introducing a safe threshold // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. 310. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13910-y>
 31. *Sharma P., Dubey R.S.* Lead toxicity in plants // *Braz. J. Plant Physiol.* 2005. V. 17. № 1. P. 35–52.
 32. *Lane S.D., Martin E.S.* A histochemical investigation of lead uptake in *Raphanus sativus* // *New Phytol.* 1977. V. 79. № 2. P. 281–286. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1977.tb02206.x>
 33. *Zhou J., Zhang Z., Zhang Y., Wei Y., Jiang Z.* Effects of lead stress on the growth, physiology, and cellular structure of privet seedlings // *PLOS ONE.* 2018. V. 13. № 3. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191139>
 34. *Seregin I.V., Ivanov V.B.* Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants // *Russ. J. Plant Physiol.* 2001. V. 48. № 4. P. 523–544.
 35. *Hussain A., Abbas N., Arshad F., Akram M., Khan Z.I., Ahmad K., Mansha M., Mirzaei F.* Effects of diverse doses of Lead (Pb) on different growth attributes of *Zea mays* L. // *Agricult. Sci.* 2013. V. 4. № 5. P. 262–265. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2013.45037>
 36. *Osman H.E., Fadhlallah R.S.* Impact of lead on seed germination, seedling growth, chemical composition, and forage quality of different varieties of Sorghum // *J. Umm Al-Qura Univ. Appl. Sci.* 2023. V. 9. P. 77–86. <https://doi.org/10.1007/s43994-022-00022-5>
 37. *Mohanty N., Vass I., Demeter S.* Copper toxicity affects Photosystem II electron transport at the secondary quinone acceptor. QB // *Plant Physiol.* 1989. V. 90. № 1. P. 175–179.
 38. *Miles C.D., Brandle J.R., Daniel D.J.* Inhibition of PS II in isolated chloroplasts by lead // *Plant Physiol.* 1972. V. 49. № 5. P. 820–825.
 39. *Hampp R., Ziegler H., Ziegler I.* Influence of lead ions on the activity of enzymes of reductive pentose phosphate pathway // *Biochem. Physiol. Pflanzen.* 1973. V. 164. № 5–6. P. 588–595.
 40. *Tushu I., Brouillette J.N.* Metal ion inhibition of corn root plasmamembrane ATPase // *Phytochemistry.* 1987. V. 26. № 1. P. 65–69.
 41. *Reese R.N., Roberts L.W.* Effects of cadmium on whole cell and mitochondrial respiration in tobacco cell suspension cultures (*Nicotiana tabacum* L. var. *xanthi*) // *J. Plant Physiol.* 1985. V. 120. № 2. P. 123–130.
 42. *Miller R.J., Biuell J.E., Koeppel D.E.* The effect of cadmium on electron and energy transfer reactions in corn mitochondria // *Physiol. Plant.* 1973. V. 28. № 1. P. 166–171.
 43. *Parys E., Romanowaska E., Siedlecka M., Poskuta J.* The effect of lead on photosynthesis and respiration in detached leaves and in mesophyll protoplasts of *Pisum sativum* // *Acta Physiol. Plant.* 1998. V. 20. P. 313–322. DOI: 10.1007/s11738-998-0064-7

Influence of Soil Pollution by Lead on Plants

V. V. Ivanishchev^{a, #}, T. E. Sigolaeva^a, L. V. Perelomov^a

^a*Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University,
prosp. Lenina 125, Tula 300026, Russia*

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

The issues related to the problem of soil contamination with lead and the effect of this pollution on plants are considered. It is shown that the widespread use of this metal in the economy causes the spread of soil contamination with lead and a possible potential increase in the degree of environmental pollution in the foreseeable future. The forms of lead in the soil and the factors affecting its bioavailability for plants are described. The mechanisms of penetration of metal ions into plants, their effect on the formation of seedlings, adult plants, as well as physiological and biochemical processes in plants are considered.

Keywords: lead, soil pollution, forms of heavy metals in soils, physiological and biochemical processes in plants.