

Номер 6

ISSN 0002-1881
Июнь 2023



АГРОХИМИЯ

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2023

Возможности интенсификации технологии выращивания яровой пшеницы
в лесостепи Западной Сибири

И. Н. Шарков, С. А. Колбин, Н. В. Васильева

3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Влияние химических мелиорантов на микробиологическую активность
черноземно-луговых почв

Ю. И. Чевердин, Т. В. Титова, В. А. Беспалов

12

Удобрения

Реакция гороха на азотное удобрение и инокуляцию семян риторфином
на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности

М. А. Алёшин, А. А. Завалин

22

Влияние совместного применения фосфорных и магниевых удобрений
на фоне азотно-калийных на урожайность, качество и вынос элементов питания
яровым ячменем в зависимости от кислотности дерново-подзолистой почвы

С. П. Бижан

39

Агроэкология

Аккумуляция атмосферного углерода культурами севооборота и влияние систем
удобрения на накопление органического углерода пахотной дерново-подзолистой почвой

Н. Е. Завьялова, М. Т. Васбиева, В. Р. Ямалтдинова, И. В. Казакова

47

Применение аминокислот глицирризиновой кислоты
для предотвращения порчи винограда в период хранения

М. И. Шатинова, Р. А. Асадуллаев, Ш. Ф. Нагиева

57

Экотоксикология

Содержание аминокислот в кормовых травах при возрастающем содержании свинца
в почве

Г. Я. Елькина

63

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ гуминового вещества методом ОЭС-ИСП

Р. П. Колмыков

73

ОБЗОРЫ

Агрогеохимические технологии управления потоками CO₂ в агроэкосистемах. Сообщение 1.
Факторы управления микробным звеном агрогеохимического круговорота

В. Н. Башкин

81

Contents

No. 6, 2023

Possibilities of Intensification of Spring Wheat Growing Technology
in the Western Siberia Forest-Stepp

I. N. Sharkov, S. A. Kolbin, N. V. Vasileva

3

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Influence of Chemical Meliorants on Microbiological Activity
of Chernozem-Meadow Soils

Yu. I. Cheverdin, T. V. Titova, V. A. Besspalov

12

Fertilizers

Reaction of Peas to Nitrogen Fertilizer and Inoculation of Seeds
with Ritorfin on Sod-Podzolic Soil of Different Degree of Cultivation

M. A. Alyoshin, A. A. Zavalin

22

Influence of the Joint Use of Phosphorus and Magnesium Fertilizers on the Background
of Nitrogen and Potassium Fertilizers on the Productivity, Quality and Removal
of Nutrition Elements in Spring Barley Depending on the Acidity of Sod-Podzolic Soil

S. P. Bizhan

39

Agroecology

Accumulation of Atmospheric Carbon by Crop Rotation Crops and the Effect
of Fertilizer Systems on the Accumulation of Organic Carbon by Arable Sod-Podzolic Soil

N. E. Zavyalova, M. T. Vasbieva, V. R. Yamaltdinova, I. V. Kazakova

47

Application of Amine Salts of Glycyrrhizinic Acid for Prevention of Grape Rot
during Storage Period

M. I. Shatirova, R. A. Asadullayev, Sh. F. Nagiyeva

57

Ecotoxicology

Content of Amino Acids in Plants at Different Levels of Lead in the Soil

G. Ya. El'kina

63

RESEARCH METHODS

ICP-OES-Analysis for Humic Substance

R. P. Kolmykov

73

REVIEWS

Agrogeochemical Technologies for Managing CO₂ Flows in Agroecosystems.
Message 1. Management Factors of the Microbial Link of the Agrogeochemical Cycle

V. N. Bashkin

81

УДК 631.17:633.11“321”(571.1)

ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ¹

© 2023 г. И. Н. Шарков^{1,*}, С. А. Колбин², Н. В. Васильева²

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

²Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН

630501 Новосибирская обл., р.п. Краснообск, СФНЦА РАН, Россия

*E-mail: humus3@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

На основе результатов многолетнего полевого опыта дана агрономическая и экономическая оценка эффектов от применения средств химизации под яровую пшеницу с целью выяснения привлекательности для земледельцев перехода к выращиванию культуры по интенсивной технологии. Для анализа были взяты актуальные на сегодня для сибирского региона цены на средства химизации и зерно яровой пшеницы. Показано, что под влиянием комплекса средств химизации (удобрений, гербицидов, фунгицида) среднегодовая урожайность пшеницы в 4-польном зернопаровом севообороте увеличилась в 1.8 раза, достигнув 3.8 т зерна/га. Рост урожайности на 13% был обусловлен применением гербицидов, 18% – фунгицидов и на 69% – минеральных удобрений при окупаемости 1 кг д.в. 12.4 кг зерна. При расчете в среднем за год средства химизации обеспечивали получение дохода уже при минимальной (из принятых для анализа) цене зерна 10000 руб./т. Доход резко увеличивался в ряду вариантов полевого опыта: гербициды, гербициды + удобрения, гербициды + удобрения + фунгицид. Однако при оценке ежегодных эффектов доход от средств химизации в этом ряду был получен соответственно только в 42, 75 и 92% лет. Вероятность убытков значительно уменьшалась при увеличении цены зерна. Но даже при ценах 13000 и 16000 руб./т применение всего комплекса средств химизации было убыточным в 8% лет из-за сильной засухливости вегетационного периода. При текущих ценах на удобрения и пестициды минимально достаточной ценой зерна можно считать 13000 руб./т, что однако не исключает получение убытков в сильно засухливые годы.

Ключевые слова: яровая пшеница, средства химизации, интенсивная технология выращивания, прибавка урожайности, окупаемость затрат прибавкой, доли прибыльных и убыточных лет.

DOI: 10.31857/S0002188123060108, **EDN:** QOYLCY

ВВЕДЕНИЕ

Сибирский регион является одним из крупнейших производителей зерна в Российской Федерации. Среди макрорегионов России Сибирский федеральный округ (СФО) устойчиво занимает 4-е место, производя в год ≈15 млн т зерна [1]. В округе выращивают преимущественно яровые зерновые культуры, причем в структуре посева зерновых и зернобобовых культур доминирующее положение (65%) занимает яровая пшеница [2]. К сожалению, за последние десятилетия общий уровень интенсификации агротехнологий в Сибири и, как следствие, урожайность зерновых

культур практически не изменились. Например, в период 2000–2020 гг. средняя за пятилетия урожайность зерновых в СФО варьировала в очень узком диапазоне – 1.40–1.65 т зерна/га [3]. Такая урожайность свидетельствует об использовании подавляющим большинством хозяйств в Сибири экстенсивных агротехнологий. Они основаны на использовании растениями элементов минерального питания только из почвенных резервов, без применения удобрений. В результате естественное плодородие почв постепенно истощается, что усиливает нисходящий тренд урожайности и в будущем потребует применения повышенных доз минеральных удобрений.

Длительное господство экстенсивных технологий в Сибири обусловлено объективными и

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН и СФНЦА РАН.

субъективными причинами. Главная объективная причина заключается в широком распространении потенциально плодородных темноцветных почв (черноземов, темно-серых лесных и др.), доля которых в пашне достигает 80% [2]. Это позволяет десятилетиями получать относительно дешевое зерно, используя простейшие технологии, нацеленные на мобилизацию почвенного плодородия за счет увеличения в севооборотах доли чистого пара (обычно до 25–33%). На наш взгляд, основной субъективной причиной, сдерживающей распространение в Сибири интенсивных технологий, является разбалансированность системы цен — продажи хозяйствами зерна и приобретения ими средств интенсификации — удобрений, пестицидов и др. [3, 4]. Выраженный диспаритет цен не в пользу сельскохозяйственных производителей не гарантирует хозяйствам получения стабильного дохода от применения средств химизации. Ситуация может усугубляться как в благоприятные, так и в неблагоприятные по погодным условиям годы. В первом случае увеличивается валовой сбор зерна и, соответственно, обычно падает его цена; во втором, как правило, снижается прибавка урожайности от средств химизации, т. е. их использование становится менее эффективным.

В целом можно констатировать, что результаты многолетних научных исследований в Сибири [5–7], показавшие возможность 2–3-кратного увеличения урожайности культур под влиянием интенсивных технологий, пока остаются нереализованными в подавляющем большинстве хозяйств. На наш взгляд, для широкого и ускоренного освоения интенсивных технологий требуется совершенствование ценообразования в агропромышленном комплексе с целью выработки системы, при которой эти технологии для большинства хозяйств станут привлекательными, потому что будут обеспечивать получение значительно большей прибыли. Необходимым условием для разработки такой системы является объективный анализ агрономической и экономической эффективности применения средств химизации в различные по погодным условиям годы. Такой анализ может быть сделан только на основании результатов, полученных в многолетних полевых опытах.

Цель работы — оценка агрономического и экономического эффектов от применения средств химизации под яровую пшеницу в многолетнем полевом опыте и анализ на этой основе привлекательности для земледельцев перехода к выращиванию культуры по интенсивной технологии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на базе длительного полевого опыта, заложенного на черноземе выщелоченном в лесостепи Новосибирского Приобья в 1981 г. [8]. Для анализа были взяты данные урожайности зерна и применения средств химизации в севообороте (чистый пар—пшеница—пшеница—пшеница) за последние 3 ротации (2007–2018 гг.), в течение которых не вносили никаких изменений в схему опыта. Почву ежегодно обрабатывали осенью плугом с оборотом пласта: в паровом поле на глубину 25–27 см, под пшеницу на всех полях — на 20–22 см. Пшеницу высевали сеялкой СЗП-3.6 после культивации почвы агрегатом СЗС-2.1 с одновременным внесением азотного удобрения (N_{aa}). Фосфорное удобрение в дозе P120 применяли один раз за ротацию в паровом поле под зяблевую вспашку. В опыте было 4 варианта применения средств химизации: 1 — без средств (контроль), 2 — гербициды против одно- и двудольных сорных растений, 3 — гербициды + + удобрения ($N0P40$ под 1-ю после пара пшеницу, $N60P40$ — под 2-ю, $N90P40$ — под 3-ю пшеницу), 4 — гербициды + удобрения + фунгицид (в фазе колошения). Первые 2 варианта опыта представляют разновидности экстенсивной технологии выращивания пшеницы (минеральное питание растений обеспечивалось только за счет естественного плодородия почвы), последний вариант характеризует интенсивную технологию, нацеленную на получение максимальной урожайности пшеницы. Повторность в опыте четырехкратная.

Для оценки экономического эффекта от применения удобрений и средств защиты растений использовали актуальные в 2022 г. цены в Новосибирской обл. По данным торговой площадки [9], в ноябре—декабре цена зерна пшеницы 3-го класса составляла ≈ 13000 руб./т. Она взята в качестве основной при оценке экономического эффекта от применения средств химизации. Также использовали 2 другие цены зерна — 10000 и 16000 руб./т, чтобы прояснить, насколько значительно при этом изменится ситуация с доходностью под влиянием средств химизации. Согласно прайс-листам фирм, торгующих средствами химизации в Новосибирской обл., весной 2022 г. 1 кг N в аммиачной селитре стоил ≈ 70 руб., 1 кг P_2O_5 в аммофосе — 90 руб., 1 л гербицида Элант Премиум, КЭ — 930 руб. (750 руб./га), 1 л гербицида Пума Супер 100, КЭ — 1650 руб. (1320 руб./га), 1 л фунгицида Виртуоз, КЭ — 2448 руб. (1300 руб./га).

Таблица 1. Весенние запасы продуктивной влаги и нитратного азота в слое почвы 0–100 см в период 2007–2018 гг.

Пшеница после чистого пара	Влага, мм			N-NO ₃ , кг/га		
	среднее	lim	V*	среднее	lim	V*
Первая	134	101–170	16	150	108–211	22
Вторая	124	70–168	19	78	43–119	30
Третья	123	79–160	16	52	36–84	26

*Коэффициент вариации среднего (%).

Почва опытного участка – старопашотный чернозем выщелоченный среднесуглинистого гранулометрического состава. Содержание гумуса в пахотном слое – 5.5–6.5%, рН_{H₂O} 6.7, подвижных соединений (по методу Чирикова): Р₂О₅ – 18–20, К₂О – 8–10 мг/100 г почвы. Запасы продуктивной влаги и нитратного азота определяли ежегодно в слое почвы 0–100 см в варианте опыта, в котором из средств химизации под пшеницу применяли только гербициды. Содержание нитратного азота определяли в воздушно-сухой почве с помощью ионселективного электрода с последующим расчетом запаса элемента в слое почвы 0–100 см [9].

В районе проведения исследования среднегодовое количество осадков, по данным метеостанции “Огурцово” (пос. Элитный, Новосибирская обл.), за последние 50 лет наблюдений составляло 452 мм, сумма температур воздуха >10°C – 2162°C, гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) июня–июля – 1.05, продолжительность периода вегетации (безморозного периода) – ≈120 сут. По гидротермическим условиям годы исследования были разными, но по средним показателям за 12-летний период примерно соответствовали среднемноголетним величинам для данной территории: годовая сумма осадков – 459 мм, сумма температур воздуха >10°C – 2137°C, ГТК июня–июля – 1.00.

Урожай убирали напрямую комбайном “Сампо-500” с одновременным измельчением и рассеиванием соломы по полю. Статистическая обработка данных выполнена методом дисперсионного анализа с помощью пакета компьютерных программ [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Весенние запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–100 см практически не зависели от удаленности поля от чистого пара (табл. 1). Следова-

тельно, на данной территории, где в год выпадает ≈450 мм осадков, при применении зяблевой вспашки паровое поле не способствовало существенному улучшению водного режима культур севооборота. Запасы нитратного азота в почве, напротив, сильно зависели от удаленности поля от чистого пара и были меньше под посевом 2-й пшеницы в 2 раза, 3-й пшеницы – в 3 раза в сравнении с пшеницей после пара. По многолетним данным [12], в зерновых агроценозах содержание нитратного азота в слое 0–40 см черноземных почв в 3-м и последующих полях после чистого пара составляет ≈6 мг N-NO₃/кг, что, согласно шкале [13], соответствует низкой обеспеченности растений азотом. Это содержание нитратов можно принять за фоновое, потому что оно способно поддерживаться в пахотных черноземных почвах при выращивании зерновых культур без чистого пара. Применительно к нашей ситуации фоновым для слоя 0–100 см почвы являлся запас нитратного азота 52 кг/га (табл. 1). Поэтому собственно парование почвы обеспечивало накопление в течение вегетационного периода в среднем ≈100 кг N-NO₃/га. Это тот дополнительный ресурс азота, на который могут рассчитывать земледельцы, применяющие экстенсивные технологии выращивания зерновых культур на старопашотных черноземных почвах.

Многолетнее применение в опыте различных средств химизации позволило получить развернутую картину их агрономической эффективности в 4-польном зернопаровом севообороте (табл. 2). Под влиянием всего комплекса средств химизации среднегодовая урожайность пшеницы в целом в севообороте увеличилась в 1.8 раза, достигнув 3.8 т зерна/га. Рост урожайности на 13% был обусловлен применением гербицидов, на 18% – фунгицидов и на 69% – минеральных удобрений. Как уже отмечали, на 1 га посева в опыте в среднем за год вносили N50P40, что при прибавке урожайности от удобрений 1.13 т/га обеспечило

Таблица 2. Среднегодовые урожайность и прибавки зерна яровой пшеницы от применения средств химизации в зернопаровом севообороте (2007–2018 гг.), т/га

Вариант	Урожайность	Прибавки зерна от применения					
		гербицидов	удобрений	фунгицида	гербицидов и удобрений	удобрений и фунгицида	гербицидов, удобрений и фунгицида
Без средств химизации	2.13	0.22	1.13	0.30	1.35	1.43	1.65
Гербициды	2.35						
Гербициды + удобрения	3.48						
Гербициды + удобрения + фунгициды	3.78						
<i>НСР</i> ₀₅	0.16						

Таблица 3. Среднегодовая доходность от применения средств химизации под яровую пшеницу при разных ценах зерна

Средства химизации	Выручка от реализации прибавки урожая, руб./га			Затраты на средства химизации, руб./га	Доход от реализации прибавки урожая, руб./га		
	10000	13000	16000		10000	13000	16000
Цена зерна, руб./т							
Без средств химизации	0	0	0	0	0	0	0
Гербициды	2200	2860	3520	2070	130	790	1450
Гербициды + удобрения	13 500	17 550	21 600	9770	3730	7780	11 830
Гербициды + удобрения + фунгициды	16 500	21 450	26 400	11 070	5430	10 380	15 330

достаточно высокую окупаемость 1 кг д.в. — 12.4 кг зерна. Таким образом, при интенсификации технологии с помощью средств химизации удобрения играли основную роль в повышении урожайности яровой пшеницы на старопахотной черноземной почве.

Далее рассмотрим экономические стимулы к интенсификации агротехнологии выращивания яровой пшеницы. Наилучшей для земледельцев является ситуация, при которой применение средств химизации обеспечивает хозяйству получение дополнительного дохода в любой по погодным условиям вегетационный период. Менее желательна та, при которой в среднем за год хозяйство получает прибыль, но при этом в отдельные годы может иметь место убыток. Наконец, интенсификация технологии становится неприемлемой (невыгодной), если в среднем за ротацию севооборота от применения средств химизации по-

лучается убыток. Как показал анализ данных многолетних опытов [14, 15], основной причиной снижения прибавок урожайности пшеницы от применения удобрений в Сибири являются засушливые условия летнего периода, прежде всего июня—июля, которые пока невозможно предсказывать заблаговременно. В такой ситуации наиболее действенным средством снижения убытков от применения удобрений, особенно в повышенных дозах, является поддержание соответствующей цены зерна.

В нашем опыте применение средств химизации под пшеницу обеспечивало получение среднегодового дохода при всех ценах зерна — от 10000 до 16000 руб./т (табл. 3). Показано, что уровень доходности резко возрастал от экстенсивной технологии выращивания пшеницы (вариант опыта с применением только гербицидов) к интенсивной (гербициды + удобрения + фунгицид).

Таблица 4. Доли лет с прибыльным и убыточным применением средств химизации при разных ценах зерна в период 2007–2018 гг.

Средства химизации	Доли лет, в которые применение средств химизации было прибыльным, %			Доли лет, в которые применение средств химизации было убыточным, %		
	10000	13000	16000	10000	13000	16000
Цена зерна, руб./т						
Гербициды	42	75	75	58	25	25
Гербициды + удобрения	75	92	92	25	8	8
Гербициды + удобрения + фунгицид	92	92	92	8	8	8

При актуальной на сегодня цене зерна 13000 руб./т среднегодовой доход от совместного применения гербицидов и удобрений увеличился в 10 раз, а при использовании в технологии и фунгицида — в 13 раз.

Однако для хозяйства важно знать не только среднесезонные, но и ежегодные экономические эффекты от применения удобрений и пестицидов, чтобы иметь представление о доли прибыльных и убыточных лет при освоении интенсивной технологии. Для этого нами представлена динамика окупаемости затрат на средства химизации стоимостью прибавок зерна на протяжении всех лет опыта (рис. 1). Пунктирная линия на рис. 1, соответствующая окупаемости 1 руб./руб., показывает условие, при котором стоимостью прибавки зерна в ценах текущего года компенсируются затраты на средства химизации без получения прибыли. Другими словами, при данной окупаемости обеспечивается нулевая рентабельность затрат. Показатели окупаемости, которые превышают компенсационные затраты на средства химизации (на рис. 1 они находятся выше пунктирной линии), характеризуют годы, в которые от применения удобрений и/или пестицидов получена прибыль; напротив, показатели окупаемости, находящиеся под пунктирной линией, указывают на убыточные годы при использовании средств химизации. Данные показали, что наибольшее количество убыточных лет было характерно для варианта, где применяли только гербициды. Здесь в 3 года (2010, 2012 и 2016 г.) не получено достоверной прибавки урожайности от гербицидов, что на рисунке отмечено нулевой окупаемостью, а в части лет прибавки урожайности оказались недостаточными, чтобы окупить затраты. По нашему мнению, есть 2 причины, которые объясняют сравнительно низкую окупаемость гербицидов в 4-польном зернопаровом севообороте. Во-первых, анализируемые данные получены в длительном полевом опыте, в котором благодаря ежегодному применению гербици-

дов в соответствующих вариантах опыта удалось стабилизировать засоренность пшеницы на весьма низком уровне [16]. Во-вторых, схема опыта предусматривала применение гербицидов на всех 3-х полях выращивания пшеницы, хотя на пшенице после пара эффект от них, как правило, был незначительным. Что касается интенсивной технологии выращивания пшеницы, то убыток от применения комплекса средств химизации получен только в 2012 г., который характеризовался очень засушливыми условиями — за июнь–июль выпало только 25% от нормы осадков.

Чтобы нагляднее представлять ситуацию с эффективностью средств химизации, для каждого варианта их применения рассчитаны доли прибыльных и убыточных лет (табл. 4). К прибыльным годам отнесены только те, в которые окупаемость средств химизации стоимостью прибавки урожая составила не менее 1.2 руб./руб., что соответствует уровню рентабельности не менее 20%. Соответственно убыточными считали годы, в которые окупаемость затрат была меньше 1.2 руб./руб. Обоснованность такого допущения состоит в следующем. Оцененные нами затраты были несколько заниженными, поскольку учитывали только стоимость средств химизации без прямых расходов на их применение. Эти расходы не константны, поскольку зависят от многих факторов — модели технических средств, цен на горюче-смазочные материалы, зарплат работников и др. По данным недавнего исследования [17], прямые эксплуатационные затраты на опрыскивание посевов пестицидами с помощью отечественного опрыскивателя ОП-2000 были оценены примерно в 350 руб./га. С учетом этой величины доля расходов на опрыскивание в общих затратах на применение гербицидов составит 14, фунгицидов — 21%. Относительные затраты на применение удобрений были значительно меньше из-за высокой стоимости их гектарной дозы (табл. 3) и, как уже отмечали, совмещения внесения азотного удобрения с предпосевной культивацией.

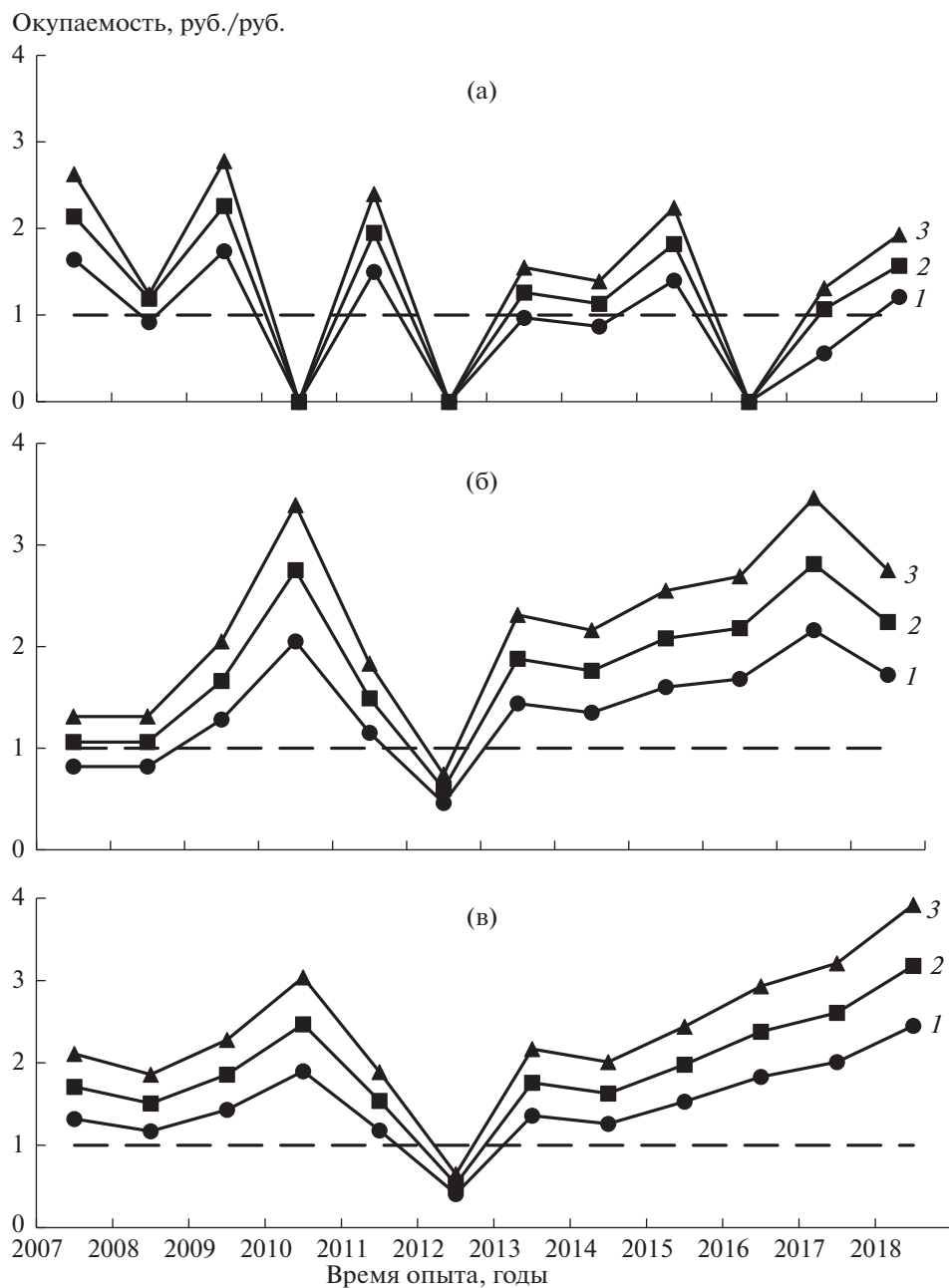


Рис. 1. Динамика окупаемости гербицидов (а), гербицидов и удобрений (б), гербицидов, удобрений и фунгицидов (в) стоимостью прибавки зерна при различных его ценах; пунктирная линия показывает величину окупаемости, при которой компенсируются затраты на применение средств химизации без получения от них прибыли. Цена зерна: 1 – 10 000, 2 – 13 000, 3 – 16 000 руб./т.

Как было показано в [17], в настоящее время фактическая рентабельность применения гербицидов и фунгицидов под зерновые культуры в России оценена примерно в 100%, что по отношению к использованному нами показателю – окупаемости затрат прибавкой урожая – соответствует 2 руб./руб. С учетом сказанного представляется корректным принять условие считать прибыльными годами только те, в которые окупаемость

средств химизации прибавкой урожая составляла не менее 1.2 руб./руб.

Результаты опыта показали, что независимо от цены зерна при применении средств химизации не во все годы получение прибыли было возможным. При существующих ценах на средства химизации цена зерна 10 000 руб./т представляется недостаточной, поскольку в варианте опыта гербициды + удобрения убытки получены в 25% лет.

При комплексном применении средств химизации (интенсивная технология), независимо от цены зерна, убыток получен в 8% лет, что было обусловлено, как уже говорилось, очень засушливым вегетационным периодом 2012 г. По нашему мнению, полученные данные свидетельствуют о том, что в настоящее время минимально достаточной для получения прибыли от применения средств химизации можно считать цену зерна 13000 руб./т. Однако и в этом случае в хозяйствах должны быть предусмотрены в каком-либо виде государственные дотации для предотвращения убытков в очень засушливые годы. В собственно лесостепи Западной Сибири, где проведено исследование, таких лет, вероятно, будет не больше 10%.

По нашему мнению, для производственных условий представленные в табл. 4 данные следует рассматривать как наиболее благоприятные из возможных, т.е. доля лет с убытками от применения средств химизации будет больше. Эта проблема обсуждалась нами ранее при выполнении аналогичного исследования [18]. Здесь кратко отметим, что, во-первых, эффект от средств химизации сильно зависит от качества и своевременности выполнения технологических операций. Добиваться этого ежегодно в полевых опытах значительно проще, чем на тысячах гектаров производственных посевов. Во-вторых, полученные в длительном опыте прибавки урожайности от удобрений учитывают не только их прямое действие, но и значительное последствие. Для получения такого же, как в опыте, последствие удобрений в хозяйстве их необходимо применять, по-видимому, не менее 10 лет. В-третьих, применительно к производственным условиям речь необходимо вести не только о яровой пшенице, а о зерновых в целом, включая овес и ячмень. Цена зерна этих культур обычно существенно меньше, чем у пшеницы 3-го класса, хотя затраты на средства химизации при выращивании по интенсивным технологиям близкие.

О невысокой эффективности интенсивных технологий возделывания яровой пшеницы при существующем соотношении цен на зерно яровой пшеницы и средств химизации свидетельствует, на наш взгляд, 6-летнее исследование в Зауралье [19]. Его результаты показали, что в сравнении с экстенсивной технологией выращивания яровой пшеницы (без средств химизации) прибыль от комплексного применения удобрений, гербицидов и фунгицидов увеличилась в среднем только на 18%. Можно полагать, что при такой эффективности самостоятельный переход хозяйств к освоению интенсивных технологий,

требующих к тому же обновления парка технических средств, будет затруднительным. О высоких затратах при выращивании культур по интенсивным технологиям свидетельствует, на наш взгляд, сравнительный анализ производства продукции сельского хозяйства в РФ и странах Европы [20]. В частности, было показано, что в 2014 г. отечественные производители платили за 100 кг N аммиачной селитры в 2 раза больше, чем в Чехии, Польше или Латвии, а цена суперфосфата была одной и самых высоких в Европе. В качестве преимущества для сельскохозяйственного бизнеса в РФ авторы считают невысокий уровень оплаты труда, что в определенной степени обуславливается низкой его производительностью, которая, например, в сравнении со странами ЕС ниже в 4 раза. Все это, наряду со значительными различиями в почвенно-климатических ресурсах территорий, свидетельствует о сложности прямого сопоставления соотношений цен на продукцию растениеводства и средств для ее выращивания в разных странах. Более важным представляется детальный экономический анализ возможностей освоения интенсивных агротехнологий в сибирском регионе, включающий не только обоснование оптимальных соотношений цен на сельскохозяйственную продукцию и средства для ее производства, но и оценку необходимых финансовых ресурсов для создания в хозяйствах современной производственной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сибирском регионе выращивают преимущественно яровые зерновые культуры, причем в структуре посева доминирующее положение (65%) занимает яровая пшеница. Большинство хозяйств используют экстенсивные технологии выращивания, что обеспечивает получение невысокой урожайности культур. В работе на основе результатов многолетнего полевого опыта дана агрономическая и экономическая оценка эффектов от применения средств химизации под яровую пшеницу с целью выяснения привлекательности для земледельцев перехода к выращиванию культуры по интенсивной технологии. Для анализа были взяты актуальные на сегодня для сибирского региона цены на средства химизации и зерно яровой пшеницы.

Показано, что под влиянием комплекса средств химизации (удобрений, гербицидов, фунгицида) среднегодовая урожайность пшеницы в 4-польном зернопаровом севообороте увеличилась в 1.8 раза, достигнув 3.8 т зерна/га. Рост урожайности на 13% был обусловлен применением

гербицидов, на 18% – фунгицидов и на 69% – минеральных удобрений при окупаемости 1 кг д. в. 12.4 кг зерна.

При расчете в среднем за год средства химизации обеспечивали получение дохода уже при минимальной (из принятых для анализа) цене зерна 10000 руб./т. Доход от средств химизации резко увеличивался в ряду вариантов опыта: “гербициды”, “гербициды + удобрения”, гербициды + + удобрения + фунгицид”. Однако при оценке ежегодных эффектов доход от средств химизации в этом ряду был получен соответственно только в 42, 75 и 92% лет. Вероятность убытков значительно уменьшалась при увеличении цены зерна. Но даже при ценах 13000 и 16000 руб./т применение всего комплекса средств химизации было убыточным в 8% лет из-за сильной засушливости вегетационного периода. При текущих ценах на удобрения и пестициды минимально достаточной ценой зерна можно считать 13000 руб./т, что не исключает получение убытков в сильно засушливые годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тю Л.В., Афанасьев Е.В., Быков А.А., Алещенко О.А. Экономическая эффективность и перспективы развития зернового производства в Сибири // Эконом. сел.-хоз. и перерабат. предприятий. 2021. № 1. С. 28–32.
2. Межрегиональная схема размещения и специализации сельскохозяйственного производства в субъектах Российской Федерации Сибирского федерального округа: рекомендации. Новосибирск: ФГБУ СО АН, 2016. 255 с.
3. Шарков И.Н. Интенсификация агротехнологий – главный приоритет Сибирского земледелия // Наука и технол. Сибири. 2021. № 3. С. 13–19.
4. Шарков И.Н. Проблемы интенсификации технологий возделывания зерновых культур в Сибири // Инновации и прод. безопасность. 2016. № 1 (11). С. 24–32.
5. Система адаптивного земледелия Омской области. ФГБНУ “Омский АНЦ”. Омск: Изд-во ИП Максеевой Е.А., 2020. С. 522.
6. Гамзиков Г.П. Точное земледелие в Сибири: реальности, проблемы и перспективы // Земледелие. 2022. № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-1-3-9>
7. Гамзиков Г.П. Сибирская современная Геосеть длительных стационарных опытов с удобрениями // Агрохимия. 2022. № 7. С. 3–13.
8. Синещиков В.Е. Химизация – ключевой фактор в формировании продуктивности колосовых культур в лесостепи // АПК России. 2018. Т. 25. № 23. С. 455–460.
9. Чагина Е.Г., Берхин Ю.И., Головин В.А. Определение нитратов в почве селективным электродом. Метод. рекоменд. Новосибирск, 1980. С. 10.
10. Торговая площадка IDK.RU [Электр. ресурс]. URL: <https://stat.idk.ru/> (дата обращения 23.11.2022).
11. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Новосибирск: СО РАСХН, 2008. С. 217.
12. Красницкий В.М., Бобренко И.А., Шмидт А.Г., Матвейчик О.А. Агротехническая диагностика потребности полевых культур в азотных удобрениях // Плодородие. 2020. № 6. С. 40–44. <https://doi.org/10.25680/s19948603.2020.117.12>
13. Гамзиков Г.П. Практические рекомендации по почвенной диагностике азотного питания полевых культур и применению азотных удобрений в сибирском земледелии. М.: Росинформагротех, 2018. С. 48.
14. Шарков И.Н., Колбин С.А. Влияние погодных условий вегетационного периода на урожайность яровой пшеницы и эффективность азотного удобрения в лесостепи Приобья // Вестн. НГАУ. 2020. № 1 (54). С. 33–41. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-54-1-33-41>
15. Холмов В.Г., Юшкевич Л.В. Интенсификация и ресурсосбережение в земледелии лесостепи Западной Сибири. Омск: Изд-во ОмГАУ, 2006. С. 396.
16. Синещиков В.Е., Васильева Н.В. Факторы, влияющие на численность сорных растений в посевах яровой пшеницы, на примере лесостепи Западной Сибири // Вестн. КрасГАУ. 2020. № 6 (159). С. 62–70. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-6-62-70>
17. Захаренко В.А. Современное состояние и перспективы экономики применения пестицидов в агроэкосистемах России // Агрохимия. 2021. № 5. С. 68–83. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050148>
18. Шарков И.Н., Колбин С.А., Захаров Г.М. Агротехнологии и возможности интенсификации производства зерна в Сибири // Эконом. сел.-хоз. и перерабат. предприятий. 2022. № 5. С. 14–18. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2022-0-5-14-18>
19. Гилев С.Д., Цымбаленко И.Н., Копылов А.Н. Агроэкологические и экономические показатели возделывания яровой пшеницы с применением средств химизации в Зауралье // Агрохимия. 2020. № 3. С. 49–54. <https://doi.org/10.31857/S0002188119120044>
20. Гатаулина Е.А., Узун Е.А. Сравнительная оценка стоимости ресурсов и условий ведения бизнеса в России и за рубежом с точки зрения конкурентоспособности аграрного сектора // Изв. ТСХА. 2016. № 3. С. 71–93.

Possibilities of Intensification of Spring Wheat Growing Technology in the Western Siberia Forest-Steppe

I. N. Sharkov^{a,#}, S. A. Kolbin^b, and N. V. Vasileva^b

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
prosp. Lavrenteva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

^b*Siberian Research Institute of Agronomy and Agricultural Chemistry SFSCA RAS
Novosibirsk region, r.p. Krasnoobsk 630501, Russia*

[#]*E-mail: humus3@yandex.ru*

Based on the results of many years of field experience, an agronomic and economic assessment of the effects of the use of chemicals for spring wheat is given in order to determine the attractiveness for farmers of the transition to growing crops using intensive technology. For the analysis, the prices of chemicals and spring wheat grain that are currently relevant for the Siberian region were taken. It is shown that under the influence of a complex of chemicalization agents (fertilizers, herbicides, fungicide), the average annual yield of wheat in a 4-full grain-pair crop rotation increased 1.8 times, reaching 3.8 tons of grain/ha. The increase in yield by 13% was due to the use of herbicides, 18% – fungicides and 69% – mineral fertilizers with a payback of 1 kg active substance 12.4 kg of grain. When calculating the average per year, the means of chemicalization provided income already at the minimum (from the accepted for analysis) grain price of 10 000 rubles/t. Income increased sharply in a number of field experience options: herbicides, herbicides + fertilizers, herbicides + fertilizers + fungicide. However, when assessing the annual effects, income from chemicals in this series was obtained, respectively, only in 42, 75 and 92% of the years. The probability of losses decreased significantly with an increase in the price of grain. But even at prices of 13.000 and 16.000 rubles/ton, the use of the entire complex of chemicals was unprofitable in 8% of the years due to the severe aridity of the growing season. At current prices for fertilizers and pesticides, the minimum sufficient price of grain can be considered 13.000 rubles/ton, which, however, does not exclude losses in severely dry years.

Key words: spring wheat, chemicals, intensive cultivation technology, yield increase, cost recovery by increase, shares of profitable and unprofitable years.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ МЕЛИОРАНТОВ НА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ЧЕРНОЗЕМНО-ЛУГОВЫХ ПОЧВ

© 2023 г. Ю. И. Чевердин^{1,*}, Т. В. Титова¹, В. А. Беспалов¹

¹Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева

397463 Воронежская обл., Таловский р-н, пос. 2-го участка Института им. Докучаева, квартал. 5, 81, Россия

*E-mail: cheverdin62@mail.ru

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.

После доработки 29.01.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Исследование проведено в Воронежском ФАНЦ “Каменная Степь” в 2020–2022 гг. Дана оценка состояния структуры микробного ценоза в луговых почвах с применением различных химических мелиорантов. Варианты мелиорации включали внесение гипса и дефеката в дозе 5 т/га и сочетание их половинных доз. Численность эколого-трофических групп микроорганизмов определяли методом посева на твердые питательные среды. Учет организмов, усваивающих органические формы азота — посевом на мясопептонный агар (МПА), учет организмов, ассимилирующих минеральные формы азота — посевом на крахмально-аммонийной среде (КАА), учет организмов, минерализующих гумус — посевом на нитратном агаре, учет грибов — на среде Чапека, учет количества азотобактера — на почвенных пластинках, учет нитрификаторов — на голодном агаре, учет организмов, разлагающих клетчатку — на среде Виноградского. В результате химической мелиорации луговых почв с применением в качестве мелиорантов гипса и дефеката были установлены закономерности изменения активности почвенных микроорганизмов. Удалось выявить довольно четкую зависимость увеличения численности микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота, от применения мелиорантов в луговой почве ложбинообразного понижения. Минерализационные процессы органического вещества были максимально выражены в лугово-черноземной почве на равнинном повышении при применении в качестве мелиоранта гипса в дозе 5 т/га, на содержание же нитрификаторов большее влияние в этой почве оказало применение гипса и дефеката в дозе 2.5 + 2.5 т/га. В черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения применение дефеката в дозе 5 т/га привело к увеличению содержания актиномицетов. В черноземно-луговой почве равнинного понижения применение всех мелиорантов оказало влияние на увеличение численности минерализаторов гумуса, грибов, а также нитрификаторов по сравнению с контролем. Какую-либо существенную закономерность, связанную с применением мелиорантов на данных почвах, на содержание колоний азотобактера выявить не удалось. В разных по степени грунтового увлажнения почвах применение мелиорантов оказало неоднозначное влияние на численность целлюлозолитиков: увеличение гидроморфизма почвы в сочетании с применением дефеката в дозе 5 т/га привело к максимальному увеличению клетчатковых микроорганизмов в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения.

Ключевые слова: черноземно-луговые почвы, химическая мелиорация, гипс, дефекат, микробиологические параметры почв.

DOI: 10.31857/S0002188123060066, **EDN:** QOSUNC

ВВЕДЕНИЕ

Важным компонентом современных агроландшафтов является широкое распространение переувлажненных почв, отмеченных в степных регионах России. Причина усиления гидроморфности черноземов и изменения их свойств обусловлена литологическими особенностями строения почвенной толщи, складывающимися гидротермическими условиями в течение года и

антропогенным фактором [1–4]. В условиях подъема уровня грунтовых вод отмечают эволюционные процессы трансформации автоморфных почв в гидроморфные — лугово-черноземные и черноземно-луговые [5]. Высокий уровень стояния грунтовых вод существенно изменяет водный, воздушный и солевой режим [6, 7]. Переувлажненные почвы имеют довольно широкое распространение во многих регионах России и

Зарубежья: Тамбовской [8, 9], Воронежской [1], Ростовской [2] обл., Краснодарском крае [10], степных зонах Забайкалья [11], Северного Кавказа [12].

Одним из показателей оценки плодородия почв является изучение их биологической активности [13–15]. По активности отдельных групп микроорганизмов можно судить о степени трансформации почвенного плодородия [16]. Трансформация показателей биологической активности почвы свидетельствует об изменениях плодородия в результате агрогенеза [17–19]. Одним из аспектов улучшения показателей плодородия и активизации биологических процессов является мелиорация почв. Мелиоративные приемы способствуют росту биологической активности почв различного генезиса [20, 21]. Отмечена связь биологической активности с урожайностью культур [22]. Различные типы мелиораций улучшают гумусное состояние, водно-физические и химические свойства почв, активизируют ростовые процессы сельскохозяйственных культур [23].

В научных публикациях довольно широко освещены вопросы генезиса и мелиорации гидроморфных почв. Изучение биологических свойств черноземно-луговых почв при мелиоративном воздействии в литературе представлено мало. Недостаточно изученным вопросом остается изменение соотношения различных групп микроорганизмов при использовании приемов химической мелиорации почв. В связи с этим цель работы — изучение изменения микробиологической активности черноземно-луговых почв при химической мелиорации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на комплексе сезонно-переувлажненных и затапливаемых почв в Воронежском ФАНЦ. Опытный участок заложен на различных по степени грунтового увлажнения почвенных разностях и расположен на приводораздельной части склона западной экспозиции до 1°. Ниже по склону расположена водорегулирующая лесная полоса № 131, которая посажена в 1959 г. В качестве объектов исследования служили 3 участка, относящиеся к различным элементам микрорельефа. Первый участок (**Р-1**) расположен на выпуклой части склона. Почва — по классификации 1977 г. — лугово-черноземная среднесиловая среднесиловая легкогоглинистая на лессовидных глинах, подстилаемых коричнево-бурыми плотными покровными глинами. По классификации 2004 г. эти почвы относятся к агрочерноземам гидрометаморфизованным.

Второй участок — черноземно-луговая солончаковатая слабозасоленная почва на равнинном понижении на переходе от выпуклой к вогнутой части склона с коротким периодом поверхностного затопления (черноземно-луговая солончаковатая почва на равнинном понижении (**Р-2**)).

Третий участок — черноземно-луговая солончаковатая слабозасоленная почва в ложбинообразном понижении на вогнутой части склона, подвергавшаяся длительному сезонному затоплению (черноземно-луговая солончаковатая почва в ложбинообразном понижении (**Р-3**)).

По классификации 1977 г., почвы равнинного и ложбинообразного понижения классифицируются как черноземно-луговые среднесиловые среднесиловые солончаковатые слабозасоленные легкогоглинистые пахотные почвы на лессовидных глинах, подстилаемых коричнево-бурыми плотными покровными глинами. По классификации 2004 г. эти почвы относятся к гумусово-гидрометаморфическим засоленным почвам (Р-1, Р-3).

В 2020 г. был заложен опыт химической мелиорации черноземно-луговых почв. Размер опытной делянки 20 м². Повторность трехкратная. Варианты опыта: 1 — контроль, 2 — гипс 5 т/га, 3 — дефекат 5 т/га, 4 — гипс + дефекат по 2.5 т/га.

Численность эколого-трофических групп микроорганизмов определяли методом посева на твердые питательные среды. Учет организмов, усваивающих органические формы азота — посевом на мясопептонный агар (МПА), учет организмов, ассимилирующих минеральные формы азота — посевом на крахмально-аммонийной среде (КАА), учет организмов, минерализующих гумус — посевом на нитратном агаре, учет грибов — на среде Чапека, учет количества азотобактера — на почвенных пластинках, учет нитрификаторов — на голодном агаре [24], учет организмов, разлагающих клетчатку — на среде Виноградского [25]. Почвенные пробы отбирали из слоя 0–20 см почвы. Календарный срок проведения исследования — середина вегетации полевых зерновых культур (фаза трубкования–колошения).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В нашем исследовании проводили изучение влияния мелиорантов на плодородие лугово-черноземных почв, их состояние и продуктивность. Это в дальнейшем позволит строить долгосрочные прогнозы урожайности на элементах рельефа, подверженных сезонному переувлажнению и оптимизировать технологии возделывания культур.

Таблица 1. Состав микробного ценоза в опыте мелиорации черноземно-луговых почв

Участок*	Вариант мелиорации**	Общая численность микроорганизмов	МПА	КАА	Минерализаторы гумуса	Актиномицеты	КАА: МПА
		млн КОЕ/ 1 г абсолютно сухой почвы					
Р-1	1	45.9	10.7	17.8	13.2	4.15	1.66
	2	50.3	10.0	18.3	18.3	3.66	1.83
	3	43.4	10.0	11.2	19.8	2.44	1.12
	4	48.0	6.8	16.1	21.9	3.17	2.36
Р-2	1	49.8	12.7	19.3	13.6	4.22	1.52
	2	50.1	6.7	20.1	19.6	3.72	3.00
	3	44.1	7.9	14.9	17.7	3.59	1.88
	4	33.4	6.7	10.8	13.1	2.82	1.62
Р-3	1	40.3	7.8	16.1	13.6	2.77	2.06
	2	34.4	10.3	10.8	11.3	2.05	1.05
	3	46.5	10.4	16.5	16.5	3.05	1.59
	4	42.3	5.9	11.8	22.3	2.30	2.00
HCP ₀₅		2.1	1.6	1.1	2.4	0.22	

*Р-1 — черноземно-луговая почва на равнинном понижении, Р-2 — лугово-черноземная почва на равнинном повышении, Р-3 — черноземно-луговая в ложбинообразном понижении.

**Варианты: 1 — контроль; 2 — гипс 5 т/га, 3 — дефекат 5 т/га, 4 — гипс + дефекат (2.5 + 2.5 т/га). Нумерация вариантов та же в табл. 2.

По общему количеству микроорганизмов более высокая микробиологическая активность отмечена в почвах с меньшей степенью грунтового увлажнения — в луговых почвах равнинного повышения и понижения. В почвах с большей увлажненностью почвенного профиля (ложбина) общая численность микроорганизмов была на более низком уровне — в среднем 40.9 млн КОЕ против 44.4–46.9 млн КОЕ (табл. 1). Причина более высокой микробиологической активности в почвах равнинного понижения и повышения связана, по нашему мнению, с лучшими условиями аэрации и наличием большего количества воздухоносных пор. В проведенных ранее исследованиях отмечена существенная дифференциация порового пространства почв, обусловленная степенью проявления гидроморфизма и грунтового переувлажнения [26].

Применение мелиорантов оказало различное влияние на общую численность микроорганизмов. Характер их влияния определялся степенью увлажнения. В почвах с меньшим периодом переувлажнения наиболее высокая микробиологическая активность отмечена при использовании

гипса. Дефекат в этом отношении проявлял ингибирующий эффект: на равнинном повышении численность микроорганизмов снизилась с 49.8 до 44.1 млн КОЕ, равнинном понижении — с 45.9 до 43.4 млн КОЕ. В ложбинообразном понижении влияние дефеката носило противоположный характер. При его использовании отмечено повышение общего количества почвенных микроорганизмов с 40.3 до 46.5 млн КОЕ. Таким образом, применение в качестве мелиоранта гипса в дозе 5 т/га оказало благотворное влияние на общую численность микрофлоры в луговых почвах понижения и повышения.

Наименьшая общая численность микроорганизмов оказалась в лугово-черноземной почве на равнинном повышении (Р-2) — 33.4 млн КОЕ/г абсолютно сухой почвы (**а.с.п.**) при применении гипса и дефеката в дозах 2.5 + 2.5 т/га. Немногим больше этот показатель отмечен в черноземно-луговой почве в ложбинообразном понижении (Р-3) при применении гипса в дозе 5 т/га — 34.4 млн КОЕ/г а.с.п. Также небольшая численность была выявлена в черноземно-луговой почве на равнинном понижении (Р-1) при применении

дефеката в дозе 5 т/га — 43.4 млн КОЕ/г а.с.п. Таким образом, применение в качестве мелиорантов гипса и дефеката в дозах 2.5 + 2.5 т/га оказывало наиболее угнетающее действие на микрофлору в луговой почве повышения.

Важным компонентом почвенной микробиоты являются микроорганизмы (аммонификаторы), использующие органические формы азота (МПА), участвующие в деструкции растительных остатков и отмерших корней растений [27]. В равнинных почвах понижения и повышения максимально высокое количество аммонификаторов было характерно для контрольного варианта без использования мелиорантов — соответственно 10.7 и 12.7 млн КОЕ/г почвы (табл. 1). Применение гипса и дефеката приводило к заметному снижению активности этой группы почвенной микрофлоры. Наиболее резким оно было в лугово-черноземной почве равнинного повышения.

В ложбинообразном понижении в почвах с менее благоприятными физическими свойствами мелиоранты, наоборот, стимулировали развитие аммонификаторов. Увеличение их численности составило 33.3%. Таким образом, можно отметить довольно четкую зависимость увеличения численности микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота, от применения мелиорантов в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения.

Микроорганизмы, произрастающие на крахмало-аммиачном агаре (КАА) и использовавшие минеральные формы азота для построения собственных клеток, в своем распределении имели четкую зависимость от применения мелиорантов в луговых почвах. В равнинных почвах понижения и повышения отмечено незначительное повышение активности бактерий амилотрофов под влиянием гипса — 2.3–4.3%. Отмечен существенный депрессионный эффект при мелиорации дефекатом и комплексном использовании гипса и дефеката.

Аналогичная закономерность отмечена в луговой почве ложбинообразного понижения при более низком фоновом уровне активности амилотрофов. Причем применение гипса вызвало снижение активности микроорганизмов, использующих минеральные формы азота до минимального уровня 10.8 млн КОЕ/г а.с.п., а увеличение численности этих микроорганизмов в данной почве вызвало применение дефеката (16.5 млн КОЕ/г а.с.п.). При комплексном использовании мелиорантов отмечен эффект депрессии для микроорганизмов, произрастающих на КАА. Статистический анализ подтвердил взаимосвязь активности ами-

лотрофов с обеспеченностью почвы азотом. Коэффициент парной корреляции равнялся $r = 0.46 \pm 0.09$. Таким образом, подтверждено существование средней корреляционной зависимости.

Соотношение КАА : МПА показывает отношение общей численности микроорганизмов, использующих минеральный азот, к общему числу микроорганизмов, разлагающих органическое вещество, отражающее степень участия микрофлоры в процессе трансформации органического вещества почвы [28].

Минерализационные процессы органического вещества в наших исследованиях более хорошо выражены в лугово-черноземной почве на равнинном повышении и черноземно-луговой почве равнинного понижения. Активизации этого процесса способствовало применение приемов мелиорации. Подтверждением этого служило расширение соотношения микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота к количеству микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота. Вместе с тем необходимо отметить снижение интенсификации минерализационных процессов в черноземно-луговых почвах ложбинообразного понижения под влиянием мелиорантов. Соотношение КАА: МПА в этом случае в контроле составило 2.06, снижаясь до 1.05–2.0 в опытных вариантах.

Актиномицеты относятся к большой группе микроорганизмов, обладающих способностью к деструкции и синтезу сложных органических соединений. Они обладают значительным набором разнообразных ферментов. Фоновое содержание актиномицетов (контроль) было наибольшим в почве на равнинном повышении и понижении — 4.22 и 4.15 млн КОЕ/г а.с.п. соответственно. В почве ложбинообразного понижения оно было наименьшим — 2.77 млн КОЕ/г а.с.п. Общей закономерностью являлось снижение активности актиномицетов в результате внесения химических мелиорантов. Только в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения применение дефеката в дозе 5 т/га способствовало увеличению содержания актиномицетов до 3.05 млн КОЕ/г а.с.п. по отношению к контролю (табл. 1).

Почва, которая обладала большей увлажненностью за счет своего месторасположения (Р-3), также проявляла худшие условия аэрации, содержала меньшее количество кислорода. Это, вероятно, являлось причиной меньшего содержания актиномицетов в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения, т.к. актиномицеты

Таблица 2. Структура микробного ценоза в опыте мелиорации луговых почв Каменной Степи (20.07.2022 г.)

Объект исследования	Вариант, №	Микромицеты, тыс. КОЕ/г а.с.п.*	Целлюлозолитики, тыс. КОЕ/1 г а.с. п.	Нитрификаторы тыс. КОЕ/1 г а.с. п.	Азотобактер, шт. колоний в 50 г почвы
Р-1	1	25.6	58.6	0.46	628
	2	34.2	56.1	0.48	641
	3	39.0	53.7	0.54	606
	4	32.9	61.0	0.55	593
Р-2	1	44.6	71.9	0.43	518
	2	44.6	49.6	0.42	533
	3	31.7	43.6	0.49	393
	4	34.2	61.5	0.56	513
Р-3	1	32.4	60.5	0.41	599
	2	31.7	66.6	0.46	384
	3	33.9	91.5	0.50	641
	4	30.5	56.3	0.39	659
<i>HCP</i> ₀₅		1.3	2.6	0.11	24

* а.с.п. — абсолютно сухой почвы.

являются прокариотами, требовательными к содержанию кислорода, а сложные органические вещества минерализуются актиномицетами до простых соединений [28, 29]. При этом улучшалась обеспеченность элементами питания растений. По нашим данным, отмечена средняя корреляционная зависимость активности актиномицетов с содержанием нитратного азота в почве. Коэффициент парной корреляции составил $r = 0.52 \pm 0.10$.

Важным компонентом почвенной биоты является численность колоний минерализаторов гумуса. В почвенной массе с различной скоростью проходят процессы минерализации и гумификации растительно-корневых остатков. Оценка активности минерализаторов гумуса показала их существенную изменчивость, определяемую, в первую очередь, воздействием почвенных мелиорантов, и в конечном итоге — таксономической принадлежностью почвы и уровнем грунтовых вод. Наиболее активно минерализационные процессы гумуса, судя по количеству соответствующих микроорганизмов, проходили в черноземно-луговой почве понижения (Р-1) и черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3). При применении в качестве мелиоранта сочетания гипса и дефеката в дозе 2.5 + 2.5 т/га их ко-

личество составляло 21.9 и 22.3 млн КОЕ/г а.с.п. соответственно (табл. 1). Численность минерализаторов гумуса в лугово-черноземной почве равнинного повышения (Р-2) варьировала в интервале от 13.6 до 19.6, в черноземно-луговой почве равнинного понижения (Р-1) — от 13.2 до 21.9, в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3) — от 11.3 до 22.3 млн КОЕ/г а.с.п.

При этом необходимо отметить не всегда однозначное влияние гипса и дефеката на активность данной группы микроорганизмов. Например, в лугово-черноземной почве повышения (Р-2) совместное использование мелиорантов дозе в 2.5 + 2.5 т/г вызывало снижение численности минерализаторов гумуса. В черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3) применение гипса в дозе 5 т/га вызвало снижение количества данной группы микроорганизмов. Из полученных данных можно сделать вывод, что в лугово-черноземных почвах химические мелиоранты способствовали активизации минерализационных процессов органического вещества, способствовали улучшению показателей эффективного плодородия почв. Расчетный коэффициент парной корреляции между численностью минерализаторов гумуса и содержанием нитратного азота равнялся $r = 0.48 \pm 0.08$.

Важной составляющей почвенного плодородия, связанной с азотным циклом в почве, является активность азотобактера. Наличие аэробной фиксации азота оценивается по встречаемости в почве бактерий рода *Azotobacter* [25, 28, 29].

В исследованных объектах изменение содержания азотобактера было неоднозначным. Максимальное количество колоний азотобактера в контроле было в черноземно-луговой почве понижения (Р-1) – 628, промежуточное положение выявлено в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3) – 599 и минимальное – в лугово-черноземной почве повышения (Р-2) – 518 шт. колоний/50 г почвы (табл. 2).

Применение мелиорантов в исследованных почвах оказало различное влияние на содержание колоний азотобактера. Какую-либо существенную закономерность, связанную с применением мелиорантов на данных почвах, выявить не удалось. Но следует отметить увеличение количества колоний азотобактера при применении гипса в дозе 5 т/га в черноземно-луговой почве понижения (Р-1) – до 641 шт. колоний/50 г почвы.

Разложение клетчатки происходит при участии специализированных групп микроорганизмов – целлюлозоразрушающих бактерий и грибов. В последнее время установлено, что и актиномицеты активно участвуют в этом процессе. В контроле (без мелиорантов) максимальная активность целлюлозолитиков была характерна для лугово-черноземной почвы равнинного повышения – 71.0 тыс. КОЕ/г а.с.п. В черноземно-луговых почвах равнинного и ложбинообразного понижения их численность была заметно меньше – 58.6 и 60.5 тыс. КОЕ соответственно. Влияние мелиорантов на активность целлюлозоразлагающих микроорганизмов носило разнонаправленный характер. В почвах равнинного понижения (повышения) гипс и дефекат оказали деструктивное влияние на численность целлюлозолитиков. В черноземно-луговой почве ложбины мелиоранты, наоборот, способствовали росту их активности.

При этом необходимо отметить максимальное снижение количества целлюлозоразрушающих бактерий во всех вариантах с применением различных мелиорантов в лугово-черноземной почве равнинного повышения по отношению к контролю. Из этого можно сделать предположение, что в данной почве применение химических мелиорантов не было оправданно для увеличения количества группы целлюлозолитиков.

В черноземно-луговой почве понижения (Р-1) лишь в варианте с применением гипса и дефеката

в дозе 2.5 + 2.5 т/га их численность превышала контроль, применение гипса и дефеката по 5 т/га привело к сокращению числа целлюлозолитиков соответственно до 56.1 и 53.7 тыс. КОЕ/г почвы.

В черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3), наоборот, лишь в варианте с применением гипса и дефеката в дозе 2.5 + 2.5 т/га их численность была меньше контроля. Применение в качестве мелиорантов гипса 5 т/га, а также дефеката 5 т/га привело к увеличению числа целлюлозолитиков соответственно до 66.6 и 91.5 тыс. КОЕ/г почвы.

Таким образом, численность целлюлозолитиков в наших исследованиях варьировала в интервале 43.6–91.5 тыс. КОЕ/г почвы. В разных по степени луговости почвах применение мелиорантов действовало на данную группу микроорганизмов неоднозначно – увеличение гидроморфизма почвы в сочетании с применением дефеката 5 т/га привело к максимальному увеличению количества клетчатковых микроорганизмов. Установлена средняя корреляционная зависимость обеспеченности почв нитратным азотом и активностью целлюлозолитиков: $r = 0.46 \pm 0.10$ доступным фосфором – $r = 0.35 \pm 0.08$.

Почвенные грибы представляют крупную экологическую группу, участвующую в минерализации органических остатков растений и животных и в образовании гумуса [25, 28, 29]. Грибы являются основными деструкторами таких сложных соединений, как лигнин, хитин, дубильные вещества, целлюлоза, гумус, делая возможным дальнейшее их использование другими организмами. Темная окраска мицелия некоторых микромицетов обусловлена накоплением меланиноподобных пигментов и имеет прогумусовый характер. Грибы требовательны к условиям аэрации, поэтому богаче представлены в верхних горизонтах почвы [30]. К основным деструкторам растительных остатков относятся микроскопические грибы [27–29]. Грибы очень чувствительны к условиям аэрации. Как правило, среди грибов практически отсутствуют анаэробные формы.

Показано, что распределение количества микромицетов в вариантах с различными мелиорантами было неравномерным. Изначально большее количество грибной микрофлоры было характерно для лугово-черноземной почвы повышения (Р-2), содержание грибов в контроле в этом случае было максимальным – 44.6 тыс. КОЕ/г а.с.п. Минимальное количество грибов в контроле содержалось в черноземно-луговой почве понижения (Р-1) – 25.6 тыс. КОЕ/г а.с.п. (табл. 2). Применение мелиорантов влияло на численность

грибной микрофлоры — максимальное количество грибов было при применении гипса 5 т/га в лугово-черноземной почве повышения (Р-2) — 44.6 тыс. КОЕ/г а.с.п., минимальное — при применении гипса и дефеката в дозе 2.5 + 2.5 т/га в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3) — 30.5 тыс. КОЕ/г а.с.п. В черноземно-луговой почве понижения (Р-1) во всех вариантах применения мелиорантов количество грибов увеличивалось по сравнению с контролем. В лугово-черноземной почве повышения (Р-2) их количество было меньше или на уровне контроля. В черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3) было в основном меньше, лишь при применении дефеката количество микромицетов превышало контроль.

Таким образом, количество грибной микрофлоры варьировало от 25.6 до 44.6 тыс. КОЕ/г а.с.п. Применение мелиорантов оказывало большее влияние на численность грибов в черноземно-луговой почве понижения (Р-1), в частности, во всех вариантах внесения мелиорантов привело к увеличению количества грибной микрофлоры.

Нитрификация — превращение аммиачного азота в нитратный. В процессе жизнедеятельности нитрифицирующих бактерий она проходит в 2 фазы. В первой фазе активны бактерии, называемые нитрозными, которые делятся на несколько видов и разновидностей (*Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosocistis* и др.). Во второй фазе участвуют нитратные бактерии (*Nitrobacter*). Эти бактерии широко распространены в почве, в иле. Это строгие автотрофы, аэробы, нуждающиеся в большом количестве кислорода. Они очень чувствительны к кислой реакции среды. Оптимальный pH для них равен 8.6 ед. Окисление аммиака приводит к подкислению почвы, которое может вызвать прекращение их размножения, если не будет проведено известкование. Нитрификаторы создают органическое вещество из углекислоты воздуха и воды за счет химической энергии окисления аммиака [31]. Нитрифицирующие бактерии окисляют аммиак, образующийся в процессе гниения органического вещества, до азотистой и азотной кислот, которые, взаимодействуя с минералами, образуют нитриты и нитраты. Полученная энергия тратится на образование органического вещества из углекислого газа, эти бактерии широко распространены в почве. Нитрифицирующие бактерии благодаря накоплению азотнокислых солей в почве являются чрезвычайно полезными бактериями, определяющими урожайность полей. В течение года в почве может накопиться >300 кг HNO_3 /га. Это количество достаточно для азотного питания растений, и оно оказывает

большое влияние и на их фосфорное питание, ибо азотная кислота растворяет труднорастворимые фосфорнокислые соли, превращая их в усвояемые растениями формы [31].

Проведенные исследования свидетельствовали о положительной роли мелиорантов в активизации нитрификаторов. При этом в контроле их максимальная активность отмечена в почве равнинного понижения (0.46 тыс. КОЕ), затем следовала лугово-черноземная почва равнинного повышения (0.43 тыс. КОЕ), на последнем месте — почва ложбинообразного понижения с количеством нитрификаторов на уровне 0.41 тыс. КОЕ. В луговой почве равнинного понижения и повышения во всех вариантах от применения мелиорантов отмечено наибольшее увеличение количества нитрификаторов. Максимальное содержание этой группы микроорганизмов отмечено в лугово-черноземной почве повышения (Р-2) в варианте с применением гипса и дефеката в дозе 2.5 + 2.5 т/га — 0.56 тыс. КОЕ/г а.с.п., минимальное — 0.39 тыс. КОЕ/г а.с.п. в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения (Р-3) при применении дефеката 5 т/га. Исследования показали, что в почве Р-1 максимальное воздействие на эту группу микроорганизмов оказало применение гипса и дефеката в дозе 2.5 + 2.5 т/га, в почве Р-2 получены аналогичные результаты, в почве Р-3, наоборот, отмечено уменьшение содержания нитрификаторов, хотя в вариантах с применением гипса в дозе 5 т/га и дефеката в дозе 5 т/га происходило незначительное увеличение нитрификаторов по сравнению с контролем.

Таким образом, большее влияние на содержание нитрификаторов оказало совместное применение гипса и дефеката в дозе 2.5 + 2.5 т/га в лугово-черноземной почве повышения (Р-2) и черноземно-луговой почве понижения (Р-1), причем, в черноземно-луговой почве понижения (Р-1) во всех вариантах применения мелиорантов количество нитрификаторов увеличивалось по сравнению с контролем.

Установлена корреляционная связь обеспеченности почв элементами минерального питания с активностью нитрификаторов. Коэффициент парной корреляции составил $r = 0.51 \pm 0.11$ (азот и нитрификаторы) и $r = 0.35 \pm 0.10$ (фосфор и нитрификаторы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате опыта химической мелиорации луговых почв с применением в качестве мелиорантов гипса и дефеката были установлены закономерности изменения активности почвенных

микроорганизмов. Более высокая общая численность всех компонентов почвенной микрофлоры была характерна для почв с более коротким периодом ранневесеннего переувлажнения. Применение в качестве мелиорантов гипса и дефеката оказывало стимулирующее действие на активность микрофлоры.

Удалось выявить довольно четкую зависимость увеличения численности микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота, от применения гипса в луговых почвах равнинного микрорельефа. Доля микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота, в этом случае под воздействием мелиорантов снижалась.

Минерализационные процессы органического вещества в исследовании были максимально выражены в лугово-черноземной почве на равнинном повышении и понижении при применении мелиорантов. Подтверждением этого служило расширение соотношения микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота, к количеству микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота. Вместе с тем необходимо отметить снижение минерализационных процессов в черноземно-луговых почвах ложбинообразного понижения при совместном применении гипса и дефеката в дозах 2.5 + 2.5 т/га.

Максимальная численность актиномицетов была характерна для луговых почв равнинного микрорельефа. В черноземно-луговой почве ложбинного понижения отмечено существенное снижение их активности. Под влиянием приемов химической мелиорации количество актиномицетов заметно снижалось по отношению к контролю.

Отмечен явный стимулирующий эффект дефеката и гипса на увеличение активности минерализаторов гумуса во всех почвенных разностях. Для большинства вариантов отмечено влияние мелиорантов на численность минерализаторов гумуса в сторону их увеличения по сравнению с контролем.

Применение мелиорантов не оказало существенного влияния на количество колоний азотобактера. Какую-либо заметную закономерность, связанную с применением мелиорантов на данных почвах, выявить не удалось. Можно лишь отметить увеличение количества колоний азотобактера при применении гипса и дефеката в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения.

Численность целлюлозолитиков варьировала в интервале 43.6–91.5 тыс. КОЕ/г почвы. В разных по луговости почвах применение мелиорантов действовало на данную группу микроорганизмов неоднозначно — увеличение гидроморфизма

почвы в сочетании с применением дефеката 5 т/га привело к максимальному увеличению клетчатковых микроорганизмов в черноземно-луговой почве ложбинообразного понижения.

На численность микромицетов применение мелиорантов большее влияние оказало в черноземно-луговой почве равнинного понижения. В этих условиях применение всех мелиорантов привело к увеличению численности грибной микрофлоры. Более высокое фоновое количество микромицетов было характерно для лугово-черноземной почвы равнинного повышения.

Установлена положительная роль применения гипса и дефеката на активность нитрификаторов в лугово-черноземных почвах повышения и черноземно-луговой почве равнинного и ложбинообразного понижения во всех вариантах применения мелиорантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Причины возникновения и география временно переувлажненных и затопленных почв Каменной Степи // Бюл. Почв. ин-та. 2007. Вып. 59. С. 3–13.
2. Хитров Н.Б., Назаренко О.Г. Распространение переувлажненных почв в исходно автоморфных ландшафтах Ростовской области при ведении “сухого” земледелия. М.: АПР, 2012. С. 125–166.
3. Исаев В.А., Овечкин С.В., Козут Б.М., Хитров Н.Б. Влияние временного переувлажнения на гумусовый профиль степных черноземов ЦЧО // Тез. докл. Всесоюз. конф. “Агропочвоведение и плодородие почв”: Л., 1986. С. 51–52.
4. Исаев В.А. Иванов А.Л. Обзор исследований периодически избыточно-увлажненных почв в Каменной Степи // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2020. № 1. С. 17–23.
<https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/1/17-23>
5. Чевердин Ю.И. Изменения свойств почв юго-востока Центрального Черноземья под влиянием антропогенного воздействия: Монография. Воронеж: “Истоки”, 2013. С. 336.
6. Баранова О.Ю., Исаев В.А. Остались ли черноземы обыкновенные в Каменной степи // Тез. докл. III съезда Докучаевского общ-ва почвоведов. М.: АПР, 2000.
7. Исаев В.А., Поротиков И.Ф. Изменение свойств гидроморфных солонцов ЦЧР в результате различных мелиораций // Научн. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1991. С. 90–95.
8. Левченко Е.А., Козлов Д.Н., Смирнова М.А., Авдеева Т.Н. Диагностические свойства и классификация почв лесостепи Вороно-Цнинского междуречья Приволжской возвышенности // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 3–26.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-3-26>

9. *Кирюшин С.В.* Проблема гидроморфизма почв и их использование в земледелии Центрального Черноземья // *Земледелие*. 2019. № 1. С. 3–6.
10. *Власенко В.П.* Изменение структуры почвенного покрова низменно-западных агроландшафтов Западного Предкавказья под влиянием переувлажнения. М.: АПР, 2012. С. 179–195.
11. *Хутакова С.В., Убугунова В.И.* Разнообразие гидроморфных почв лесостепной и степной зон Западного Забайкалья // *Почвы степных и лесостепных экосистем внутренней Азии и проблемы их рационального использования*. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., приуроч. к 90-летию заслуж. деятеля науки РБ, д-ра с.-х. наук, проф. Ишигенова И.А. Улан-Уде: Изд-во Бурят. ГСХА им. В.Р. Филиппова, 2015. С. 46–49.
12. *Темботов Р.Х.* Биохимические свойства гидроморфных почв Центрального Кавказа (в пределах терского варианта поясности Кабардино-Балкарии) // *Вестн. Адыгей. ГУ*. 2014. Вып. 4 (147). С. 85–93.
13. *Кутюкова О.В., Тхакахова А.К., Чевердин Ю.И.* Влияние поверхностного переувлажнения на биологические свойства лугово-черноземных почв Каменной Степи // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2016. Вып. 82. С. 56–70.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-56-70>
14. *Шулико Н.Н., Хамова О.Ф., Юшкевич Л.В., Тукмачева Е.В.* Экологическое состояние лугово-черноземной почвы при возделывании ячменя в условиях южной лесостепи Западной Сибири // *Плодородие*. 2022. № 3 (126). С. 80–83.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.126.21>
15. *Данилова Т.Н., Хомяков Ю.В., Конончук П.Ю.* Биологическая активность дерново-подзолистой супесчаной почвы при мелиоративном внесении гидрогелей // *Вестн. защит. раст.* 2021. Т. 104. № 2. С. 97–104.
<https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-2-13961>
16. *Шулико Н.Н., Тимохин А.Ю., Тукмачева Е.В.* Экологическое состояние лугово-черноземной почвы при длительном орошении // *Вестн. Ульянов. ГСХА*. 2021. № 3 (55). С. 79–85.
<https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-3-79-85>
17. *Шеуджен А.Х., Гуторова О.А., Онищенко Л.М., Осипов М.А., Есипенко С.В.* Микрофлора и биологическая активность чернозема выщелоченного равнинного агроландшафта при длительном применении минеральных удобрений // *Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5-ти томах. Т. I* / Под ред. В.Г. Сычева, Л. Мюлера. М.: ВНИИА, 2018. С. 367–392.
<https://doi.org/10.25680/1533.2018.90.54.070>
18. *Трус А.Н.* Биологическая активность чернозема оподзоленного после длительного применения удобрений в полевом севообороте // *Агробиология*. 2018. № 1 (118). С. 106–114.
19. *Гедгафова Ф.В., Горбцова О.Н., Улигова Т.С., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М.* Оценка изменения биологической активности горных серых лесных почв Центрального Кавказа (Терский вариант поясности в пределах Кабардино-Балкарии) в результате агроиспользования // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 23–30.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119040069>
20. *Ломова Т.Г., Коробова Л.Н.* Фитомелиоративное окультуривание солонцов Барабы и его влияние на биологическую активность почвы // *Сибир. вестн. с.-х. науки*. 2015. № 1 (242). С. 12–18.
21. *Ступина Л.А., Курсакова В.С., Иванов А.Н.* Влияние химической мелиорации на микробиологическую активность серых лесных почв // *Вестн. Алтай. ГАУ*. 2002. № 3 (7). С. 155–158.
22. *Масютенко Н.П., Брескина Г.М., Чуян Н.А.* Биологическая активность чернозема и урожай сахарной свеклы при внесении минеральных удобрений, извести и соломы // *Плодородие*. 2009. № 4 (49). С. 28–30.
23. *Бабичев А.Н., Бабенко А.А.* Влияние различных типов мелиораций на восстановление и повышение плодородия деградированных почв // *Мелиорат. и гидротехника*. 2022. Т. 1. № 1. С. 157–176.
<https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-157-176>
24. *Практикум по микробиологии* / Под ред. Егорова Н.С. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 307.
25. *Тепнер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И.* *Практикум по микробиологии*. М.: Дрофа, 2005. С. 256.
26. *Титова Т.В., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Рябцев А.Н., Гармашова Л.В., Рыбакова Н.П., Шеншина Н.А.* Изменение дифференциальной порозности почв Каменной Степи в условиях сезонного переувлажнения // *Агрофизика*. 2016. № 2. С. 1–10.
27. *Звягинцев Д.Г.* *Почва и микроорганизмы*. М.: Изд-во МГУ. 1987. С. 256.
28. *Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М.* *Биология почв*. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 445.
29. *Турсов В.И., Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Беспалов В.А., Сапрыкин С.В., Гармашова Л.В., Чевердин А.Ю.* Взаимосвязь микробиологических параметров и физических свойств черноземных почв // *Агрохимия*. 2017. № 11. С. 3–12.
30. *Никитин Д.А., Семенов М.В., Железова А.Д., Кутюкова О.В.* Влияние технологии No-till на численность и таксономический состав микроскопических грибов в южных агрочерноземах // *Микол. и фитопатол.* 2021. Т. 55. № 3. С. 189–202.
<https://doi.org/10.31857/S0026364821030077>
31. *Германов Н.И.* *Микробиология*. М.: Просвещение, 1967. С. 227.

Influence of Chemical Meliorants on Microbiological Activity of Chernozem-Meadow Soils

Yu. I. Cheverdin^{a, #}, T. V. Titova^a, and V. A. Bespalov^a

^a*Voronezh FASC named after V.V. Dokuchaev, POS 2 division of the Institute Dokuchaev quart. 5, 81, Voronezh region, Talovsky district 397463, Russia*

[#]*E-mail: cheverdin62@mail.ru*

The study was conducted in the Voronezh FASC “Kamennaya Steppe” in 2020–2022. The assessment of the state of the structure of microbial cenosis in meadow soils with the use of various chemical meliorants is given. Options for reclamation included the introduction of gypsum and defecate at a dose of 5 t/ha and a combination of their half doses. The number of ecological and trophic groups of microorganisms was determined by seeding on solid nutrient media. Accounting for organisms assimilating organic forms of nitrogen – by sowing on meat-peptone agar (MPA), accounting for organisms assimilating mineral forms of nitrogen – by sowing on starch-ammonium medium (SAM), accounting for organisms mineralizing humus – by sowing on nitrate agar, accounting for fungi – on Chapek medium, accounting for the amount of nitrogen – on soil plates, accounting for nitrifiers – on hungry agar, accounting for organisms that decompose fiber – on Vinogradsky’s medium. As a result of chemical reclamation of meadow soils with the use of gypsum and defecate as meliorants, patterns of changes in the activity of soil microorganisms were established. It was possible to identify a fairly clear dependence of the increase in the number of microorganisms that utilize organic forms of nitrogen on the use of meliorants in meadow soil of a hollow-shaped depression. Mineralization processes of organic matter were maximally expressed in meadow-chernozem soil on a plain rise when gypsum was used as a meliorant at a dose of 5 t/ha, while the use of gypsum and defecate at a dose of 2.5 + 2.5 t/ha had a greater effect on the content of nitrifiers in this soil. In the chernozem-meadow soil of a hollow-like decrease, the use of defecate at a dose of 5 t/ha led to an increase in the content of actinomycetes. In the chernozem-meadow soil of the plain depression, the use of all meliorants had an impact on the increase in the number of humus mineralizers, fungi, as well as nitrifiers compared with the control. It was not possible to identify any significant pattern associated with the use of meliorants on these soils for the maintenance of azotobacter colonies. In soils with different degrees of soil moisture, the use of meliorants had an ambiguous effect on the number of cellulolytics: an increase in soil hydromorphism in combination with the use of defecate at a dose of 5 t/ha led to a maximum increase in cellular microorganisms in the chernozem-meadow soil of a hollow-like decrease.

Key words: chernozem-meadow soils, chemical reclamation, gypsum, defecate, microbiological parameters of soils.

УДК 631.84: 631.847.2: 581.557.2: 635.656

РЕАКЦИЯ ГОРОХА НА АЗОТНОЕ УДОБРЕНИЕ И ИНОКУЛЯЦИЮ СЕМЯН РИТОРФИНОМ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ

© 2023 г. М. А. Алёшин^{1,2,*}, А. А. Завалин¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет им. акад. Д.Н. Прянишникова
614990 Пермь, ул. Петропавловская, 23, Россия

*E-mail: matvei0704@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Представлены результаты вегетационного опыта по установлению совместного влияния биопрепарата Ризоторфин и N-удобрения (дозы $N_{0,05}$, $N_{0,10}$, $N_{0,15}$, $N_{0,20}$, $N_{0,25}$) на формирование вегетативной массы и урожайность зерна гороха посевного при возделывании на слабо- и среднеокультуренной дерново-подзолистой почве. С повышением дозы N-удобрения с $N_{0,05}$ до $N_{0,25}$ наблюдали увеличение урожайности зеленой массы гороха на 3.4–22.2 г/сосуд (на слабоокультуренной) и на 10.3–35.5 г/сосуд (на среднеокультуренной почве). Прибавка урожая зерна от использования Ризоторфина в среднем в опыте составила 1.31 г/сосуд на слабо- и 1.66 г/сосуд на средне окультуренной почве. Внесение N-удобрения в условиях среднеокультуренной почвы повышало отзывчивость посевного гороха на инокуляцию до 1.70–1.87 г/сосуд. При использовании Ризоторфина и внесении N-удобрения увеличивалось накопление N в зерне гороха в соответствии со степенью окультуренности почвы на 0.22 и 0.18%. При использовании Ризоторфина происходило накопление N в корнях, что положительно сказалось на сохранении их активности и функционирования на более поздних этапах развития, поступления и накопления N в формирующемся зерне. Биопрепарат Ризоторфин влиял на накопление и распределение потребленного N между основной и побочной продукцией растений гороха. Благодаря этому, в фазе бутонизации—начало цветения $K_{хоз}$ увеличился до 0.83–0.88, и в зерне гороха было дополнительно аккумулировано 38.0–65.5 мг N/сосуд. С увеличением дозы N-удобрения свыше 0.05 г/кг на слабо- и 0.20 г/кг на среднеокультуренной почве процесс формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха полностью подавлялся.

Ключевые слова: азотное удобрение, дозы, биопрепарат Ризоторфин, окультуренность почвы, посевной горох, продуктивность, накопление азота, симбиотический аппарат.

DOI: 10.31857/S0002188123060030, **EDN:** QODPHA

ВВЕДЕНИЕ

На соотношение автотрофного и симбиотрофного путей питания азотом бобовых растений влияют не только генотипические особенности вида и культивируемого сорта. Значительное влияние оказывают эдафические условия, а также уровень плодородия почвы, воздействие которых отражается на нодуляции и активности симбиотических взаимоотношений [1]. При этом отмечено, что внешние факторы могут определять до 80% варьирования симбиотических признаков, и это влияние может быть значительно большим, чем совместное действие макро- и микросимбионта [2].

Эффективный симбиоз и азотфиксация является необходимым и первоочередным условием для интенсивного развития растений зернобобовых культур, формирования фотоассимиляционной поверхности и вегетативной массы, получения высоких и устойчивых урожаев зерна. Полноценное развитие и функционирование симбиотического аппарата на корневой системе бобовых культур снижает, а зачастую и полностью удовлетворяет их потребность в азоте. Однако при низкой эффективности азотфиксации бобовые активно используют азот почвы и удобрений, переходя на автотрофный тип питания [3].

Доля участия симбиотического азота в общем его потреблении бобовыми растениями меняется

от 0 до 95%, составляя в среднем 30–40–58% в зависимости от уровня плодородия почвы [4–7]. На низкоплодородной почве азотфиксация снижается из-за недостатка субстрата для диазотрофов. На высокоплодородной почве органического вещества достаточно для функционирования азотфиксирующей системы, кроме того, потребность растений в азоте удовлетворяется за счет текущей минерализации [8]. Эти положения определяют актуальность изысканий в этом вопросе и постановку цели исследования – более детальное изучение эффективности совместного использования N-удобрения и бактериального препарата Ризоторфин для повышения продуктивности и азотфиксирующей способности у безлисточковых сортов гороха на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в вегетационном опыте по следующей схеме: фактор А – инокулирование посевного материала препаратом Ризоторфин (A_0 – без инокуляции, A_1 – при инокуляции), фактор Б – дозы N, г/кг абсолютно сухой почвы (B_0 – N_0 (контроль), B_1 – $N_{0.05}$, B_2 – $N_{0.10}$, B_3 – $N_{0.15}$, B_4 – $N_{0.20}$, B_5 – $N_{0.25}$). Повторность двенадцатикратная. Для закладки опыта использовали сосуды Митчерлиха (20×20), вмещающие 5 кг абсолютно сухой почвы. Влажность почвы поддерживали на уровне 60% ПВ, которая составляла 55%. В качестве объекта исследования был выбран перспективный сорт отечественной селекции посевного гороха безлисточкового морфотипа Агроинтел, рекомендуемый для зернового продовольственного использования. Азотное удобрение – N_{aa} , 34,4% д.в.

В опыте использовали пахотный слой дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почвы с разных участков учебно-опытного поля Пермского ГАТУ, отличающихся по степени окультуренности: мощности пахотного слоя, величине обменной кислотности и содержания подвижного фосфора, степени насыщенности почвы основаниями. Агрохимическая характеристика слабо окультуренной дерново-подзолистой почвы: сильноокислая реакция среды (pH_{KCl} 4.4, H_r – 5.7 ммоль/100 г почвы), S (по Каппену–Гильковицу) – 12.5 ммоль/100 г почвы, степень насыщенности основаниями – средняя. Обеспеченность подвижными формами (по Кирсанову) фосфора (44 мг/кг почвы) и калия (72 мг/кг почвы) – низкая, минеральным азотом [9] – повышенная (12 мг/кг почвы). Среднеокультуренная почва характеризовалась слабоокислой реакцией

среды (pH_{KCl} 5.1, H_r – 4.1 ммоль/100 г почвы), повышенной суммой обменных оснований (S – 17.5 ммоль/100 г почвы) и степенью насыщенности основаниями (81%). Обеспеченность подвижным фосфором (59 мг/кг почвы) и калием (92 мг/кг почвы) – средняя, минеральным азотом – повышенная (17 мг/кг почвы).

Содержание подвижных форм минерального азота ($N_{мин}$) в почве определяли по методике [10]. Накопление общего N в растениях вычисляли на основании фактического содержания N (в % абсолютно сухого вещества) в зеленой массе, зерне, соломе, корнях и клубеньках, которое определяли по ГОСТ 13496.4-93. Определение интенсивности развития симбиотического аппарата на корневой системе гороха проводили согласно методике [11].

Статистическую обработку результатов исследования проводили согласно рекомендациям [12] с использованием MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Азотный фонд почвы является важнейшей характеристикой ее плодородия. Поведение в почве легкодоступных форм минерального азота (нитратного, аммонийного) в первую очередь связано с ее микробиологической и биохимической активностью, поглотительно-выделительной деятельностью растений и микроорганизмов. Это затрудняет выявление общих закономерностей в поведении соединений азота почвы [13]. Обеспеченность растений бобовых культур азотом является необходимым условием формирования и последующего функционирования активного бобово-ризобияльного симбиоза [14]. Для определения обеспеченности растений гороха учитывали общее содержание подвижных форм минерального азота ($N_{мин} = N-NO_3 + N-NH_4$) в пахотном слое почвы (рис. 1).

Исследование показало, что обеспеченность почвы минеральным азотом на начальном этапе развития гороха была повышенной (>10 мг/кг почвы). Это отчасти может быть обусловлено высокой нитрификационной способностью почвы и интенсивным вовлечением аммиачного азота в процессы окисления. Наиболее контрастные данные по содержанию минерального азота в почве получены в фазе ветвления стебля: на слабоокультуренной почве содержание минерального азота составляло от 12.3 до 20.9 мг/кг почвы, на среднеокультуренной почве – от 29.7 до 45.8 мг/кг почвы. Применение интродуцируемых штаммов ризобий при инокуляции способствовало более интенсивному проявлению симбиотической ак-

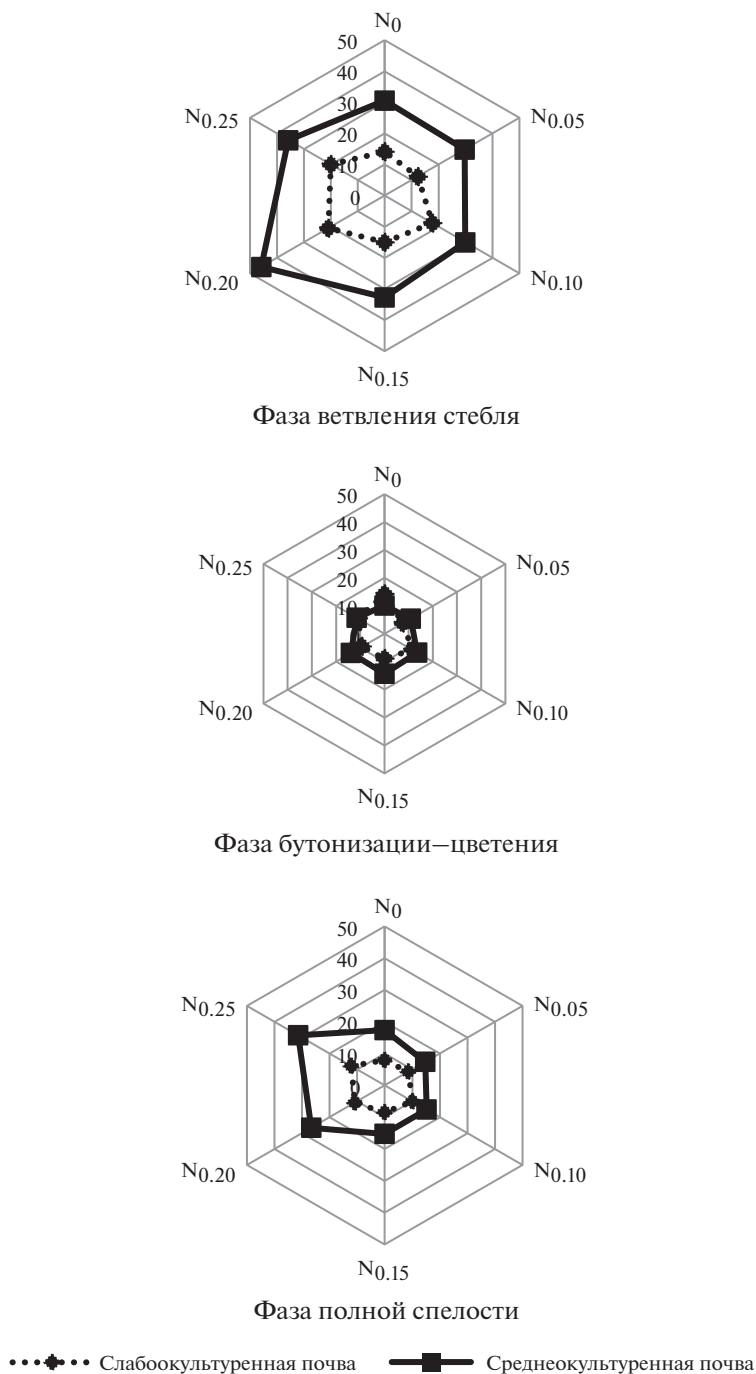


Рис. 1. Динамика содержания подвижного минерального азота ($N_{\text{мин}}$, мг/кг) в дерново-мелкоподзолистой почве в фазах развития гороха.

тивности, в результате чего растения менее активно использовали почвенные запасы азота. Более сильная корреляционная зависимость ($r = 0.79–0.86$) между дозами азота и содержанием его минеральных форм в почве была отмечена в фазе полной спелости семян. На слабоокультуренной почве, на уровне тенденции зафиксировали более низкое содержание минерального азо-

та по сравнению со среднеокультуренной почвенной разностью. При содержании в почве 40–50 кг N/га образование розовых клубеньков на корнях клевера задерживалось на 10–15 сут. При этом не происходило образование ферментного комплекса нитрогеназы и стимулирование его активности. Избыток NO_3^- в клетке тормозило

Таблица 1. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на урожайность зеленой массы гороха, г/сосуд

Вариант	Срок уборки (фаза развития)			
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения	
	1	2	1	2
N ₀	16.7	25.1	49.4	52
N _{0.05}	20.9	35.4	52.8	70
N _{0.10}	21.1	40.0	58.6	73
N _{0.15}	28.3	44.1	59.8	79
N _{0.20}	34.9	45.5	65.1	84
N _{0.25}	38.9	53.5	65.7	88
Среднее	26.8	40.6	58.6	74
HCP ₀₅	2.4	5.2	7.3	13

Примечание. В графе 1 — слабоокультуренная почва, 2 — среднеокультуренная почва. То же в табл. 2, 7—10.

образование аминокислот из кетокислот и аммиака. В результате снижался синтез леггемоглобина и переход его в активную форму. Однако на хорошоокультуренных почвах этого не происходило под действием азотных удобрений [15]. Вопрос азотного питания зернобобовых культур — один из наиболее сложных и до настоящего времени дискуссионный. Поэтому необходимо обобщение отечественного и зарубежного опыта по этому вопросу с тем, чтобы выявить рациональное сочетание азота минеральных удобрений и накопленного за счет азотфиксации из атмосферы.

При изучении влияния доз N и предпосевной обработки семян Ризоторфином на урожайность зеленой массы гороха получены следующие результаты (табл. 1). На основании представленных результатов можно отметить, что при уборке растений гороха на зеленую массу в фазе ветвления стебля урожайность на слабо- и среднеокультуренной дерново-мелкоподзолистой почве составила 16.7–38.9 и 25.1–53.5 г сухого вещества/сосуд соответственно. В более поздний срок уборки (фаза бутонизации—начало цветения) урожайность растений в вариантах опыта увеличилась до 45.7–65.7 и 52.4–87.9 г/сосуд соответственно. Продуктивность растений на среднеокультуренной почве (в среднем в опыте) на начальной стадии развития (ветвление стебля) превышала в 1.1–1.3 раза. В фазе бутонизации—начало цветения продуктивность гороха на среднеокультуренной почве была больше в 1.3–1.9 раза. При возрастании доз удобрения от N₀ до N_{0.25} отмечали увеличение продуктивности растений гороха. Окупаемость азотного удобрения в условиях менее окультуренной дерново-подзолистой почвы в изученном диапазоне доз различалась не так су-

щественно. В фазе ветвления стебля она была на уровне 44.0–91.0 г/г N, в фазе бутонизации — начало цветения составляла 65.2–92.0 г/г N. На среднеокультуренной почве отмечали более существенную отзывчивость растений на использование азотного удобрения (>100 г/г N). При этом более высокая окупаемость в фазах развития 149–206 г/г N и 210–346 г/г N соответственно отмечена при использовании азотного удобрения в дозах 0.05 и 0.10 г N/кг почвы.

Листья, стебли, черешки, корни и клубеньки гороха активно аккумулируют азот во время вегетативного развития вплоть до завязывания бобов. Больше всего азота накапливается в листьях. На момент формирования бобов отмечается отток азота из вегетативных органов к формирующимся семенам. Влияние азотного удобрения и предпосевной обработки семян ризоторфином на содержание азота в зеленой массе растений гороха представлено в табл. 2. На начальном этапе развития (фаза ветвления), содержание азота в вегетативной массе гороха определялось степенью окультуренности почвы. При последующем учете в фазе бутонизации—цветения более высокое содержание азота отмечено на слабоокультуренной почве. Это обусловлено большей отзывчивостью растений гороха на внесение возрастающих доз N-удобрения на менее плодородной дерново-подзолистой почве. В целом в опыте можно было наблюдать возрастающий тренд в содержании азота в составе вегетативной массы растений гороха относительно использованных доз азотного удобрения. Следует отметить, что зернобобовые культуры не отзывчивы на минеральный азот удобрений лишь при оптимальных агрохимических свойствах почвы (pH, содержа-

ние элементов питания) и эдафических условиях для симбиотической азотфиксации, что в рамках конкретного производства наблюдали достаточно редко.

Эффективность доз азота и биопрепарата Ризоторфин для предпосевной инокуляции семян при уборке гороха на зерно рассмотрена в табл. 3. Согласно полученным результатам, урожайность зерна гороха на среднеокультуренной почве составила 6.91–8.64 г/сосуд, что 1.24–1.25 раза больше, чем в условиях слабоокультуренной почвы. Прибавка урожая от обработки семян гороха микробиальным препаратом Ризоторфин перед посевом составила от 1.31 г/сосуд на слабоокультуренной почве, до 1.66 г/сосуд на среднеокультуренной почве. Эффективность Ризоторфина была более устойчивой в отдельных вариантах (1.66–1.85 г/сосуд) и более существенной в среднем в опыте (1.74 г/сосуд) на среднеокультуренной почве. В условиях слабоокультуренной почвы существенная прибавка от инокуляции семян (1.23–1.98 г/сосуд) получена только при использовании более высоких доз азота ($N_{0.15}$ – $N_{0.25}$). Влияние доз азота на зерновую продуктивность растений гороха в условиях слабоокультуренной почвы было не однозначным. Изначально при внесении $N_{0.05}$ выявлена тенденция к увеличению урожая зерна. В диапазоне доз от $N_{0.05}$ до $N_{0.20}$ (без инокуляции) и от $N_{0.05}$ до $N_{0.15}$ (при инокуляции посевного материала) наблюдали существенное снижение урожая. Повышение доз N до 0.25 г/кг почвы в обоих случаях способствовало существенному росту зерновой продуктивности гороха до 6.38 и 8.29 г/сосуд соответственно. Есть все основания предполагать, что в этих условиях растения посевного гороха переходят на автотрофный тип питания азотом внесенного удобрения. На основании урожайных данных следует сказать об эффективности совместного использования инокуляции посевного материала и минерального азота в условиях слабоокультуренной почвы при возделывании гороха на зеленую массу. При возделывании гороха на зерно эффективно одностороннее использование инокуляции посевного материала микробиальным препаратом Ризоторфин. На дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности уже при внесении $N_{0.05}$ отмечали повышение урожая гороха. Однако существенным уровнем прибавки можно считать только то количество (0.51 г/сосуд), которое получено при использовании инокуляции на среднеокультуренной почве, что подчеркивает необходимость данного приема даже в условиях старопахотных участков. Внесение азотных удобрений повышало отзывчивость посевного гороха на ис-

Таблица 2. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в растениях гороха, %

Вариант	Срок уборки (фаза развития)			
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения	
	1	2	1	2
N_0	1.40	1.82	2.31	2.31
$N_{0.05}$	1.97	2.48	2.76	2.49
$N_{0.10}$	2.22	2.55	2.94	2.61
$N_{0.15}$	2.30	2.70	3.03	2.76
$N_{0.20}$	2.40	2.87	3.57	3.30
$N_{0.25}$	2.48	2.92	3.60	3.46
HCP_{05}	0.19	0.40	0.43	0.63

пользование инокуляции в условиях средней окультуренности почвы до уровня 1.70–1.87 г/сосуд. Минимальный уровень зерновой продуктивности отмечен при внесении минерального азота в дозе 0.10 г/кг почвы. Последующее повышение доз до 0.20 г/кг почвы способствовало росту урожая гороха до 7.37 г/сосуд — без инокуляции и до 9.22 г/сосуд — при использовании инокуляции. Дальнейшее повышение дозы азота до 0.25 г/кг почвы приводило к повышению общей продуктивности растений в ущерб образованию урожая зерна. Таким образом, при использовании инокуляции посевного материала ризоторфином в условиях слабоокультуренной почвы максимально высокая урожайность гороха в опыте при уборке растений на зеленую массу и зерно была получена при внесении 0.25 г N/кг почвы. На среднеокультуренной почве максимальный урожай зеленой массы гороха получен также при внесении 0.25 г N/кг почвы, а при возделывании на зерно — 0.20 г N/кг почвы.

Отличительная особенность зернобобовых культур — высокое содержание азота и минеральных веществ в урожае. Влияние азотного удобрения и предпосевной обработки семян биопрепаратом Ризоторфин на содержание азота в зерне гороха представлено в табл. 4. С увеличением доз N-удобрения во всех фазах вегетации у гороха возрастало накопление биомассы, абсолютное содержание (концентрация) азота в ней и его накопление растениями. Эта тенденция сохранялась в фазе полной спелости зерна (соломы), а также подтверждалась величиной выноса азота биологическим урожаем. За счет использования Ризоторфина наблюдали увеличение накопления азота в зерне на 0.22% (слабоокультуренная почва) и на 0.18% (среднеокультуренная почва).

Таблица 3. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на урожайность зерна гороха, г/сосуд

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	5.9	7.2	6.5	6.60	8.26	7.43
N _{0.05}	6.7	7.9	7.3	7.01	8.77	7.89
N _{0.10}	4.3	5.4	4.9	6.63	8.30	7.47
N _{0.15}	4.7	5.9	5.3	7.06	8.85	7.96
N _{0.20}	5.2	7.2	6.2	7.37	9.22	8.30
N _{0.25}	6.4	8.3	7.3	6.76	8.46	7.61
Среднее	5.5	7.0		6.91	8.64	
HCP ₀₅	1.1			0.45		

Таблица 4. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в зерне гороха, %

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	2.85	3.07	2.96	3.05	3.23	3.14
N _{0.05}	3.04	3.10	3.07	3.20	3.26	3.23
N _{0.10}	3.11	3.15	3.13	3.28	3.31	3.30
N _{0.15}	3.12	3.16	3.14	3.31	3.36	3.34
N _{0.20}	3.14	3.14	3.14	3.32	3.35	3.34
N _{0.25}	3.18	3.17	3.18	3.37	3.41	3.39
Среднее	3.07	3.13		3.26	3.32	
HCP ₀₅	0.18			0.15		

За счет инокуляции, как правило, происходило более интенсивное накопление азота в зерне и при внесении N-удобрения. По результатам исследований [16], показано, что за счет использования для инокуляции семян гороха Ризоторфина повышалась возможность использования азота в период налива зерна и при использовании возрастающих доз N-удобрения.

Использование удобрений и других агротехнических приемов должным образом отражалось на величине урожая не только основной, но и побочной продукции гороха (табл. 5). Выход сухой массы соломы в среднем в опыте составил 5.85–7.09 г/сосуд. За счет увеличения уровня окультуренности почвы урожайность соломы, учитывая всю совокупность данных, увеличилась на 0.90 г/сосуд или на 14.9%. Использование Ризоторфина также способствовало существенному увеличению урожайности соломы гороха. На сла-

боокультуренной почве прибавка составила 0.26 г/сосуд, на среднеокультуренной почве — 0.49 г/сосуд. На слабоокультуренной почве, на фоне использования азотного удобрения в дозах 0.05–0.20 г N/кг почвы урожайность соломы при инокуляции семян Ризоторфином увеличилась на 0.18–0.66 г/сосуд. На более окультуренной почве прибавки от инокуляции на фоне азотного удобрения составили 0.24–0.54 г/сосуд. Использование активных штаммов ризобий в составе Ризоторфина способствовало формированию симбиотического аппарата и активизации процесса N-фиксации. Это определенным образом отразилось на индуцировании ростовых процессов и нарастании вегетативной массы, сопровождаемое увеличением ассимиляционной поверхности растений. Применение N-удобрения также оказывало стимулирующее влияние на развитие и урожай соломы гороха. На дерново-подзолистой

Таблица 5. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на урожайность соломы гороха, г/сосуд

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	4.65	4.91	4.78	5.56	6.05	5.81
N _{0.05}	5.09	5.27	5.18	6.34	6.72	6.53
N _{0.10}	5.49	5.79	5.64	6.66	6.90	6.78
N _{0.15}	6.17	6.54	6.36	7.04	7.29	7.17
N _{0.20}	6.52	6.73	6.63	7.38	7.71	7.55
N _{0.25}	7.15	7.81	7.48	7.35	7.89	7.62
Среднее	5.85	6.76		6.72	7.09	
HCP ₀₅	0.23			0.34		

слабоокультуренной почве прибавки урожайности составили 0.44–2.50 г/сосуд. Использование инокуляции Ризоторфином усилило отдачу от N-удобрения до 0.36–2.90 г/сосуд. На почве среднего уровня окультуренности прибавки урожайности от N-удобрения составили 0.78–1.79 г/сосуд. За счет использования микробиального препарата Ризоторфин наблюдали снижение отзывчивости растений гороха на N-удобрение. На основании представленных результатов можно говорить о наблюдаемом синергическом эффекте от использования N-удобрения на фоне инокуляции Ризоторфином семян гороха перед посевом на слабоокультуренной дерново-подзолистой почве.

С ростом и развитием растений происходит изменение не только биометрических размеров, но и химического состава развивающихся органов. Снижение физиологической активности процессов по мере созревания сопровождалось уменьшением концентрации элементов питания. Вместе с этим общей характерной чертой для гороха было значительное накопление азота, фосфора, калия не только в зерне, но и в соломе. Результаты по влиянию азотного удобрения и предпосевной обработки семян Ризоторфином на элементный состав соломы гороха в фазе полной спелости семян представлены в табл. 6. Было установлено, что содержание азота в соломе варьировало от 1.13 до 1.58% на слабоокультуренной почве и от 1.37 до 1.72% на среднеокультуренной почве. Предпосевная инокуляция семян Ризоторфином не оказала существенного влияния на содержание азота в соломе. Хотя без внесения N-удобрения на слабо- и среднеокультуренной почве отмечена тенденция к увеличению накопления азота в урожае побочной продукции. Внесение

возрастающих доз N-удобрения отразилось неоднозначно на элементном составе урожая побочной продукции. Следует сказать о существенном увеличении накопления азота в соломе гороха на 0.48–0.59% в условиях среднеокультуренной почвы при внесении N_{0.15–0.20} без использования Ризоторфина. При применении бактериального препарата таких “непроизводительных” издержек азота отмечено не было. Применение Ризоторфина способствовало более интенсивному накоплению N-содержащих соединений в растениях гороха и их последующему более полному оттоку в созревающие семена.

Проведение исследования в условиях вегетационного опыта позволило провести оценку влияния рассмотренных приемов на развитие корневой системы гороха и выявить некоторые тенденции (табл. 7). Накопление массы сухого вещества корневых остатков в опыте наблюдали до момента полного созревания культуры. Более интенсивное развитие корневой системы гороха при других равных условиях отмечено на среднеокультуренной почве. Прежде всего это определялось интенсивностью развития растений и только потом количеством и доступностью элементов питания в почве. Инокуляция семян Ризоторфином способствовала увеличению выхода сухой массы корневых остатков гороха. На почве слабой степени окультуренности без внесения N-удобрения прибавка массы корневых остатков гороха составила 16.1%. При использовании азотного удобрения N_{0.05–0.15} прибавка от инокуляции сохранялась на уровне 19.4–25.3%. Последующее увеличение доз до N_{0.20–0.25} привело к сокращению прибавки до 4.4–8.8%. На среднеокультуренной почве без внесения N-удобрения

Таблица 6. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в соломе гороха, %

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	1.13	1.29	1.21	1.37	1.44	1.41
N _{0.05}	1.31	1.37	1.34	1.45	1.56	1.51
N _{0.10}	1.47	1.42	1.45	1.51	1.54	1.53
N _{0.15}	1.49	1.55	1.52	1.62	1.55	1.59
N _{0.20}	1.58	1.57	1.58	1.61	1.44	1.53
N _{0.25}	1.57	1.52	1.55	1.72	1.41	1.57
Среднее	1.43	1.45		1.55	1.49	
HCP ₀₅	0.17			0.13		

прибавка от использования бактериального препарата была существенно меньше — 8.3%. В этих условиях внесение N-удобрения не обеспечивало более интенсивного развития корневой системы гороха даже за счет использования инокуляции, а при более высокой дозе (N_{0.25}) даже ограничивало ее развитие. При внесении в почву азотного удобрения у гороха наблюдали усиление ростовых процессов. Эти изменения фиксировали по морфобиометрическим параметрам не только надземной части растений, но и корневых систем. За счет совместного использования N-удобрения с Ризоторфином, наблюдали более активное формирование вторичной корневой системы и увеличение массы корневых остатков гороха. Прибавки в выходе сухой массы корневых систем в фазе ветвления стебля от использования азотного удобрения на слабоокультуренной почве составили 0.67–2.40 г/сосуд, на среднеокультуренной — 0.75–2.72 г/сосуд. Отмеченную тенденцию наблюдали и в последующих фазах развития гороха. В фазе бутонизации—начала цветения прибавки массы корневых систем растений в соответствии с окультуренностью почвы составили 0.82–1.51 и 0.89–1.70 г/сосуд соответственно. Максимальные прибавки в опыте (3.59 и 3.29 г/сосуд) в фазе полной спелости зерна были отмечены на слабо- и среднеокультуренной почве от внесения N_{0.25}.

По мере созревания урожая и замедления развития растений гороха наблюдалось и снижение содержания N, P₂O₅, K₂O в вегетативных органах растений. Особенно резко снизилось содержание азота, калия и меньше — фосфора. Та же тенденция была отмечена для элементного состава корневой системы гороха (табл. 8). В фазе ветвления стебля содержание азота в корневой системе на

слабоокультуренной почве изменялось от 1.58 до 2.40%, на среднеокультуренной — от 1.67 до 2.45%. Наименьшее накопление азота в биомассе корней (1.58 и 1.67%) отмечено без применения N-удобрения. Более высокое накопление азота на слабоокультуренной почве было зафиксировано при внесении 0.10 г N/кг почвы, на среднеокультуренной почве — 0.25 г N/кг. С появлением аттрагирующих центров в растениях, которыми к фазе бутонизации—начала цветения являются клубеньки на корневой системе гороха, а к моменту созревания — семена, наблюдали выраженный отток питательных веществ. Накопление азота с учетом окультуренности почвы снизилось на 0.46–0.80% (слабоокультуренная) и на 0.40–1.06% (среднеокультуренная почва). К моменту созревания гороха нисходящий тренд накопления азота в составе корневой системы сохранился. Более отчетливо это прослежено без инокуляции семян Ризоторфином. Влияние Ризоторфина на содержание N в корневой системе гороха было следующим. При бактеризации наблюдали накопление азота в корнях при созревании зерна. Это указывает на более высокую активность и сохранение функционирования корневой системы, что положительно сказалось на поступлении и накоплении азота в формирующихся зернах. Сохранность активного физиологического состояния корневой системы находилось в тесной координации с работой фотосинтетического аппарата бобовых культур, от действия которого зависит не только поток ассимилятов к плодам, но и возможности симбиотрофного питания азотом. Использование N-удобрения стимулировало развитие корневой системы, накопление в ее составе азота: в фазе ветвления стебля — на 0.18–0.82%,

Таблица 7. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на количество корневых остатков гороха, г/сосуд

Вариант	Срок уборки (фаза развития)							
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения		полная спелость			
	при инокуляции				без инокуляции		при инокуляции	
	1	2	1	2	1	2	1	2
N ₀	2.33	2.67	3.96	4.48	4.2	5.3	4.83	5.76
N _{0.05}	3.00	3.42	4.78	5.37	5.2	7.6	5.36	7.89
N _{0.10}	3.73	4.24	4.87	5.52	5.6	7.7	6.71	8.09
N _{0.15}	3.91	4.47	5.33	6.01	5.8	7.9	7.23	8.64
N _{0.20}	4.48	5.11	5.47	6.18	7.5	8.3	7.83	8.93
N _{0.25}	4.73	5.39	5.40	6.07	7.7	8.9	8.42	9.05
Среднее	3.70	4.22	4.97	5.61	6.0	7.6	6.73	8.06
HCP ₀₅	0.40		0.53		1.1		0.86	

бутонизации—начало цветения — на 0.02—0.51%, полной спелости — на 0.05—0.07% в среднем в опыте. Однако зачастую эта тенденция сменялась снижением накопления азота в корнях при превышении условного порога доз N-удобрения. Наибольшее содержание азота в корневых остатках гороха посевного в опыте (2.05—2.07%), независимо от доз азотного удобрения и инокуляции Ризоторфином, наблюдали в фазе ветвления стебля, что совпадало с наиболее активным периодом процесса формирования симбиотического аппарата. По мнению [17], содержание азота в бобово-ризобийном комплексе может оставаться на низком уровне в результате быстрого переноса азотсодержащих веществ из бактериоида в ткани растения, даже несмотря на высокую азотфиксирующую активность. Благодаря этому в системе поддерживается высокая активность нитрогеназы, что обеспечивает экологическую целесообразность взаимодействия организмов. Существенных различий по содержанию азота в составе корневых остатков в зависимости от уровня окультуренности дерново-мелкоподзолистой почвы и использованных доз азота в опыте не было отмечено.

По развитию хозяйственно ценной надземной массы растений гороха и ее соотношения с пожнивными и корневыми остатками можно судить о сбалансированности минерального питания растений, эффективности расходования основных элементов в процессе их выращивания (табл. 9). Соотношение между надземной вегетативной массой растений и корневой системой имело возрастающий тренд на почве слабой и средней степени окультуренности. Варьирование этого пока-

зателя на слабоокультуренной почве в фазе ветвления стебля составило 1.2 ед. против 1.5 ед. на среднеокультуренной почве. К фазе бутонизации—начала цветения отмечали рост соотношения и увеличение варьирования признака. На слабоокультуренной почве диапазон соотношения составил 11.0—12.5 против 11.7—14.5 на среднеокультуренной почве. Выраженной зависимости между дозами азота и соотношением “надземная масса: пожнивно-корневые остатки” в фазах развития не было отмечено. Исключением можно считать тенденцию к увеличению рассмотренного соотношения при внесении N-удобрения на среднеокультуренной почве в фазе бутонизации—начала цветения.

Использование N-удобрения и бактериального препарата Ризоторфин приводило к изменению направленности ростовых процессов и распределения пластических веществ к моменту созревания культуры (табл. 10). В случае уборки гороха на зерно, соотношение основной и побочной продукции становилось еще более тесным. Зависело это от количества формируемого зерна на растениях и нарастания вегетативной массы, развития корневой системы. На все эти параметры однозначно влияло использование азотного и бактериального удобрений. Следует заметить, что более широкое соотношение между зерном и соломой (1.11—1.50), а также между зерном и суммарным количеством побочной продукции (0.60—0.70), получено без внесения N-удобрения или при использовании минимальной дозы (N_{0.05}) в опыте. Наблюдаемое снижение этого соотношения при внесении N-удобрения означало

Таблица 8. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в корневых остатках гороха, %

Вариант	Срок уборки (фаза развития)							
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения		полная спелость			
	при инокуляции				без инокуляции		при инокуляции	
	1	2	1	2	1	2	1	2
N ₀	1.58	1.67	1.12	1.27	0.97	1.09	1.11	1.15
N _{0.05}	2.18	1.85	1.45	1.29	1.13	1.10	1.30	1.10
N _{0.10}	2.40	2.06	1.60	1.32	1.20	0.99	1.45	1.24
N _{0.15}	2.34	2.21	1.63	1.38	1.28	1.01	1.21	1.17
N _{0.20}	1.99	2.18	1.56	1.35	1.14	0.89	1.19	1.12
N _{0.25}	1.81	2.45	1.21	1.39	0.95	1.12	1.13	1.05
HCP ₀₅	0.33		0.18		0.17		0.12	

Таблица 9. Соотношение вегетативных частей растений гороха “надземная масса ПКО” в разных фазах вегетации

Вариант	Ветвление стебля		Бутонизация—начало цветения	
	1	2	1	2
N ₀	7.2	9.4	12.5	11.7
N _{0.05}	7.0	10.4	11.0	13.0
N _{0.10}	5.7	9.4	12.0	13.3
N _{0.15}	7.2	9.9	11.2	13.1
N _{0.20}	7.8	8.9	11.9	13.6
N _{0.25}	8.2	9.9	12.2	14.5
Среднее	7.2	9.6	11.8	13.2

более существенное увеличение зерновой продуктивности растений наряду с отмеченным ростом выхода соломы и пожнивно-корневых остатков. На основании средних показателей можно констатировать, что при обработке посевного материала гороха препаратом Ризоторфин наблюдали увеличение соотношения между зерном и соломой на слабо- и среднеокультуренной почве. Сорта с пониженным отношением соломы к зерну, низким стеблем и крупным озерненным колосом, с мощной корневой системой, скоро-спелые, устойчивые к полеганию и засухе, и иммунные к болезням и вредителям, в большей степени отвечают рациональному использованию минеральных удобрений [18]. Для более полной реализации этих возможностей нужно повсеместно применять сортовую агротехнику как обязательный элемент системы земледелия.

По утверждению [19], “...система применения азотных удобрений в агроландшафтах должна

быть дифференцированной и адаптированной к разным типам земель, обеспечивая минимальные потери азота и эффективное его использование”. Эти требования к применению N-удобрений при возделывании зернобобовых культур могут быть реализованы при детальной оценке выноса N и его баланса с учетом биологического и сортового потенциала культур, термогидрологических особенностей территории и степени окультуренности почв [20]. Анализ содержания азота в отдельных частях растений посевного гороха и динамики формирования надземной биомассы в онтогенезе показал, что основная часть N потребляется культурой в период от всходов до фазы бутонизации—начала цветения (табл. 11). Внесение N-удобрения способствовало существенному увеличению выноса азота надземной биомассой гороха посевного. Применение N_{0.05–0.25} перед посевом гороха на слабоокультуренной почве повысило величину потребления N растениями в фазе

Таблица 10. Соотношение основной и побочной продукции в фазе полной спелости зерна гороха

Вариант	Зерно : солома				Зерно : (солома + ПКО)			
	без инокуляции		при инокуляции		без инокуляции		при инокуляции	
	1	2	1	2	1	2	1	2
N ₀	1.26	1.46	1.19	1.37	0.67	0.70	0.64	0.70
N _{0.05}	1.31	1.50	1.11	1.31	0.65	0.62	0.60	0.60
N _{0.10}	0.78	0.94	1.00	1.20	0.39	0.40	0.50	0.55
N _{0.15}	0.76	0.90	1.00	1.21	0.39	0.41	0.49	0.56
N _{0.20}	0.80	1.07	1.00	1.20	0.37	0.48	0.48	0.55
N _{0.25}	0.89	1.06	0.92	1.07	0.43	0.50	0.43	0.50
Среднее	0.97	1.16	1.03	1.23	0.48	0.52	0.52	0.58

стеблевания в 1.8–4.1 раза, на среднеокультуренной почве – в 1.9–3.4 раза. Благодаря этому коэффициент хозяйственного использования азота ($K_{\text{хоз}}$) соответственно увеличился на 0.03–0.13 и 0.03–0.06 ед. Последующее развитие гороха с учетом использования для предпосевной инокуляции семян биопрепарата Ризоторфин сопровождалось интенсивным потреблением N растениями. При внесении N_{0.20–0.25} на слабоокультуренной почве вынос азота суммарно превысил 500 мг N/сосуд. На среднеокультуренной почве потребление N растениями в фазе бутонизации–начала цветения было еще более активным. Более четко это прослежено для формирующейся надземной зеленой массы при внесении N-удобрения. В соответствии с этим происходило увеличение коэффициента полезного использования N до 0.83–0.88. При наступлении фазы формирования бобов происходило резкое изменение направленности физиолого-биохимических процессов во всех органах растений. Наиболее сильными аттрагирующими центрами становились семена. Большая часть симбиотически усвоенного азота и других питательных веществ зернобобовые культуры направляли на их формирование. К моменту полного созревания зерна наблюдали снижение интенсивности потребления азота растениями (табл. 12). Вынос азота зерном в большинстве вариантов превосходил его накопление в соломе и пожнивно-корневых остатках гороха. Наиболее четко это отмечено в контроле (N₀) и при внесении N_{0.05}. Использование биопрепарата Ризоторфин оказало влияние на накопление и распределение потребленного азота между основной и побочной продукцией. При инокуляции семян гороха в зерне было дополнительно аккумулировано 38.0–65.5 мг N/сосуд. Аналогичную тенденцию отметили для соломы и ПКО, вынос N увели-

чился на 3.7–31.4 мг/сосуд. Независимо от степени окультуренности почвы отмечали увеличение индекса $K_{\text{хоз}}$ для выноса N биологическим урожаем во всем рассмотренном диапазоне доз N-удобрения. В работе [8] показано, что при использовании биопрепаратов на слабо- и высокоплодородной почвах происходило увеличение доли азота удобрения в зерне от общего его накопления в растениях и снижалось его количество в побочной продукции и корнях. Коэффициенты хозяйственного использования N достаточно тесно коррелировали ($r = 0.56–0.99$) с соответствующими показателями, отражающими соотношение зерно : (солома + ПКО). Это указывало на то, что биологический вынос N горохом на 66.1–98.2% на слабоокультуренной и на 31.0–82.4% на среднеокультуренной дерново-подзолистой почве определялся продуктивностью растений. Различия в объемах потребленного и накопленного N отдельными органами растений в соответствии со степенью окультуренности почвы не были существенными и имели различную тенденцию. ПКО и солома гороха являются основной составляющей в объеме поступления свежего органического вещества в почву, которое после минерализации выступает не только источником элементов питания, но и субстратом для питания почвенных микроорганизмов, активатором симбиотической азотфиксации для ризобий, основой для продуцирования и эмиссии C-CO₂ и N-N₂O. Даже клубеньки, поступающие в почву в течение периода вегетации гороха, независимо от их активности, влияют на микробоценоз почвы, что выражается увеличением накопления минеральных форм N и микробной биомассы [21]. Величина относительного участия N почвы и удобрений в выносе этого элемента урожаем возделываемых культур существенно зависит от ряда условий. Принято считать, что чем выше окультуренность

Таблица 11. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на вынос N зеленой массой и ПКО гороха. мг/сосуд

Вариант	Срок уборки (фаза развития)					
	ветвление стебля			бутонизация—начало цветения		
	зеленой массой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$	зеленой массой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$
Слабооккультуренная почва						
N_0	58.5	36.8	0.61	228	44.4	0.84
$N_{0.05}$	103	65.4	0.61	292	69.3	0.81
$N_{0.10}$	117	89.5	0.57	345	77.9	0.82
$N_{0.15}$	163	91.5	0.64	362	86.9	0.81
$N_{0.20}$	209	89.2	0.70	465	85.3	0.84
$N_{0.25}$	241	85.6	0.74	473	65.3	0.88
Среднее	149	76.3	0.65	361	71.5	0.83
Среднеоккультуренная почва						
N_0	114	44.6	0.72	242	56.9	0.81
$N_{0.05}$	220	63.3	0.78	347	69.3	0.83
$N_{0.10}$	255	87.3	0.74	383	72.9	0.84
$N_{0.15}$	298	98.8	0.75	435	82.9	0.84
$N_{0.20}$	327	111	0.75	554	83.4	0.87
$N_{0.25}$	391	132	0.75	608	84.4	0.88
Среднее	267	89.6	0.75	428	75.0	0.85

почвы, тем меньше доля участия азота соответствующих удобрений в общем выносе N урожаем [22]. В условиях разной степени окультуренности и эродированности почвы доля почвенных запасов N в структуре выноса элемента урожаем обычно больше, чем из удобрений, и может достигать 84–85% [23].

Азотфиксация является важным условием в жизнеобеспечении зернобобовых культур. Условия прохождения этого процесса отражаются на урожайности и элементном составе растений. В исследовании [15] азотфиксация клевера первого года жизни повышалась на 6.8% по сравнению с фоном при внесении 30 кг N/га на слабооккультуренной почве, тогда как на хорошооккультуренной — снижалась на 12.2%. При внесении 60 кг N/га азотфиксация в 1-й год жизни на слабооккультуренной почве снижалась на 21.9, во 2-й год — на 21.0%. Сильнее ингибировалась азотфиксация во 2-й год жизни (30.6%) на хорошооккультуренной почве. Повышение плодородия дерново-подзолистой почвы приводило к снижению азотфиксации и использования азота атмосферы на 2.5–16.9% в абсолютных показателях при внесении N-удобрения.

Азотфиксирующая способность зернобобовых культур во многом зависит от сохранения численности и активности клубеньковых бактерий. Использование биопрепаратов на основе штаммов азотфиксирующих бактерий [24–29] называется одним из наиболее значимых условий, которое влияет на формирование и эффективность функционирования симбиотического аппарата гороха. Поэтому их использование для инфицирования корневых систем растений гороха афильных сортов является обязательным приемом современных агротехнологий [30, 31]. Вместе с тем известно, что и азотные соединения влияют на симбиотический аппарат бобовых на всех этапах его формирования. Действие проявляется на функционировании самого механизма симбиоза, начиная с образования микробного пула ризосферы и клубеньков и заканчивая процессом активной азотфиксации [32–34]. Наиболее приемлемыми параметрами для рассмотрения и последующей оценки влияния изученных факторов на развитие симбиотического аппарата, является общее количество активных коневых вздутий (клубеньков) и их суммарная масса в пересчете на 1 растение (табл. 13). На дерново-мелкоподзолистой слабооккультуренной почве формирование симбиотического аппарата в фазе ветвления стебля отмече-

Таблица 12. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на вынос N зерном, соломой и ПКО гороха, мг/сосуд

Вариант	Без инокуляции				При инокуляции			
	зерном	соломой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$	зерном	соломой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$
Слабооккультуренная почва								
N_0	167	52.5	40.4	0.64	220	63.3	53.6	0.65
$N_{0.05}$	203	66.7	59.1	0.62	246	72.2	69.7	0.63
$N_{0.10}$	133	80.7	67.4	0.47	171	82.2	97.3	0.49
$N_{0.15}$	146	91.9	73.9	0.47	187	101	87.5	0.50
$N_{0.20}$	164	103	85.5	0.46	226	106	93.2	0.53
$N_{0.25}$	202	112	73.5	0.52	264	119	95.1	0.55
Среднее	169	84.5	66.6	0.53	219	90.6	82.7	0.56
Среднеоккультуренная почва								
N_0	201	76.2	58.0	0.60	267	87.1	66.2	0.63
$N_{0.05}$	224	91.9	83.1	0.56	286	105	86.8	0.60
$N_{0.10}$	218	101	76.4	0.55	275	106	100	0.57
$N_{0.15}$	234	114	79.8	0.55	297	113	101	0.58
$N_{0.20}$	245	119	73.5	0.56	309	111	100	0.59
$N_{0.25}$	228	126	100	0.50	289	111	95.0	0.58
Среднее	225	105	78.5	0.55	287	106	91.6	0.59

но только в случае отсутствия дополнительного внесения минерального азота. В условиях среднеоккультуренной почвы формирование симбиотического аппарата при внесении минерального азота происходило более активно, увеличивалось общее количество клубеньков и их масса. Показатели масса и количество клубеньков независимо от степени окультуренности почвы достигали максимума в фазе бутонизации—начала цветения. К моменту появления на растениях бобов, выполняющих роль более сильных аттрагирующих центров для накопления питательных веществ, количество и масса клубеньков значительно уменьшались или исчезали вовсе. Наблюдался ограниченный отток питательных веществ к корням растений, что приводило к прекращению их активного функционирования и последующему отмиранию. Наряду с использованием инокуляции и азотного удобрения, главным эдафическим фактором, ограничивающим активность симбиоза бобовых культур и азотфиксирующих почвенных микроорганизмов, в том числе на территории Пермского края, является повышенная кислотность почвы [35]. Этот показатель особенно важен для сохранения численности пула ризобий в период между посевами зернобобовых культур. Для почв с $\text{pH} < 5.0$ численность *R. leguminosarum* bv. *viciae* не превышала 3.0×10^2 КОЕ/г почвы,

быстро снижалась в отсутствие бобового растения-хозяина и практически исчезала по прошествии 3 лет [36]. В этих условиях будет проявляться высокая эффективность применения инокуляции. Вместе с тем в кислых почвах уменьшается поглотительная способность корневой системы, увеличивается опробкование внешних тканей перидермы, что существенно осложняет образование корневых волосков и их последующее инфицирование. По мнению [37, 38], в кислой почве клубеньковые бактерии снижают свою вирулентность и активность, существенно уменьшается их выживаемость и интенсивность инфицирования корневых волосков [39]. При этом степень влияния кислотности почвы изменяется в зависимости от штаммовой разновидности ризобий. По результатам наших исследований, отмечено снижение массы и количества клубеньков в сильноокислой слабооккультуренной почве по сравнению со слабоокислой более окультуренной почвенной разностью. Этот фактор с высокой долей вероятности привел к получению более низкого урожая на слабооккультуренной почве во все сроки уборки (табл. 1, 3).

Следует также отметить разную отзывчивость растений гороха в условиях разной окультуренности почвы на дозы минерального азота. На слабооккультуренной почве, формирование симбиоти-

Таблица 13. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на динамику формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха

Степень окультуренности почвы	Доза азота	Срок уборки (фаза развития)					
		ветвление стебля		бутонизация—начало цветения		зеленые (плоские) бобы	
		шт.	мг	шт.	мг	шт.	мг
Дерново-подзолистая слабо-окультуренная	N ₀	8	34	15	203	4	14
	N _{0.05}	—	—	43	125	5	18
	N _{0.10}	—	—	4	11	—	—
Дерново-подзолистая средне-окультуренная	N ₀	32	154	36	746	—	—
	N _{0.05}	11	108	21	594	3	27
	N _{0.10}	13	103	68	382	5	76

ческого аппарата не происходило должным образом с увеличением дозы азота >0.05 г/кг почвы. На среднеокультуренной почве данный уровень превышен в 4 раза (0.20 г/кг). Применение более высоких доз азота полностью подавляет процесс формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха. Происходит переход растений на автотрофное потребление азота почвы и последующее его накопление в составе вегетативной массы и зерна. Единовременное внесение более высоких доз азотного удобрения оказывает угнетающее действие на развитие симбиотического аппарата, формирующегося на корневой системе, что в последующем отражается на продолжительности активного функционирования ассимилирующей поверхности растений гороха посевного в условиях слабо- и среднеокультуренной почвы.

Фиксация атмосферного азота клубеньковыми бактериями в симбиозе с бобовыми культурами начинается примерно на 15–20-е сут после появления всходов, но в начале вегетационного периода N из атмосферы потребляется медленно [40]. Продолжается этот процесс до созревания семян и последующего старения растений, а заметная его активность отмечена в фазе бутонизации—начала цветения. Об этом косвенно можно судить по морфо-биометрическим параметрам самих клубеньков и их элементному составу (табл. 14). Согласно полученным результатам, можно отметить, что наибольшее накопление азота в клубеньках гороха наблюдали в фазе бутонизации—начала цветения. В условиях слабоокультуренной почвы содержание азота варьировало от 4.35 до 4.91%. На более окультуренной почвенной разности накопление азота было больше на 19.3–36.3%. За счет использования азотного удобрения в условиях среднеокультуренной

почвы отмечена тенденция к увеличению накопления азота в составе клубеньков. Это могло свидетельствовать о высокой активности происходящих физиологических процессов, связанных с усвоением атмосферного азота, а также включении механизма со стороны макросимбионта, который ограничивает последующее усвоение азота биологическим путем. Последующее развитие растений гороха и его симбиотического аппарата сопровождалось снижением накопления азота в клубеньках на 47.5–64.4 и 50.6–72.4% соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Дифференциация содержания минерального азота при изначальном близком уровне содержания N_{мин} в слабо- и среднеокультуренной дерново-подзолистой почве зафиксирована к моменту наступления у гороха фазы ветвления стебля. Сильная положительная корреляционная зависимость ($r = 0.79–0.86$) между дозами Nудобрения и содержанием N_{мин} в почве установлена только в фазе полной спелости семян. Применение для инокуляции семян гороха бактериального препарата Ризоторфин способствовало индукции симбиотической активности ризобий. В результате этого горох менее активно использовал запасы подвижных форм минерального азота в почве.

2. При уборке гороха на зеленую массу, продуктивность растений на среднеокультуренной почве в фазе ветвления стебля была больше, чем на слабоокультуренной почве в 1.1–1.3 раза, в фазе бутонизации—начала цветения – в 1.3–1.9 раза. Урожайность зеленой массы при этом составила 2.1–53.5 и 52.4–87.9 г/сосуд соответственно. С повышением дозы N-удобрения с N_{0.05} до N_{0.25}

Таблица 14. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в клубеньках в фазах развития растений гороха, %

Степень окультуренности почвы	Доза азота	Фазы уборки		
		ветвление стебля	бутионизация—начало цветения	зеленые (плоские) бобы
Дерново-подзолистая слабоокультуренная	N ₀	2.35	4.41	1.57
	N _{0.05}	—	4.91	2.58
	N _{0.10}	—	4.35	—
Дерново-подзолистая среднеокультуренная	N ₀	2.73	5.32	—
	N _{0.05}	3.24	5.86	1.62
	N _{0.10}	3.38	5.93	2.93

наблюдали увеличение урожая зеленой массы гороха в соответствии со степенью окультуренности почвы на 3.4–22.2 и 10.3–35.5 г/сосуд.

3. Накопление N в вегетативной массе гороха определяла степень окультуренности почвы. При учете в фазе бутонизации—начала цветения более высокое содержание N (2.76–3.60%) отмечено на слабоокультуренной почве, что обусловлено большей отзывчивостью растений на внесение возрастающих доз N-удобрения на менее плодородной дерново-подзолистой почве.

4. Урожайность зерна гороха на среднеокультуренной почве была в 1.24–1.25 раза больше (6.91–8.64 г/сосуд), чем на слабоокультуренной почве. Прибавка урожая от использования Ризоторфина в среднем в опыте составила 1.31 г/сосуд на слабо- и 1.66 г/сосуд — на среднеокультуренной почве. Внесение N-удобрения в условиях среднеокультуренной почвы повышало отзывчивость посевного гороха на использование инокуляции Ризоторфином до 1.70–1.87 г/сосуд. За счет использования Ризоторфина и внесения N-удобрения наблюдали увеличение накопления N в зерне гороха на 0.22% (слабоокультуренная почва) и на 0.18% (среднеокультуренная почва).

5. Использование Ризоторфина способствовало увеличению выхода соломы гороха от 0.26 г/сосуд (слабоокультуренная почва) до 0.49 г/сосуд (среднеокультуренная почва) и снижению накопления в ее составе N на 0.48–0.59%. Применение Ризоторфина также было эффективным — выход соломы не зависимо от окультуренности почвы увеличился на 0.44–2.50 г/сосуд.

6. Более интенсивное развитие корневой системы гороха наблюдали на среднеокультуренной почве. Обработка семян гороха Ризоторфином способствовала увеличению выхода ПКО на 16.1–25.3% на слабоокультуренной почве, прибавка на среднеокультуренной почве составляла всего 8.3%. В этих условиях внесение N-удобре-

ния не обеспечивало более интенсивного развития корневой системы гороха, а при более высокой дозе (N_{0.25}) даже ограничивало ее развитие. При бактеризации семян Ризоторфином наблюдали накопление N в корнях. Это указывало на более высокую активность и сохранение функционирования корневой системы, что положительно сказалось на поступлении и накоплении N в формирующемся зерне.

7. Внесение N-удобрения способствовало существенному увеличению выноса азота с надземной биомассой гороха в фазе стеблевания на слабо- (в 1.8–4.1 раза) и среднеокультуренной почве (в 1.9–3.4 раза). В фазе бутонизации—начала цветения потребление N растениями гороха было еще более активным, K_{хоз} увеличился до 0.83–0.88. Использование биопрепарата Ризоторфин оказало влияние на накопление и распределение потребленного N между основной и побочной продукцией растений. Благодаря этому в зерне гороха было дополнительно аккумулировано 38.0–65.5 мг N/сосуд.

8. Формирование симбиотического аппарата на корневой системе гороха в фазе ветвления стебля на слабоокультуренной почве отмечено только в случае отсутствия дополнительного внесения N-удобрения. В условиях среднеокультуренной почвы формирование симбиотического аппарата при внесении N-удобрения происходило более активно — увеличивалось общее количество клубеньков и их масса. С увеличением дозы N-удобрения >0.05 г/кг на слабо- и >0.20 г/кг — на среднеокультуренной почве процесс формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха полностью подавлялся. Происходил переход растений гороха на автотрофное потребление азота почвы и связанное с ним последующее накопление N в составе вегетативной массы и зерна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завалин А.А. Применение биопрепаратов при возделывании полевых культур // Достиж. науки и техн. АПК. 2011. № 8. С. 9–11.
2. Новикова Н.Е. Физиологическое обоснование листовой подкормки для оптимизации питания зерновых бобовых культур в онтогенезе растений (обзор) // Зернобоб. и круп. культуры. 2018. № 1 (25). С. 60–67.
3. Otieno P.E., Muthomi J.W., Chemining'wa G.N., Nderitu J.H. Effect of rhizobia inoculation, farm yard manure and nitrogen fertilizer on nodulation and yield of food grain legumes // J. Biol. Sci. 2009. V. 9. P. 326–332.
<https://doi.org/10.3923/jbs.2009.326.332>
4. Дозоров А.В. Роль симбиотического азота в решении белковой проблемы // Международ. сел.-хоз. журн. 2000. № 2. С. 58–59.
5. Alves B.J.R., Boddey R.M., Urqiaga S. The success of BNP in soybean in Brazil // Plant. Soil. 2003. № 252. P. 1–9.
6. Russell M.P., Birr A.S. Large-scale assessment of symbiotic dinitrogen fixation by crops: soybean and alfalfa in the Mississippi River basin // Agron. J. 2004. № 96. P. 1754–1760.
7. Елисеев С.Л. Пути увеличения производства зернобобовых культур в Предуралье // Перм. аграрн. вестн. 2014. № 3 (7). С. 11–18.
8. Тихонович И.А., Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Кожемяков А.П. Использование биопрепаратов – дополнительный источник элементов питания растений // Плодородие. 2011. № 3. С. 9–11.
9. Шафран С.А. Проблема азота в земледелии России и ее решение // Сборник статей (к 100-летию со дня рожд. Т.Н. Кулаковской) “Плодородие почв России: состояние и возможности”. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2019. С. 32–39.
10. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. М.: ВИУА, 1975. 163 с.
11. Посыпанов Г.С. Методы изучения биологической фиксации азота воздуха. М.: Агропромиздат, 1991. С. 300.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: ИД Альянс, 2011. С. 352.
13. Белоусова Е.Н. Влияние многолетних трав и пара на структурный состав и мобилизацию минеральных форм азота чернозема Красноярской лесостепи // Вестн. Томск. ГУ. Биология. 2014. № 1 (25). С. 7–25.
14. Oldroyd G.E., Dixon R.D. Biotechnological solutions to the nitrogen problem // Curr. Opin. Biotechnol. 2014. V. 26. P. 19–24.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.08.006>
15. Трепачев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. С. 532.
16. Завалин А.А., Пасынков А.В. Азотное питание и прогноз качества зерновых культур. М.: ВНИИА, 2007. С. 208.
17. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. М.: РАН, 2019. С. 252.
18. Мерзлякин А.С., Абрамкина Л.П. Эффективность минеральных удобрений на сортах зерновых культур интенсивного типа селекции // Агрохим. вестн. 2011. № 5. С. 12–14.
19. Цыбулько Н.Н., Пунченко С.С., Жукова И.И. Потребление растениями и баланс азота на дерново-подзолистых почвах разной эродированности при возделывании ярового рапса // Вестн. БДПУ. Сер. 3. 2017. № 3. С. 5–15.
20. Семенов В.М. Слагаемые эффективности азотных удобрений в системе почва–растение и критерии их количественной оценки // Агрохимия. 1999. № 5. С. 25–32.
21. Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р. Метод оценки азотфиксирующей способности бобовых растений на основе симбиотических мутантов // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 2. С. 49–51.
22. Bowen G.D., Zapata F. Efficiency in uptake and use of nitrogen by plants // Stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies. Vienna: IAE, 1991. P. 349–362.
23. Цыбулько Н.Н., Киселева Д.В., Жукова И.И. Использование зерновыми культурами азота почвы и удобрений // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. 2008. № 2. С. 36–41.
24. Brkić S., Milaković Z., Kristek A., Antunović M. Pea yield and its quality depending on inoculation, nitrogen and molybdenum fertilization // Plant Soil Environ. 2004. V. 50. P. 39–45.
<https://doi.org/10.17221/3640-PSE>
25. Geneva M., Zehirov G., Djonova E. The effect of inoculation of pea plants with mycorrhizal fungi and Rhizobium on nitrogen and phosphorus assimilation // Plant Soil Environ. 2006. V. 52. P. 435–440.
<https://doi.org/10.17221/3463-PSE>
26. Mfilinge A., Mtei, K., Ndakidemi P. Effect of rhizobium inoculation and supplementation with phosphorus and potassium on growth and total leaf chlorophyll content of bush bean *Phaseolus vulgaris* L. // Agricult. Sci. 2014. V. 05. № 14. P. 1413–1426.
<https://doi.org/10.4236/as.2014.514152>
27. Baba Z.M., Asif T., Sheikh F. [et al.] Studies on soil health and plant growth promoting potential of rhizobium isolates // Emirat. J. Food Agricult. 2015. V. 27. № 5. P. 423–429.
<https://doi.org/10.9755/ejfa.2015.04.043>
28. Habete A., Buraka T. Effect of rhizobium inoculation and nitrogen fertilization on nodulation and yield response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) at Bolo Sore, Southern Ethiopia // J. Biol. Agricult. Healthcare. 2016. № 6 (13). P. 72–75.
29. Алешин М.А., Михайлова Л.А. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой почвы на отзывчивость посевного гороха к уровню азотного питания // Аграрн. вестн. Верхневолжья. 2020. № 1 (30). С. 48–54.
30. Кузмичева Ю.В. Энергосберегающие приемы повышения продуктивности сортов гороха посевного (*Pisum sativum* L.) на основе растительно-мик-

- робных взаимодействий: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, 2011. С. 22.
31. Кондыков И.В., Уваров В.Н., Зеленов А.Н., Кондыков Н.Н. Сорты гороха нового поколения, контрастные по архитектонике листового аппарата // Земледелие. 2012. № 5. С. 34–35.
 32. Агафонов Е.В., Стукалов М.Ю., Агафонова Л.Н. Влияние минеральных и бактериальных удобрений на урожайность гороха на черноземе обыкновенном // Агрохимия. 2001. № 8. С. 42–46.
 33. Гурьев Г.П. Некоторые аспекты формирования симбиотического аппарата у гороха // Зернобоб. и круп. культуры, 2014. № 1 (9). С. 11–16.
 34. Телекало Н.В. Влияние инокуляции и внекорневых подкормок на урожайность сортов гороха // Зернобоб. и круп. культуры. 2014. № 1 (9). С. 16–22.
 35. Evans J. An evaluation of potential rhizobium inoculant strains used for pulse production in acidic soils of south-east Australia // Aust. J. Exp. Agric. 2005. V. 45. P. 257–268.
 36. Ballard R.A., Charman N., McInnes A., Davidson J.A. Size, symbiotic effectiveness and genetic diversity of field pea rhizobia (*Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*) populations in South Australian soils // Soil Biol. Biochem. 2004. V. 36. P. 1347–1355.
 37. Хакимова Л.Р., Сербяева Э.Р., Лавина А.М. Ростстимулирующая активность клубеньковых бактерий *Rhizobium leguminosarum*, выделенных из бобовых растений Южного Урала // Вестн. Оренбург. ГУ. 2017. № 9 (209). С. 96–99.
 38. Roumiantseva M.L., Muntyan V.S. Root nodule bacteria *Sinorhizobium meliloti*: tolerance to salinity and bacterial genetic determinants // Microbiology. 2015. V. 84. № 3. P. 303–318.
<https://doi.org/10.1134/S0026261715030170>
 39. Herridge D.F. Inoculation technology for legumes // Nitrogen-fixing leguminous symbioses. Nitrogen fixation: origins, applications, and research progress / Eds. Dilworth M.J., James E.K., Sprent J.I., Newton W.E. Dordrecht: Springer. V. 7.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3548-7_4
 40. Завалин А.А., Кашукоев М.В. Роль бобового предшественника в питании зерновых культур и повышение плодородия выщелоченного чернозема // Агрохимия. 1998. № 12. С. 20–24.

Reaction of Peas to Nitrogen Fertilizer and Inoculation of Seeds with Ritorfin on Sod-Podzolic Soil of Different Degree of Cultivation

M. A. Alyoshin^{a,b,#} and A. A. Zavalin^a

^aAll-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

^bPerm State Agro-Technological University named after D.N. Pryanishnikov
Petrovskaya ul. 23, Perm 614990, Russia

[#]E-mail: matvei0704@mail.ru

The results of the vegetative experiment on the establishment of the joint effect of the biological preparation Rhizotorphin and N-fertilizer (doses $N_{0.05}$, $N_{0.10}$, $N_{0.15}$, $N_{0.20}$, $N_{0.25}$) on the formation of vegetative mass and the yield of seed pea grain when cultivated on weakly and medium cultivated sod-podzolic soil are presented. With an increase in the dose of N-fertilizer from $N_{0.05}$ to $N_{0.25}$, an increase in the yield of green mass of peas was observed by 3.4–22.2 g/vessel (on poorly cultivated) and by 10.3–35.5 g/vessel (on medium cultivated soil). The increase in grain yield from the use of Rhizotorphin on average in the experiment was 1.31 g/vessel on weakly and 1.66 g/vessel on medium cultivated soil. The application of N-fertilizer in medium cultivated soil conditions increased the responsiveness of seeded peas to inoculation to 1.70–1.87 g/vessel. When using Rhizotorphin and applying N-fertilizer, the accumulation of N in pea grain increased by 0.22 and 0.18% in accordance with the degree of cultivation of the soil. When using Rhizotorphin, N was accumulated in the roots, which positively affected the preservation of their activity and functioning at later stages of development, the intake and accumulation of N in the forming grain. The biological preparation Rhizotorphin influenced the accumulation and distribution of consumed N between the main and by-products of pea plants. Due to this, in the budding phase – the beginning of flowering, the dose increased to 0.83–0.88, and 38.0–65.5 mg N/vessel was additionally accumulated in the pea grain. With an increase in the dose of N-fertilizer over 0.05 g/kg on weakly and 0.20 g/kg on medium cultivated soil, the process of forming a symbiotic apparatus on the root system of peas was completely suppressed.

Key words: nitrogen fertilizer, doses, biological preparation Rhizotorphin, soil cultivation, seed peas, productivity, nitrogen accumulation, symbiotic apparatus.

УДК 631.82:631.559:633.16:631.415:631.445.24

ВЛИЯНИЕ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ФОСФОРНЫХ И МАГНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ НА ФОНЕ АЗОТНО-КАЛИЙНЫХ НА УРОЖАЙНОСТЬ, КАЧЕСТВО И ВЫНОС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ ЯРОВЫМ ЯЧМЕНЕМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КИСЛОТНОСТИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2023 г. С. П. Бижан

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

E-mail: kziek@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.01.2023 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

В длительном (56 лет) полевом опыте выявлена большая отдача от совместного применения известковых, фосфорных и магниевых удобрений по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений на сильноокислой дерново-подзолистой слабокультуренной почве, с высоким содержанием в ней (до 130 мг/кг) подвижного алюминия, обусловленного длительным применением физиологически кислых удобрений в форме аммиачной селитры и хлористого калия. На сильноокислой известкованной почве применение фосфорных удобрений способствовало увеличению урожайности ярового ячменя на 67%, на среднекислой известкованной в дозе 11.5 т $\text{CaCO}_3/\text{га}$ почве — в 2.3 раза, на слабокислой известкованной в дозе 19.0 т $\text{CaCO}_3/\text{га}$ — в 2.6 раза, при сочетании с магниевыми удобрениями — соответственно в 2.5 и 2.9 раза по сравнению с урожайностью (1.78 т/га) на сильнокислой почве при применении азотно-калийных удобрений. С внесением магниевых удобрений на слабокислой почве окупаемость прибавкой зерна минеральных удобрений (N90P60K90) увеличилась в 3 раза, возрастая до 13.9 кг/кг, с повышением при этом содержания белка по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений на 1.2%. Использование азота и фосфора растениями ярового ячменя выросло в 3.4, калия — в 3.0 раза.

Ключевые слова: яровой ячмень, качество, магниевое удобрение, известкование, урожайность, почвенная кислотность, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S0002188123060054, **EDN:** QOHSPY

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация сельскохозяйственного производства способствует росту урожайности зерновых культур и как следствие, увеличению выноса из почвы основных элементов питания, в том числе и необходимого для развития растений магния. Также наблюдается значительное увеличение площадей пахотных почв с низким (до 7 мг $\text{MgO}/100\text{ г}$) содержанием подвижного магния, составляющих $\approx 70\%$ пашни [1]. Но не только увеличение выноса магния урожаем, но и процессы выщелачивания его из плодородного слоя почвы, усиливающиеся при регулярном длительном внесении физиологически кислых удобрений в отсутствие известкования, способствуют росту дефицита подвижного магния в почвах [2–6]. Данные

условия определяют необходимость внесения магниевого удобрения для повышения урожайности и качества не только чувствительных к его содержанию культур, таких как картофель и овощные культуры, но и зерновых, предотвращая при этом их полегание [7–10]. Исследования эффективности магниевых удобрений проводили в большинстве случаев на дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава (песчаных и супесчаных). На средне- и тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почвах влияние совместного применения фосфорных и магниевых удобрений на урожайность и вынос элементов питания зерновыми культурами интенсивных сортов при различной кислотности почвы изучено недостаточно, особенно в условиях длительного поле-

вого опыта. Поэтому цель работы — изучение в длительном полевом опыте эффективности совместного применения фосфорных и магниевых удобрений в посевах ярового ячменя сорта НУР в зависимости от кислотности дерново-подзолистой 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., Домодедовский р-н, Шебанцевский участок).

Исходная почва полевого опыта — слабоокультуренная: гумус — 1.50%, pH_{KCl} 3.9–4.2, гидролитическая кислотность — 4.9–5.2, обменная кислотность — 0.55–0.57 и сумма оснований — 7.5–8.2 ммоль-экв/100 г, степень насыщенности основаниями — 57–63%. Содержание в почве подвижных форм фосфора — 30–70, калия — 112–115 мг/кг.

Изучение проводили в севообороте со следующим чередованием культур: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта Московская 56 — яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта НУР с подсевом клевера (*Trifolium pratense* L.) — клевер 2-х лет пользования (в 11-й и 12-й ротациях — один год пользования). Эффективность фосфорных удобрений в зависимости от известкования и применения магния изучали на фонах извести 1.5 H_r (по 0.5 H_r в первых 3-х ротациях — в сумме 11.5 т/га) и 2.5 H_r (по 1.0 H_r в 1-й и 3-й ротациях и 0.5 H_r в 8-й ротации — в сумме 19 т/га), а также на фоне без извести (NK).

Минеральные удобрения применяли ежегодно в виде N_{aa} ($N = 34\%$), $P_{сд}$ в 12-й ротации — в форме АФ ($N = 12\%$, $P_2O_5 = 52\%$), хлористого калия ($K_2O = 60\%$). Магниевые удобрения применяли с 2019 г. в форме сернокислого магния в дозе 30.0 кг MgO /га перед посевом озимой пшеницы и ярового ячменя под культивацию. Для этого использовали запасные делянки площадью 100 м², которые делили пополам. Повторность опыта трехкратная. Анализы почвы и растений проводили согласно ГОСТам: сумму поглощенных оснований (по Каппену) — ГОСТ Р 50682-94, обменную кислотность — ГОСТ Р 58594-2019, pH_{KCl} — ГОСТ 26423-85, гидролитическую кислотность — по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижный фосфор и калий (по Кирсанову) — ГОСТ 54650-2011, подвижный алюминий (по Соколову) — ГОСТ 26485-86. В качестве общего фона вносили гербициды, фунгициды и

ретарданты нового поколения. Агротехника — принятая в Московской обл. Уборку урожая проводили комбайном “Сампо” поделочно с 28 м². При статистической обработке результатов исследований использовали дисперсионный анализ.

Под влиянием регулярного внесения минеральных удобрений и периодического известкования с 1966 по 2015 г. агрохимические свойства дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы заметно отличались от исходных. Реакция почвенной среды в результате длительного постоянного применения (физиологически кислых) аммиачной селитры и хлористого калия (фон NK) снижалась с 4.0 до 3.8 ед., сумма поглощенных оснований — с 8.0 до 6.7 ммоль-экв/100 г, гидролитическая кислотность возрастала с 5.0 до 6.7 ммоль-экв/100 г, содержание подвижного алюминия в почве — с 45.0 до 130 мг/кг.

При периодическом известковании в дозе 11.5 т извести/га (суммарно) реакция почвенной среды (pH_{KCl}) возрастала до 4.7–4.8 ед., сумма оснований — до 7.7–7.8 ммоль-экв/100 г, гидролитическая кислотность снижалась до 5.0–4.1 ммоль-экв/100 г, содержание подвижного алюминия уменьшалось до 34.6–32.0 мг/кг, количество подвижных форм фосфора увеличивалось до 31.4–105 мг/кг, калия — до 125–128 мг/кг.

Соответственно изменялись эти показатели и при известковании дозой 19.0 т извести/га (в сумме): pH_{KCl} увеличивался до 5.3–5.5 ед., сумма оснований — до 9.4–9.6 ммоль/100 г, снижалось содержание подвижного алюминия до 14.2–10.0 мг/кг, гидролитическая кислотность уменьшалась до 3.6–3.5 ммоль/100 г.

Известкование большой дозой (19.0 т/га) приводило к значительному улучшению физико-химических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы и переводило ее из сильно-кислых в группу слабокислых, снижение гидролитической кислотности способствовало четырехкратному снижению содержания токсичного для культурных растений подвижного алюминия за счет длительного внесения фосфорных удобрений. Содержание подвижного фосфора в почве повысилось в 3 раза.

Вегетационные периоды 2020, 2021 и 2022 гг. по метеорологической обстановке отличались друг от друга. Неблагоприятными для вегетации растений ярового ячменя выдались погодные условия 2020 и 2021 гг. Засушливый июнь и июль 2020 г. с высокой температурой воздуха до 30–33°C угнетающе действовал на рост и развитие растений. Наблюдали избыточное количество

Таблица 1. Урожайность ярового ячменя и окупаемость удобрений в зависимости от уровня кислотности дерново-подзолистой почвы и применения фосфорных и магниевых удобрений

Вариант	Урожайность, т/га			Средняя урожайность за 3 года, т/га	Прибавка, т/га		Окупаемость NPK прибавкой зерна, кг/кг
	2020 г.	2021 г.	2022 г.		от P ₂ O ₅	от P ₂ O ₅ + Mg	
Без извести (pH _{KCl} 4.1)							
Без удобрений	1.45	1.51	2.46	1.81	—	—	—
N90K90	1.60	1.49	2.25	1.78	—	—	—
N90P60K90	2.72	2.42	3.78	2.97	1.19	—	4.8
N90P60K90 + Mg	2.89	2.54	3.98	3.14	—	1.36	5.5
Известь 11.5 т/га (pH _{KCl} 4.7)							
N90K90	2.65	2.52	3.89	3.02	—	—	—
N90P60K90	3.47	3.35	5.30	4.04	1.02	—	9.3
N90P60K90 + Mg	3.81	3.78	5.79	4.46	—	1.44	11.0
Известь 19.0 т/га (pH _{KCl} 5.4)							
N90K90	3.5	3.3	4.9	3.9	—	—	—
N90P60K90	3.83	4.05	5.96	4.61	0.72	—	11.7
N90P60K90 + Mg	4.30	4.56	6.59	5.15	—	1.26	13.9
HCP ₀₅	0.26	0.32	0.28	0.29	—	—	—

осадков в апреле 2021 г., превышающее средне-многолетнюю норму в 4 и 12 раз в 1-й и 3-й декадах апреля, также превышение нормы осадков было в мае и июне. Отмечена высокая температура воздуха от 30 до 33°C во 2-й декаде июня и июля в отсутствие осадков. В 2022 г., напротив, сложились весьма благоприятные условия для вегетации растений ярового ячменя с достаточным количеством осадков и без резких колебаний температуры воздуха, что положительно сказалось на урожайности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Невзирая на сложные метеорологические условия в 2020 и 2021 гг., значительное улучшение физико-химических свойств известкованной почвы хорошо отразилось на уровне урожайности растений ярового ячменя, которая варьировала в зависимости от внесенных удобрений и по годам (табл. 1). На сильнокислой неизвесткованной почве внесение одних азотно-калийных удобрений (фон НК) не увеличивало урожайность ярового ячменя, которая оставалась на уровне контроля (без удобрений). Объясняется это нарастанием содержания в почве подвижного алюминия с 44.0 до 130 мг/кг, оказавшего сильное токсическое действие на растения ярового ячменя.

При длительном систематическом внесении фосфорных удобрений (в форме аммофоса в дозе 60 кг P_2O_5 /га) урожайность ярового ячменя увеличивалась на всех фонах извести. На сильно-

кислой почве прирост урожайности составлял: в 2020 г. — 70, в 2021 г. — 62, в 2022 г. — 68%, в среднем за 3 года он достигал 67%.

На почве, произвесткованной дозой 19.0 т извести/га, со слабокислой реакцией почвенной среды эффективность фосфорных удобрений уменьшалась, прирост урожайности был следующим: 8% в 2020 г., 24 — в 2021 г. и 22% — в 2022 г., в среднем за 3 года — 19%. Снижение в 3.5 раза по сравнению с сильнокислой почвой эффективности применения фосфорных удобрений на слабокислой почве обусловлено улучшением фосфорного питания растений за счет именно извести, которая способствовала увеличению средней урожайности ярового ячменя в 2.5 раза по сравнению с фоном НК сильнокислой почвы. Наряду с неблагоприятными метеорологическими условиями вегетационных периодов в 2020 и 2021 гг., такая большая отдача от извести определялась выраженным токсическим действием подвижного алюминия (130 мг/кг) на сильнокислой почве фона НК, что подтверждали и некоторые исследования [8, 9].

На сильнокислой почве без применения извести прибавка урожая от магниевых удобрений была не существенной, прирост урожайности составлял по отношению к фону N90P60K90 ≈ 6%. Сопряжено это, по всей видимости, с антагонизмом ионов магния и алюминия в сильнокислой почве, затрудняющим поступление магния в растения при высоком наполнении почвенного раствора ионами алюминия [4].

Таблица 2. Элементы структуры урожая ярового ячменя сорта НУР в зависимости от кислотности почвы и применения удобрений (среднее за 3 года, 2020–2022 гг.)

Вариант	Количество продуктивных стеблей, шт.	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г	$K_{\text{хоз}}$
Без извести (pH_{KCl} 4.1)				
Без удобрений	360	12.6	38.1	0.48
N90K90	380	12.4	37.6	0.47
N90P60K90	414	17.6	41.6	0.50
N90P60K90 + Mg	419	17.8	41.6	0.50
Известь 11.5 т/га (pH_{KCl} 4.7)				
N90K90	395	17.0	40.0	0.50
N90P60K90	445	19.0	44.0	0.52
N90P60K90 + Mg	460	19.6	44.8	0.54
Известь 19.0 т/га (pH_{KCl} 5.4)				
N90K90	410	18.5	44.4	0.52
N90P60K90	476	22.0	46.0	0.54
N90P60K90 + Mg	487	22.9	47.4	0.55

В результате резкого понижения содержания подвижного алюминия в слабокислой почве, произвесткованной 19.0 т извести/га, отмечен прирост урожайности на 12% от применения магниевых удобрений при максимальной урожайности 5.15 т/га, то есть в 2.9 раза больше фона НК сильнокислой почвы. Наряду с этим возрастала также окупаемость зерном минеральных удобрений (N90P60K90) по сравнению с их применением на сильнокислой почве в 2.4 раза, составив 11.7 кг/кг, с внесением магния — в 2.9 раза, составив 13.9 кг/кг.

Зерновая продуктивность ярового ячменя тесно связана со структурой урожая (массой 1000 зерен, количеством зерен в колосе, количеством продуктивных стеблей на м^2). Рост показателей структуры урожая преимущественно наблюдали при возделывании ярового ячменя на среднекислой и слабокислой почве, от применения извести в большей степени, чем от фосфорных и магниевых удобрений (табл. 2).

На почве с реакцией среды слабокислой, произвесткованной 19.0 т извести/га, отмечали прирост показателей структуры урожая по сравнению с неизвесткованной сильнокислой почвой фона НК — массы 1000 зерен — на 11%, количества зерен в колосе — на 25, количества продуктивных стеблей — на 15%. Применение магниевых удобрений также способствовало некоторому росту показателей структуры — преимущественно количества зерен в колосе.

Хозяйственный коэффициент также зависел от внесения фосфорных и магниевых удобрений. На среднекислой и слабокислой почве он увеличивался до 0.55 при величине на фоне НК (сильнокислой почвы), равной 0.47. Это указывало на благоприятное действие удобрений на преимущественное генерирование репродуктивной доли урожая.

Вынос элементов питания растениями ярового ячменя в значительной мере определялся кислотностью почвы и внесенными удобрениями (табл. 3). На почве среднекислой вынос азота превышал в 1.6 раза, на слабокислой — в 1.9 раза вынос относительно фона НК. Максимальный его вынос (141 кг/га) наблюдали на известкованной почве в дозе 19.0 т/га.

Использование азота из удобрений на слабокислой почве превышало в 3.4 раза тот же показатель на сильнокислой почве. Высокие величины использования азота (от 77.8 до 103%) на слабо- и среднекислой почве объясняются влиянием токсичного для растений уровня содержания подвижного алюминия в сильнокислой почве, обусловившего низкий вынос азота [11, 12].

На среднекислой почве от применения фосфорных удобрений увеличивался средний за 3 года вынос фосфора растениями ячменя в 2 раза, на слабокислой почве — в 3.6 раза по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений. Совместное внесение фосфорных и магниевых удобрений на слабокислой почве приводило к наибольшему его выносу (63.9 кг/га), превысив тот же фон НК в

Таблица 3. Вынос азота и коэффициент его использования растениями ярового ячменя в зависимости от примененных удобрений и кислотности дерново-подзолистой почвы

Вариант	Вынос азота (зерно + солома), кг/га				Использование азота, %*
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее за 3 года	
Без извести (pH _{KCl} 4.1)					
Без удобрений	40.9	36.5	69.0	48.8	—
N90K90	40.6	38.2	57.2	45.3	—
N90P60K90	67.4	58.0	92.2	72.5	26.3
N90P60K90 + Mg	71.2	60.2	96.1	75.8	30.0
Известь 11.5 т/га (pH _{KCl} 4.7)					
N90K90	69.2	57.4	95.1	73.9	—
N90P60K90	104	96.2	156	119	77.8
N90P60K90 + Mg	113	103	164	127	86.4
Известь 23.0 т/га (pH _{KCl} 5.4)					
N90K90	97.2	84.2	131	104	—
N90P60K90	118	105	169	130	90.7
N90P60K90 + Mg	131	112	181	141	103

Примечание. Использование азота — расчет к контролю.

Таблица 4. Вынос фосфора и коэффициент его использования растениями ярового ячменя в зависимости от примененных удобрений и кислотности дерново-подзолистой почвы

Вариант	Вынос фосфора (зерно + солома), кг/га				Использование фосфора, %
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее за 3 года	
Без извести (pH _{KCl} 4.1)					
Без удобрений	15.2	13.6	23.9	17.6	—
N90K90	15.0	13.2	20.9	16.4	—
N90P60K90	27.8	25.0	38.8	30.5	23.5
N90P60K90 + Mg	29.2	26.6	40.8	32.2	26.3
Известь 11.5 т/га (pH _{KCl} 4.7)					
N90K90	30.0	27.0	43.6	33.5	—
N90P60K90	41.4	39.2	62.6	47.7	52.2
N90P60K90 + Mg	45.9	42.7	67.5	52.0	59.3
Известь 23.0 т/га (pH _{KCl} 5.4)					
N90K90	44.3	40.2	61.1	48.5	—
N90P60K90	51.7	48.8	75.6	58.7	70.5
N90P60K90 + Mg	56.0	53.9	81.7	63.9	79.2

Примечание: расчет к общему фону N90K90.

3.9 раза (табл. 4). Так коэффициент использования фосфора в среднем за 3 года на среднекислой почве возрастал в 2.2 раза, на слабокислой — в 3.0 раза, с применением магниевых удобрений — в 2.5 и 3.4 раза соответственно.

Самый высокий в опыте средний вынос калия (63.9 кг/га), так же как и коэффициент использования калия — 79.2% отмечен на слабокислой почве с внесением полного минерального удоб-

рения (NPK) и магния, что было больше, чем на сильнокислой почве в 2.0 и 3.0 раза соответственно (табл. 5). Пониженный уровень выноса калия на сильнокислой почве определялся тем же подвижным алюминием, токсичным для растений ячменя при большой концентрации его в почвенном растворе.

Вынос азота, фосфора и калия из удобрений 1 т урожая ярового ячменя на сильнокислой почве

Таблица 5. Вынос калия и коэффициент его использования растениями ярового ячменя в зависимости от примененных удобрений и кислотности дерново-подзолистой почвы

Вариант	Вынос калия (зерно + солома), кг/га				Использование калия, %
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее за 3 года	
Без извести (pH _{KCl} 4.1)					
Без удобрений	34.2	30.1	53.5	39.3	—
N90K90	36.8	32.4	50.2	39.8	—
N90P60K90	47.0	45.0	67.7	53.2	15.4
N90P60K90 + Mg	47.9	46.4	69.1	54.5	16.9
Известь 11.5 т/га (pH _{KCl} 4.7)					
N90K90	60.4	42.4	77.2	60.0	—
N90P60K90	84.0	70.5	120	91.5	58.0
N90P60K90 + Mg	90.3	72.0	124	95.3	62.2
Известь 19.0 т/га (pH _{KCl} 5.4)					
N90K90	87.9	65.4	111	88.1	—
N90P60K90	98.6	80.0	135	105	72.6
N90P60K90 + Mg	107	84.6	142	111	79.9

Примечание. Расчет к контролю.

соответствовал нормативным базовым показателям, характерным для тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почвы, тем не менее, на слабокислой почве он был больше чем на сильнокислой: азота — на 16.9, фосфора — на 23.3, калия — на 26.8% (табл. 6). Эти новые данные выноса элементов питания 1 т урожая, полученные в длительном опыте, можно использовать для разра-

Таблица 6. Вынос элементов питания из удобрений растениями ярового ячменя (зерно + солома) 1 т урожая в зависимости от примененных удобрений и кислотности дерново-подзолистой почвы (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Азот	Фосфор	Калий
	кг		
Без извести (pH _{KCl} 4.1)			
Без удобрений	—	—	—
N90K90	—	—	—
N90P60K90	24.2	10.3	17.9
N90P60K90 + Mg	24.1	10.3	17.4
Известь 11.5 т/га (pH _{KCl} 4.7)			
N90K90	—	—	—
N90P60K90	29.4	11.8	22.6
N90P60K90 + Mg	28.4	11.7	21.4
Известь 19.0 т/га (pH _{KCl} 5.4)			
N90K90	—	—	—
N90P60K90	28.3	12.7	22.7
N90P60K90 + Mg	27.5	12.4	21.6

ботки новых нормативных показателей с учетом уровня полученной продуктивности растений ярового ячменя в Нечерноземной зоне на средне- и слабокислой дерново-подзолистой почве.

На качественных показателях зерна ярового ячменя сказались условия вегетации, в значительной степени зависящие от года исследования, а также от применения удобрений. В засушливых условиях 2020 г. отмечали повышение содержания белка по сравнению с 2021 г., характеризующимся избыточным увлажнением, в благоприятном для вегетации 2022 г. этот показатель почти не отличался от данных 2021 г. (табл. 7).

Во всех изученных вариантах дерново-подзолистой почвы, от сильнокислой до слабокислой при внесении фосфорных удобрений в форме аммофоса и азотно-калийных в форме аммиачной селитры и хлористого калия заметного увеличения содержания белка в зерне отмечено не было. Однако совместное их применение с магниевыми удобрениями на слабокислой почве приводило к наибольшему в опыте росту содержания белка, в среднем за 3 года составившему 11.9%, превысив при этом его уровень в варианте НК на сильнокислой почве на 1.2%.

Снижение показателя экстрактивности зерна на 2.9% по сравнению с фоном НК сильнокислой почвы отмечали при возрастании урожайности ярового ячменя и содержания белка в зерне вследствие действия минеральных и магниевых удобрений в условиях убывающей кислотности

Таблица 7. Некоторые показатели качества ярового ячменя в зависимости от кислотности почвы и примененных удобрений

Вариант	Содержание белка, %				Экстрактивность, %			
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее за 3 года	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее за 3 года
Без извести (pH_{KCl} 4.1)								
Без удобрений	11.0	10.2	10.4	10.5	68.5	69.1	67.2	68.3
N90K90	11.1	10.4	10.6	10.7	68.1	69.0	67.0	68.0
N90P60K90	11.2	10.6	10.8	10.9	67.4	68.2	66.3	67.3
N90P60K90 + Mg	11.5	10.7	10.8	11.0	67.0	68.0	66.2	67.1
Известь 11.5 т/га (pH_{KCl} 4.7)								
N90K90	11.6	10.8	10.9	11.1	67.1	67.0	66.5	66.9
N90P60K90	11.7	11.0	11.1	11.3	66.3	66.8	65.3	66.1
N90P60K90 + Mg	12.0	11.2	11.3	11.5	65.8	66.7	64.7	65.7
Известь 19.0 т/га (pH_{KCl} 5.4)								
N90K90	11.8	11.4	11.7	11.6	66.6	66.9	65.2	66.2
N90P60K90	11.8	11.5	11.9	11.7	66.1	66.5	64.5	65.7
N90P60K90 + Mg	12.1	11.7	11.9	11.9	65.0	66.2	64.2	65.1
HCP ₀₅	0.7	1.1	1.2					

почвы. По достигнутым показателям уровня экстрактивности (65%) и белковости (11.9%) полученное в опыте зерно согласно ГОСТ 5060-86 было зернофуражным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями в длительном полевом опыте выявлена большая отдача от совместного применения известковых, фосфорных и магниевых удобрений по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений на сильноокислой дерново-подзолистой слабоокультуренной почве, с высоким содержанием в ней (до 130 мг/кг) подвижного алюминия, обусловленного длительным применением физиологически кислых удобрений в форме аммиачной селитры и хлористого калия. На сильноокислой неизвесткованной почве применение фосфорных удобрений способствовало увеличению урожайности ярового ячменя на 67%, на среднекислой, известкованной дозой 11.5 т/га, почве — в 2.3 раза, на слабоокислой, известкованной дозой 19.0 т/га, — в 2.6 раза, при сочетании с магниевыми удобрениями — соответственно в 2.5 и 2.9 раза по сравнению с урожайностью на фоне азотно-калийных удобрений в размере 1.78 т/га (сильноокислая почва). С внесением магниевых удобрений на слабоокислой почве окупаемость минеральных удобрений (N90P60K90) прибавкой зерна увеличивалась в 3 раза, возрастая до 13.9 кг/кг. Повышение при этом содержания бел-

ка в зерне по сравнению с фоном азотно-калийных удобрений достигало 1.2%. Использование азота и фосфора растениями ярового ячменя возрастало в 3.4 раза, калия — в 3.0 раза. Выращенное в опыте зерно отнесено к зернофуражному (ГОСТ 5060-86).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристархов А.Н., Яковлева Т.А. Методика определения ассортимента и потребности в Mg-удобрениях для их рационального использования в комплексных технологиях применения агрохимических средств. М.: ВНИИА, 2018. С. 40.
2. Аристархов А.Н. Оптимизация полиэлементного состава в агросистемах России — агрохимическая оценка состояния дефицита, резервов, способов и средств его устранения / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2019. С. 200–255.
3. Аканова Н.И., Козлова А.В., Мухина М.Т. Роль магния в системе питания растений // Агрохим. вестн. 2021. № 6. С. 66–72.
4. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Теоретические основы известкования почв. СПб.: ЛНИИСХ, 2005. С. 90–118.
5. 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. С. 340.
6. Кук Д.У. Факторы, лимитирующие урожай, и их взаимодействие в системах земледелия // Вестн. сел.-хоз. науки. 1987. № 2. С. 124–130.

7. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М., 1990. 218 с.
8. Kiss A.S. Magnesiumtragyazas magnesium f biologia-ban // Mezogazdasagi Kiado. Budapest, 1983. P. 159.
9. Shiwakoti S., Zheljazkov V.D., Gollany H.T., Kleber M., Xing B. Macronutrients in soil and wheat as affected by a long-term tillage and nitrogen fertilization in winter wheat-fallow rotation // Agronomy. 2019. V. 9. P. 178.
10. Методические рекомендации по применению сульфата магния в сельскохозяйственном производстве. М.: ВНИИА, 2017. С. 27.
11. Гомонова Н.Ф. Влияние 30-летнего применения минеральных удобрений на урожай сельскохозяйственных культур и агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы // Химия в сел. хоз-ве. 1984. № 1. С. 8–11.
12. Kamprath E.J. Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1970. V. 34. № 2. P. 252–254.

Influence of the Joint Use of Phosphorus and Magnesium Fertilizers on the Background of Nitrogen and Potassium Fertilizers on the Productivity, Quality and Removal of Nutrition Elements in Spring Barley Depending on the Acidity of Sod-Podzolic Soil

S. P. Bizhan

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

In the long term (56 years) field experience revealed a great return from the combined use of lime, phosphorus and magnesium fertilizers compared with the background of nitrogen-potassium fertilizers on strongly acidic sod-podzolic poorly cultivated soil, with a high content of mobile aluminum in it (up to 130 mg/kg), due to the prolonged use of physiologically acidic fertilizers in the form of ammonium nitrate and potassium chloride. The use of phosphorous fertilizers on highly acidic untreated soil contributed to an increase in the yield of spring barley by 67%, on medium-acidic soil produced at a dose of 11.5 t CaCO₃/ha — by 2.3 times, on slightly acidic soil produced at a dose of 19.0 t CaCO₃/ha — by 2.6 times, when combined with magnesium fertilizers — by 2.5 and 2.9 times, respectively, according to compared with the yield on the background of nitrogen-potash fertilizers 1.78 t/ha (highly acidic soil). With the introduction of magnesium fertilizers on slightly acidic soil, the payback by adding grain of mineral fertilizers (N90P60K90) increased by 3 times, increasing to 13.9 kg/kg, with an increase in protein content compared to the background of nitrogen-potassium fertilizers by 1.2%. The use of nitrogen and phosphorus by spring barley plants increased 3.4 times, potassium — 3.0 times.

Key words: spring barley, quality, magnesium fertilizer, liming, yield, soil acidity, sod-podzolic soil.

УДК 631.417.1:631.582:631.81:631.445.24

АККУМУЛЯЦИЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕРОДА КУЛЬТУРАМИ СЕВООБОРОТА И ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПАХОТНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВОЙ

© 2023 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, М. Т. Васбиева¹, В. Р. Ямалтдинова¹, И. В. Казакова¹¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
614532 Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 26.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Представлены экспериментальные данные по накоплению и потерям органического углерода в дерново-подзолистой почве за 6 ротаций длительного стационарного опыта. Установлено, что за вегетационный период в процессе фотосинтеза растения ячменя ярового связывали в органические соединения 2.84–3.25 т С/га из атмосферы (10.3–11.6 т CO₂/га) за вегетационный период, клевера лугового второго года пользования – 4.23–5.19 т С/га (15.1–18.6 т CO₂/га) в зависимости от вариантов опыта. За ротацию 8-польного севооборота возделываемые культуры секвестрировали из атмосферы 82.28–99.31 т CO₂/га или 22.4–27.1 т С/га в зависимости от системы удобрения почвы. Длительное использование пашни без удобрений привело к уменьшению содержания углерода в почве на 13.5% относительно исходного уровня. Максимальным содержанием и запасами органического углерода характеризовалась почва стационарного опыта при насыщенности пашни навозом в дозе 20 т/га и эквивалентным количеством NPK. Содержание углерода за 6 ротаций севооборота увеличилось в слое 0–20 см на 15% от исходного, запасы углерода в этом слое возросли на 5 т/га, в слое 0–100 см – на 32.0 т/га. Средняя величина углеродпротекторной емкости исследованной почвы варьировала от 29 до 31 г С/кг в слое 0–20 см почвы и не зависела от примененных систем удобрения. Количество и качественный состав биомассы, поступающей в почву при ее различном удобрении, оказали существенное влияние на накопление органического углерода.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, длительный стационарный опыт, динамика углерода, секвестрация, углеродпротекторная емкость почвы

DOI: 10.31857/S0002188123060121, **EDN:** QPEMYE

ВВЕДЕНИЕ

Стратегическая цель эффективного использования земель сельскохозяйственного назначения – накопление и сохранение органического вещества в почве. Для этого необходимо создание определенных условий землепользования: минимальная обработка почвы, внесение высоких доз органических удобрений, увеличение количества и улучшение качества биомассы, поступающей в почву, возделывание сельскохозяйственных культур и сортов, активно секвестрирующих углерод атмосферы, использование генетических ресурсов микроорганизмов, стимулирующих рост и развитие растений, и другие агротехнические приемы [1–3].

Наземная растительная биомасса и почвенное органическое вещество являются основными ре-

зервуарами-накопителями углерода, которые влияют на природные потоки CO₂ и его концентрацию в атмосфере [4, 5]. Углеродная емкость надземной растительной биомассы и пулы органического углерода в почвах имеют свои ограничения, связанные с почвенно-климатическими условиями региона исследований и применяемыми агротехнологиями [6–9]. Поглощение атмосферного углерода растениями зависит от интенсивности процессов фотосинтеза, которые наиболее активны у бобовых, обладающих более высокой ассимиляционной поверхностью листьев по сравнению со злаковыми культурами [10, 11].

Считается, что закрепиться в почве может лишь столько С_{орг}, сколько позволяют физико-химические свойства почвы [12, 13]. Способность почв стабилизировать и сохранять углерод кон-

тролируется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером 0.05 (0.02) мм [14]. Гранулометрический состав дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв указывает на высокий потенциал для насыщения их углеродом.

Применение различных систем удобрения неизбежно приводит к изменениям запасов органического вещества, следовательно, его потерю или накопление в пахотных почвах можно регулировать. Обобщение результатов длительных опытов Географической сети России показало, что минеральная система удобрения обеспечивала максимальную урожайность сельскохозяйственных культур и способствовала уменьшению потерь органического углерода, но полностью их не компенсировала. Органическая и органо-минеральная системы удобрения способствовали стабилизации содержания углерода и, в некоторых случаях, его повышению в почвах [15].

Цель работы — определить количество аккумулярованного атмосферного углерода в биомассе культур севооборота, выявить способность дерново-подзолистой почвы накапливать и удерживать органический углерод при применении различных систем удобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в длительном стационарном опыте, расположенном на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве опытного поля “Пермского НИИСХ” — филиала ПФИЦ УрО РАН. Первая закладка опыта проведена в 1969 г., вторая — в 1970 г.

Схема опыта: контроль (без удобрений), навоз 10 т/га, навоз 20 т/га, NPK в дозе, эквивалентной навозу 10 т/га, NPK в дозе, эквивалентной навозу 20 т/га, навоз 5 т/га + NPK (эквивалент навоза 5 т/га), навоз 10 т/га + NPK (эквивалент навоза 10 т/га), навоз 20 т/га + NPK (эквивалент навоза 20 т/га) в год. Изученная схема в опыте сложилась со 2-й ротации севооборота (1977–1978 гг.).

Повторность четырехкратная. Размещение делянок рендомизированное. Делянки расположены в 4 яруса. Размер посевной делянки 115.5 м², учетной 80 м². Чередование культур в севообороте — пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го года пользования (г.п.), клевер 2-го г.п., ячмень, картофель, овес. Учетные культуры опыта в 2022 г. — ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.) сорта Родник Прикамья и клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) сорта Лобановский 2-го года пользования.

Почва участка перед закладкой опыта (среднее в 2-х закладках) характеризовалась среднекислой реакцией среды (рН_{KCl} 5.5) средним содержанием гумуса — 2.30%, *S* — 16.4, *H_r* — 3.4, *H_o* — 0.12 ммоль/100 г, средним содержанием фосфора и калия по Кирсанову — 160 и 158 мг/кг соответственно. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель. В посеве клевера учитывали последствие. Навоз вносили в севообороте в 2 приема — под озимую рожь и картофель.

Почвенные образцы отбирали из верхнего слоя почвы (0–20 см) и по профилю почвы до глубины 1 м с шагом 20 см, освобождали от живых корней, просеивали через сито диаметром 2 мм. Растительные образцы в полевом опыте отбирали в период уборки культуры.

Содержание *C_{орг}* в почве оценивали методом бихроматного окисления с титриметрическим окончанием. Углерод в растительных образцах определяли на элементном анализаторе Elementary Vario ElCub, азот — по методу Кьельдаля.

Урожайность зерновых учитывали сплошным методом. При определении количества соломы и пожнивно-корневых остатков ячменя использовали рамочный метод (площадки по 0.16 м² в 3-х точках на делянке). Урожайность сена клевера определяли площадочным методом, количество пожнивных остатков и корней — рамочным методом в 3-х точках на делянке (площадь рамок 0.1 м²). Количество пожнивно-корневых остатков культур, возделываемых в 6-й ротации севооборота определяли по уравнениям Левина [16]. Расчет углеродпротекторной емкости почвы проводили по 3-м уравнениям, описанным в работе [17]. Статистическую обработку данных проводили по [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полевом стационарном опыте оптимизация минерального питания растений способствовала поддержанию содержания *C_{орг}* в почве на заметно более высоком уровне по сравнению с контрольным вариантом. Применение всех систем удобрения обеспечило к концу 6-й ротации севооборота увеличение содержания *C_{орг}* в почве относительно контрольного варианта на 10–30% (рис. 1). При насыщении пашни навозом 10 и 20 т/га в год наблюдали поддержание содержания органического углерода на исходном уровне. При минеральной системе удобрения поддержание содержания органического углерода на исходном уровне отмечено только при более высокой насыщенности пашни минеральными удобрениями — в варианте NPK

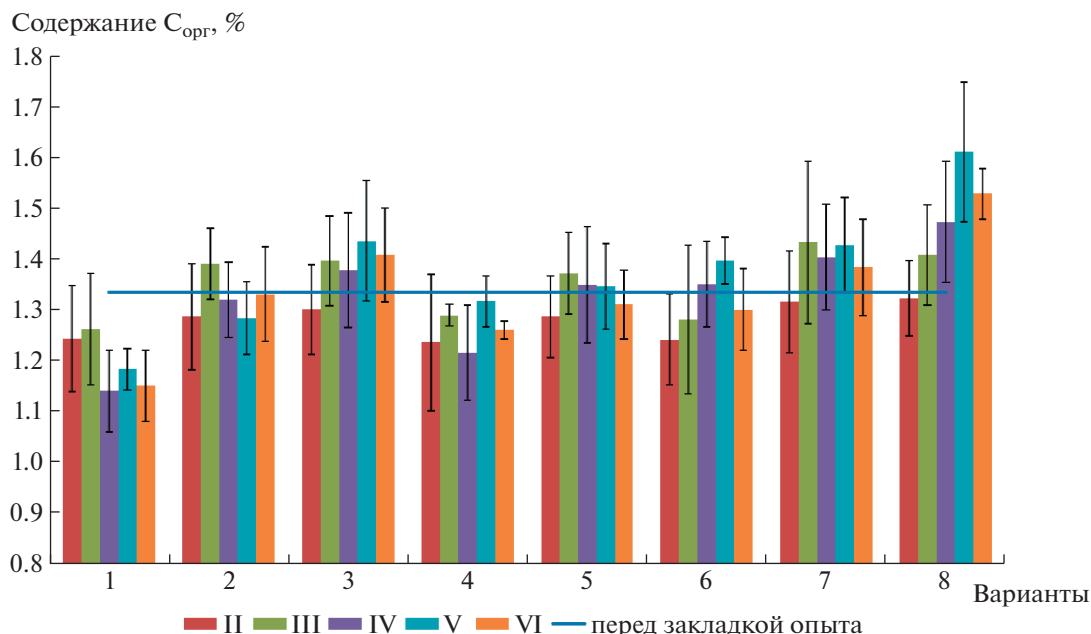


Рис. 1. Изменение содержания $C_{орг}$ в дерново-подзолистой почве (слой 0–20 см) при длительном применении органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения (среднее 2-х закладок, 2–6 ротации), %. Варианты: 1 – без удобрений, 2 – навоз 10 т/га, 3 – навоз 20 т/га, 4 – NPK в дозе, эквивалентной навозу 10 т/га, 5 – NPK в дозе, эквивалентной навозу 20 т/га, 6 – навоз 5 т/га + NPK в дозе, эквивалентной навозу 5 т/га, 7 – навоз 10 т/га + NPK в дозе, эквивалентной навозу 10 т/га, 8 – навоз 20 т/га + NPK в дозе, эквивалентной навозу 20 т/га в год. То же на рис. 2.

эквивалентно навозу 20 т/га, за счет увеличения количества поступавшего органического материала с пожнивными остатками. При более низкой насыщенности минеральными удобрениями в отдельные ротации севооборота наблюдали снижение содержания $C_{орг}$ до 10% от исходного уровня.

Применение органо-минеральной системы удобрения в варианте навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га обеспечило поддержание $C_{орг}$ на исходном уровне. В варианте с максимальной насыщенностью удобрениями навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу 20 т/га выявлено увеличение содержания органического углерода больше уровня при закладке опыта, его содержание возросло на 15%. Тренды динамики содержания органического углерода в ротациях могли быть обусловлены наличием аналитической ошибки, пространственной вариабельностью и сезонной составляющей.

Под почвенной секвестрацией органического углерода понимается перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией мортмассы в почвенное органическое вещество и его долговременное хранение в почвенном резервуаре с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу [5, 8, 18–21].

Для оценки почвенной секвестрации углерода в пахотных почвах используют такие методы как изменение валового содержания органического углерода или его запасов в слоях 0–20 см, 0–100 см за определенный период времени [5]. Считается, что наибольшие изменения этих показателей происходят в первые 1–2 ротации севооборота или первые 10–15 лет землепользования [22]. Далее в почве устанавливается новое квазистационарное состояние, т.е. достигается уравнивание процессов минерализации и гумусообразования [5, 23].

Результаты, полученные в длительном стационарном опыте, свидетельствовали о том, что в варианте без удобрений за 6 ротаций севооборота запасы органического углерода в пахотном слое почвы (0–20 см) без внесения удобрений снизились на 5.0 т/га (рис. 2).

Запасы $C_{орг}$ по профилю определяют интенсивность биологической активности всего корнеобитаемого слоя почвы, способствующей высвобождению необходимых для растений элементов питания и закреплению их избытка с последующей мобилизацией в зависимости от потребности растений и почвенной биоты [24].

Установлено, что длительное применение органической и органо-минеральной систем удоб-

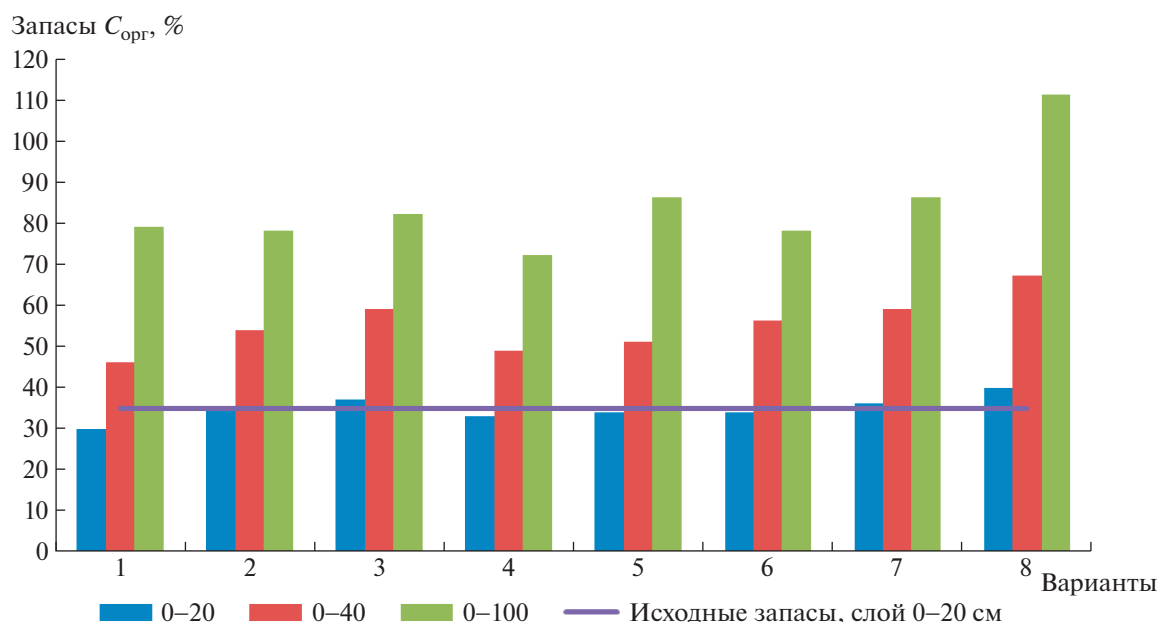


Рис. 2. Изменение запасов $C_{орг}$ в почве при длительном применении органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения (6-я ротация).

рения привело к увеличению запасов $C_{орг}$ в подпахотном слое, а в варианте с максимальным насыщением пашни органическими и минеральными удобрениями – навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу – наблюдали достоверное увеличение и в слое 40–60 см. Запасы $C_{орг}$ в этом варианте в слое 0–40 см возросли с 46 (без удобрений) до 67 т/га (на 50%), а в слое 0–100 см – с 79 до 111 т/га (на 40%). В вариантах навоз 10 и 20 т/га в год, навоз 5 и 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу отмечено повышение запасов $C_{орг}$ в слое 0–40 на 8–13 т/га (на 20–30%).

В засушливый вегетационный период 2022 г. в варианте без внесения удобрений было выявлено снижение содержания органического углерода в почве под посевами ячменя на 0.41 абс. %, под клевером 2-го года пользования – на 0.24 абс. % относительно исходного уровня (табл. 1).

Следует отметить, что насыщение почвы навозом дозой 20 т/га способствовало только поддержанию исходного уровня органического вещества. Более высокий уровень $C_{орг}$ обеспечило совместное применение навоза 20 т/га + эквивалентное количество NPK, прибавка к исходному содержанию составила 0.23–0.29 абс. %.

В 2022 г. урожайность клевера лугового в вариантах опыта значительно не менялась и варьировала в интервале 6.72–7.83 т/га ($HCP_{05} = 0.89$), количество пожнивных остатков было на уровне 1.45–2.94 т/га, корневых – 2.32–3.00 т/га (табл.

2). Учитывая содержание углерода в различных частях растений, определено количество углерода, секвестрированного клевером луговым 2-го года пользования из атмосферы на момент уборки урожая. Общий сбор углерода в зависимости от вариантов опыта составил 4.44–5.57 т/га. Таким образом, в процессе фотосинтеза клевер поглощал из атмосферы и преобразовывал в биомассу растений 17.3–26.2 т CO_2 /га. Зеленую массу с полей отчуждали, с пожнивно-корневыми остатками клевера в почву поступило от 1.54–1.85 т/га, которого было недостаточно для расширенного воспроизводства органического вещества почвы. Только дополнительное внесение органического вещества в полугумифицированном состоянии в составе навоза KPC обеспечило накопление $C_{орг}$. В вариантах навоз 10 т/га, навоз 20 т/га и навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу, навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу за весь период проведения опыта почвенная секвестрация (накопление углерода относительно исходного уровня) на этом поле составила соответственно 2.6, 1.3, 1.8 и 6.0 т/га соответственно.

Урожайность ячменя в 2022 г. составила 2.81–3.20 т/га ($HCP_{05} = 0.25$ т/га). Содержание углерода в зерне ячменя варьировало в интервале 40.4–41.3%. Таким образом, в зависимости от системы удобрения в зерне аккумулировалось атмосферного углерода от 1.16 до 1.31 т/га, в соломе – от 1.54 до 1.89 т/га, в корнях – ≈ 0.1 т/га. Общий сбор углерода за вегетационный период составил

Таблица 1. Содержание органического углерода в слое 0–20 см почвы под посевами ячменя и клевера лугового 2-го года пользования

Вариант	C _{орг} , %, перед закладкой опыта	Ячмень		Клевер 2-го г.п.*	
		C _{орг} , %	изменение C _{орг} , % относительно исходного уровня	C _{орг} , %	изменение C _{орг} , % относительно исходного уровня
Без удобрений	1.33	0.92	–0.41	1.09	–0.24
Навоз 10 т/га		1.28	–0.05	1.43	+0.10
Навоз 20 т/га		1.32	–0.01	1.38	+0.05
НРК эквивалентно навозу 10 т/га		1.13	–0.20	1.21	–0.12
НРК эквивалентно навозу 20 т/га		1.10	–0.23	1.14	–0.19
Навоз 5 т/га + НРК эквивалентно навозу 5 т/га		1.24	–0.09	1.25	–0.08
Навоз 10 т + НРК эквивалентно навозу 10 т/га		1.28	–0.05	1.40	+0.07
Навоз 20 т + НРК эквивалентно навозу 20 т/га		1.62	+0.29	1.56	+0.23
HCP ₀₅		0.09	–	0.11	–

*г.п. – год пользования. То же в табл. 2, 3.

2.80–3.26 т/га в зависимости от вариантов опыта, в пересчете на углекислый газ – 10.3–12.0 т CO₂/га.

Наиболее интенсивно секвестрация углерода растениями происходила в посевах клевера в вариантах навоз 20 т/га и НРК эквивалентно навозу 10 т/га и составила соответственно 5.18 и 5.57 т/га. Экспериментальным путем показано, что поглощение углекислого газа из атмосферы растениями более интенсивно происходило в посевах бобовых культур по сравнению со злаковыми.

Поступающая в почву биомасса ячменя (солома, корни) характеризовалась высоким содержанием углерода и низким – азота, соотношение С : N составило в соломе 43.1–85.1, в корнях – 36.0–93.6. При таком соотношении растительная масса трудно и медленно разлагается микроорганизмами. Наиболее доступной была для разложения микроорганизмами солома и корневая система растений при минеральной системе удобрения (варианты НРК эквивалентно навозу 10 и 20 т/га). В этих вариантах процесс минерализации органического вещества в почве преобладал над его накоплением. Почвенная секвестрация углерода в севообороте после уборки ячменя отмечена в варианте при совместном применении навоза 20 т/га + НРК эквивалентно навозу 20 т/га. Прирост содержания органического углерода относительно исходного на этом поле на момент обследования составлял 0.29 абс. % или 7.6 т/га.

Количество поступившего в почву C_{орг} ежегодно с побочной продукцией (соломой) и пожнивными корневыми остатками в вариантах с более низкими дозами навоза и НРК поддерживало установившийся уровень содержания органического вещества, что соответствовало количеству минерализованного углерода в год [23, 25].

По итогам 6-ти ротаций 8-польного севооборота более высокое накопление углерода в почве длительного стационарного опыта выявлено в почве при насыщении почвы навозом в дозе 20 т/га и совместном применении навоза 20 т/га и эквивалентного количества НРК. В этом варианте накопление органического углерода в слое 0–40 см увеличилось на 11 т/га, в слое 0–100 см – на 32 т/га больше, чем в варианте без удобрений. Следовательно, углерод будет длительно храниться в глубинных слоях почвы, т.е. находиться на депонировании.

Расчетные данные показали, что за 6-ю ротацию 8-польного севооборота возделываемые культуры секвестрировали из атмосферы углекислого газа (CO₂) 82.3–99.3 или углерода 22.4–27.1 т/га в зависимости от системы удобрения почвы (табл. 3).

Таким образом, в почве длительного стационарного опыта выявлены 3 разнонаправленных тенденции к изменению органического углерода по сравнению с исходным уровнем при смене си-

Таблица 2. Количество и качество биомассы, поступающей в почву в посевах клевера лугового и ярового ячменя и общий сбор углерода за вегетационный период

Вариант	Содержание углерода и азота в биомассе															Общий сбор углерода, т/га
	Основная продукция (зеленая масса, зерно)					Побочная продукция (солома)					Пожнивно-корневые остатки					
	т/га	С		N, %	C : N	т/га	С		N, %	C : N	т/га	С		N, %	C : N	
		%	т/га				%	т/га				%	т/га			
Полевой 8-польный севооборот (клевер 2-го г.п., 2022 г.)																
Без удобрений	6.72	42.0	2.70	1.88	22.4	1.93	41.8	0.81	1.60	26.1	3.00	40.6	1.22	1.58	26.6	4.73
Навоз 10 т/га	6.96	41.6	2.90	2.18	19.1	1.45	41.4	0.60	1.70	24.3	2.32	40.6	0.94	1.73	23.5	4.44
Навоз 20 т/га	7.83	41.9	3.28	2.15	19.5	1.88	41.1	0.77	1.75	23.5	2.82	40.2	1.13	1.78	22.6	5.18
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	7.52	41.6	3.13	2.10	19.8	2.94	40.6	1.19	1.70	23.9	3.09	40.3	1.25	1.95	20.7	5.57
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	7.28	41.4	3.01	2.25	19.7	2.01	39.8	0.80	1.80	22.1	2.22	40.2	0.89	2.05	19.6	4.70
Навоз 5 т/га + НРК экви- валентно навозу 5 т/га	7.03	41.6	2.92	2.20	18.4	1.65	40.2	0.66	1.70	23.7	2.94	40.5	1.19	1.63	24.9	4.77
Навоз 10 т + НРК эквива- лентно навозу 10 т/га	7.62	41.3	3.14	2.13	19.4	1.83	40.1	0.73	1.75	22.9	2.42	40.2	0.97	1.80	22.3	4.84
Навоз 20 т + НРК эквива- лентно навозу 20 т/га	7.72	41.2	3.18	2.28	18.1	1.58	40.0	0.63	1.90	21.0	2.46	40.4	0.99	1.85	21.8	4.80
НСР ₀₅	0.89	0.3	—	0.16	—	0.45	0.5	—	0.08	—	0.29	0.6	—	0.11	—	—
Полевой 8-польный севооборот (ячмень, 2022 г.)																
Без удобрений	2.93	41.0	1.20	2.00	16.1	3.93	43.0	1.69	0.60	71.7	0.29	40.3	0.12	0.43	93.6	3.01
Навоз 10 т/га	2.95	40.7	1.20	2.10	19.4	3.63	42.5	1.54	0.50	85.1	0.26	40.0	0.10	0.60	66.7	2.84
Навоз 20 т/га	3.12	40.7	1.27	2.73	14.9	4.36	43.4	1.89	0.78	55.6	0.24	39.8	0.10	0.63	63.2	3.26
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	3.06	40.7	1.24	2.10	19.4	3.64	42.8	1.56	0.80	53.6	0.24	39.7	0.10	1.10	36.1	2.90
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	2.81	40.4	1.14	2.18	18.5	3.71	42.2	1.56	0.90	46.8	0.25	39.3	0.10	0.88	44.6	2.80
Навоз 5 т/га + НРК экви- валентно навозу 5 т/га	3.20	40.8	1.31	1.90	21.5	4.26	42.1	1.79	0.50	84.2	0.28	39.4	0.11	0.60	65.7	3.21
Навоз 10 т + НРК эквива- лентно навозу 10 т/га	3.15	41.0	1.29	2.00	20.5	4.32	41.3	1.78	0.65	63.5	0.24	39.2	0.08	0.80	49.0	3.15
Навоз 20 т + НРК эквива- лентно навозу 20 т/га	2.80	41.3	1.16	2.95	14.0	4.62	41.0	1.89	0.95	43.1	0.31	39.1	0.12	1.03	37.9	3.17
НСР ₀₅	0.25	0.2	—	0.14	—	0.38	0.6	—	0.08	—	0.02	0.6	—	0.10	—	—

Таблица 3. Секвестрация атмосферного углерода сельскохозяйственными культурами за 6-ю ротацию севооборота (среднее 2-х полей)

Вариант	Урожайность/сбор углерода	Рожь		Пшеница		Клевер 1-го г.п.		Клевер 2-го г.п.		Ячмень		Картофель		Овес		Общий сбор C/CO ₂ , т/га
		зерно	солома + ПКО	зерно	солома + ПКО	сено	ПКО	сено	ПКО	зерно	солома + ПКО	Клубни	Ботва + ПКО	зерно	солома + ПКО	
Без удобрений	1	3.2	8.1	2.5	6.31	3.3	4.26	3.0	4.19	3.6	7.16	2.8	1.34	1.6	3.84	22.4/82.3
	2	1.34	3.27	1.05	2.58	1.38	1.74	1.25	1.71	1.48	2.96	1.15	0.54	0.68	1.29	
Навоз 10 т/га	1	3.8	9.1	2.8	6.74	3.2	4.24	3.0	4.21	3.8	7.36	3.2	1.54	1.6	4.14	23.9/87.8
	2	1.59	3.66	1.18	2.75	1.33	1.74	1.25	1.72	1.56	3.04	1.31	0.62	0.68	1.50	
Навоз 20 т/га	1	4.1	9.6	3.0	7.12	3.5	4.32	3.3	4.26	3.8	7.66	3.4	1.64	1.8	4.33	25.3/92.7
	2	1.72	3.89	1.26	2.91	1.46	1.77	1.38	1.74	1.56	3.17	1.40	0.66	0.77	1.58	
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	1	4.0	9.5	3.4	7.58	3.1	4.23	3.3	4.26	3.8	7.56	4.1	1.96	1.8	4.33	25.7/94.3
	2	1.68	3.83	1.43	3.10	1.29	1.73	1.38	1.74	1.56	3.13	1.68	0.79	0.77	1.58	
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	1	4.2	9.7	3.4	7.78	3.1	4.22	3.8	4.39	4.1	8.33	4.0	1.92	2.1	4.75	26.9/98.5
	2	1.76	3.92	1.43	3.18	1.29	1.73	1.58	1.80	1.68	3.44	1.64	0.78	0.89	1.73	
Навоз 5 т/га + НРК эквивалентно навозу 5 т/га	1	4.1	9.8	3.2	7.30	3.5	4.32	3.7	4.36	3.9	7.42	4.9	2.36	1.6	4.14	26.4/96.7
	2	1.72	3.94	1.35	2.98	1.46	1.77	1.54	1.78	1.60	3.06	2.01	0.96	0.68	1.50	
Навоз 10 т/га + НРК эквивалентно навозу 10 т/га	1	4.2	10.11	3.5	8.12	3.4	4.29	3.9	4.41	3.8	7.26	4.3	1.96	1.9	4.37	26.8/98.3
	2	1.76	4.09	1.47	3.32	1.42	1.76	1.63	1.81	1.56	3.00	1.77	0.79	0.81	1.59	
Навоз 20 т/га + НРК эквива- лентно навозу 20 т/га	1	4.4	10.3	3.3	8.04	3.4	4.29	3.9	4.40	3.5	7.30	4.2	2.02	2.02	5.19	27.1/99.3
	2	1.85	4.15	1.39	3.28	1.42	1.76	1.63	1.80	1.43	3.02	1.73	0.82	0.86	1.92	

Примечание. В графе 1 – урожайность основной и побочной продукции, т/га; 2 – сбор углерода, т/га.

Таблица 4. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, слой 0–20 см

Вариант	Фракции частиц (мм), % от массы почвы		Углеродпротекторная емкость почвы, г С/кг почвы			
	сумма частиц <0.02	сумма частиц <0.05	CPC_1 (<0.02 мм)	CPC_2 (<0.02 мм 2 : 1)	CPC_4 (<0.05 мм 2 : 1)	CPC среднее
Без удобрений	65.2	72.0	28	31	30	30
Навоз 10 т/га	68.9	76.9	30	32	31	31
Навоз 20 т/га	65.7	73.0	28	31	30	30
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	65.7	73.2	28	31	30	30
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	66.7	74.7	29	31	30	30
Навоз 5 т/га + НРК экви- валентно навозу 5 т/га	67.8	75.6	29	32	31	30
Навоз 10 т + НРК экви- валентно навозу 10 т/га	64.6	71.7	28	30	30	29
Навоз 20 т + НРК экви- валентно навозу 20 т/га	65.2	72.7	28	31	30	30

стемы удобрения: 1 — уменьшение содержания $C_{орг}$ в отсутствие удобрений на 13.5%, 2 — сохранение количества $C_{орг}$ при насыщении почвы навозом КРС 10 т/га и совместном применении навоза КРС 10 т/га и минеральных удобрений в эквивалентном количестве, обеспечивающих достаточное поступление биомассы и полугумифицированного органического вещества в почву, 3 — увеличение содержания $C_{орг}$ при насыщении почвы навозом КРС 20 т/га и эквивалентным количеством НРК на 15%.

Почвенную секвестрацию углерода и его длительное хранение (накопление в глубинных горизонтах) наблюдали при насыщении дерново-подзолистой почвы навозом КРС 20 т/га совместно с эквивалентным количеством НРК.

Почвенно-климатические условия региона исследования влияли на углеродную емкость надземной растительной биомассы и пулы органического углерода в почвах, лимитировали процесс сорбции органического углерода минеральной фазой почвы [5, 7, 8].

Углеродпротекторная емкость почвы (carbon protective capacity (CPC)) или углероддепонирующий потенциал почвы — это количество стабилизированного органического вещества в почве [14]. Способность почв стабилизировать и сохранять секвестрируемый из атмосферы углерод контролируется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером <0.05 (0.02) мм. Содержание $C_{орг}$ в гранулометрических фракциях пыли и глины с разме-

ром частиц <0.02 мм и частиц <0.05 мм предложено считать мерой CPC [12, 13].

Величина углеродпротекторной емкости исследованной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при различных системах удобрения рассчитана по 3-м уравнениям, описанным в работе [17], и представлена в табл. 4. Средняя величина CPC варьировала от 29 до 31 г С/кг в слое 0–20 см почвы и практически не зависела от примененных удобрений. Если рассчитать углеродпротекторную емкость почвы в т С/га, то CPC исследованной пахотной почвы составляла 76–80 т $C_{орг}$ /га в слое 0–20 см. Насыщенность пахотного слоя исследованной почвы органическим углеродом составляла ≈50%. Минимальной насыщенностью органическим углеродом характеризовалась почва варианта опыта без внесения удобрений. У пахотных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв выявлен высокий потенциал для секвестрации атмосферного углерода, его накопления и депонирования в почве.

ВЫВОДЫ

1. В длительном стационарном опыте выявлены 3 разнонаправленных тенденции к изменению содержания органического углерода в почве по сравнению с исходным уровнем при смене систем удобрения: 1 — уменьшение содержания $C_{орг}$ в отсутствие удобрений на 13.5%, 2 — сохранение содержания $C_{орг}$ при насыщении почвы навозом КРС 10 т/га и совместном применении навоза КРС 10 т/га и минеральных удобрений в эквива-

лентном количестве, обеспечивающих достаточное поступление растительной биомассы и гумифицированного органического вещества навоза в почву, 3 — увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ при насыщении почвы навозом КРС 20 т/га и совместном применении навоза КРС 20 т/га и эквивалентного количества НРК на 15%.

2. Установлено, что растения ячменя ярового в процессе фотосинтеза связывали в органические соединения углерод из атмосферы в количестве 2.84–3.25 т/га (10.3–11.6 т $\text{CO}_2/\text{га}$) за вегетационный период, клевера лугового 2-го года пользования — 4.23–5.19 т С/га (15.1–18.6 т $\text{CO}_2/\text{га}$) в зависимости от систем удобрения почвы. За 6-ю ротацию 8-польного севооборота возделываемые культуры секвестрировали из атмосферы 82.3–99.3 т $\text{CO}_2/\text{га}$ или 22.4–27.1 т С/га в зависимости от системы удобрения почвы.

3. Накопление органического углерода относительно исходного содержания за 6 ротаций севооборота на 5.0 т/га в слое 0–20 см наблюдали при насыщении почвы навозом КРС 20 т/га и совместном применении навоза КРС 20 т/га + эквивалентное навозу количество НРК. В этом варианте накопление органического углерода в слое 0–40 см увеличилось на 11 т/га, в слое 0–100 см — на 32 т/га больше, чем в варианте без удобрений. Следовательно, углерод будет длительно храниться в глубинных слоях почвы, т.е. находится на депонировании.

4. Величина углеродпротекторной емкости исследованной дерново-подзолистой почвы практически не зависела от примененных систем удобрения и находилась в диапазоне 29.0–31.0 г С/кг. Насыщенность углеродом пахотного слоя почвы составляла $\approx 50\%$. Минимальной насыщенностью органическим углеродом характеризовалась неудобренная дерново-подзолистая почва длительного стационарного опыта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестн. РАН. 2006. Т. 76. № 1. С. 14–29.
2. Кудеяров В.Н. Почвенно-биохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
3. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС. 2015. С. 233.
4. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. С. 315.
5. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумификация и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13.
6. Кудеяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (Аналит. обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 634–658.
7. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060.
8. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819–832.
9. Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: Агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3–12.
10. Благовещенский Г.В., Конанчук В.В., Тимошенко С.М. Углеродная секвестрация в травяных экосистемах // Кормопроизводство. 2019. № 9. С. 17–21.
11. Стрижева Ф.М., Царева Л.Е., Тимов Ю.Н. Растениеводство: учеб. пособ. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. С. 219.
12. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles // Plant and Soil. 1997. V. 191. P. 77–87.
13. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // Plant and Soil. 2002. V. 241. P. 155–176.
14. Kogut B.M., Semenov V.M. Estimation of soil saturation with organic carbon // Dokuchaev Soil Bul. 2020. V. 102. P. 103–124.
15. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536.
16. Левин Ф.И. Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // Агрохимия. 1977. № 8. С. 36–42.
17. Завьялова Н.Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // Почвоведение. 2022. № 8. С. 1046–1055.
18. Бойцова Л.В., Непримерова С.В., Зинчук Е.Г. Влияние различных систем удобрений на секвестрацию органического углерода в дерново-глеевой почве // Пробл. агрохим. и экол. 2019. № 4. С. 15–20.
19. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and the global carbon cycle // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 7–20.
20. Wiesmeier M., Hübner R., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., von Lütow M., Kögel-Knabner I. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic

- carbon saturation // *Global Change Biol.* 2014. V. 20 (2). P. 653–665.
21. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // *Плодородие*. 2021. № 6. С. 38–41.
 22. Завьялова Н.Е. Гумусное состояние дерново-подзолистых почв Предуралья при различном землепользовании и длительном применении удобрений и извести: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: ВНИИА, 2007. С. 36.
 23. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой // *Плодородие*. 2021. № 5. С. 3–7.
 24. Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Влияние длительного применения различных систем удобрения на органофиль основных зональных типов почв. Сообщ. 1. Дерново-подзолистые почвы // *Плодородие*. 2019. № 2(107). С. 3–7.
 25. Körschens M. Soil–Humus–Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig”. 2018. P. 12.

Accumulation of Atmospheric Carbon by Crop Rotation Crops and the Effect of Fertilizer Systems on the Accumulation of Organic Carbon by Arable Sod-Podzolic Soil

N. E. Zavyalova^{a,*}, M. T. Vashieva^a, V. R. Yamaltdinova^a, and I. V. Kazakova^a

^a Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences
ul. Kultury 12, Perm Krai, d. Lobanovo 614532, Russia

^{*}E-mail: nezavyalova@gmail.com

Experimental data on the accumulation and loss of organic carbon in sod-podzolic soil over 6 rotations of a long stationary experiment are presented. It was found that during the growing season during photosynthesis, spring barley plants were bound into organic compounds 2.84–3.25 t/ha from the atmosphere (10.3–11.6 t CO₂/ha) during the growing season, meadow clover of the second year of use – 4.23–5.19 t C/ha (15.1–18.6 t CO₂/ha) depending on the experience options. During the rotation of the 8-field crop rotation, cultivated crops were sequestered from the atmosphere 82.28–99.31 tons of CO₂/ha or 22.4–27.1 tons C/ha, depending on the soil fertilization system. Long-term use of arable land without fertilizers led to a decrease in the carbon content in the soil by 13.5% relative to the initial level. The soil of the stationary experiment was characterized by the maximum content and reserves of organic carbon when the arable land was saturated with manure at a dose of 20 t/ha and an equivalent amount of NPK. The carbon content for 6 rotations of crop rotation increased in the 0–20 cm layer by 15% of the initial one, carbon reserves in this layer increased by 5 t/ha, in the 0–100 cm layer – by 32.0 t/ha. The average value of the carbon-protective capacity of the studied soil varied from 29 to 31 g/kg in a layer of 0–20 cm of soil and did not depend on the applied fertilizer systems. The quantity and qualitative composition of biomass entering the soil with its various fertilizers had a significant impact on the accumulation of organic carbon.

Key words: sod-podzolic soil, long-term stationary experience, carbon dynamics, sequestration, carbon-protective capacity of the soil.

УДК 634.8:631.523:547.598:458.22:582.736

ПРИМЕНЕНИЕ АМИНОВЫХ СОЛЕЙ ГЛИЦИРРИЗИНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОРЧИ ВИНОГРАДА В ПЕРИОД ХРАНЕНИЯ

© 2023 г. М. И. Шатирова^{1,*}, Р. А. Асадуллаев², Ш. Ф. Нагиева¹¹Институт полимерных материалов НАН Азербайджана
AZ5004 Сумгаит, ул. С. Вургуна, 124, Азербайджан²Научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия МСХ АР
AZ0118 Абишеронский район, пос. Мехдибад, ул. 20 января, Азербайджан

*E-mail: mshatirova@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 28.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Гнили различного происхождения составляют значительную часть потерь винограда как в вегетационный период, так и при длительном хранении. Наряду с традиционными методами, для предотвращения порчи винограда при хранении были испытаны экологически чистые препараты, сырьем для получения которых служили корни солодки (*Glycyrrhiza*). Соответствующие соли глицирризиновой кислоты были синтезированы взаимодействием глицирризиновой кислоты с *o*-фенилендиаминном и метиловым эфиром *n*-аминобензойной кислоты в среде сухого ацетона. В качестве объекта исследования был выбран универсальный сорт винограда Молдова, и хранение осуществляли в холодильнике при температуре 5°C в течение 4 мес. Для предупреждения развития патогенной микрофлоры использовали гранулы метабисульфита натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) из расчета 20 г на 7–8 кг винограда и в такой же дозе гранулы *o*-фенилендиамина глицирризиновой кислоты 2 и метилового эфира *n*-аминобензойной кислоты 3, а также гранулы высушенного измельченного корня солодки. Выявлено, что при применении $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, для защиты от воздействия вредоносной микрофлоры потери ни от гниения, ни от отрыва ягод от гребня грозди не было, цвет и консистенция ягод остались такими же, как и при хранении. Эффективность испытанных препаратов при одинаковом способе применения была несколько меньше: в варианте с гранулами корня солодки потери составили более половины, с *o*-фенилендиамина глицирризиновой кислоты (соединение 2) — около половины продукта, с метиловым эфиром *n*-аминобензойной кислоты (соединение 3) выход стандартной продукции составил чуть более 70% заложенной на хранение партии.

Ключевые слова: виноград, длительное хранение, микробиологическая порча, аминовые соли глицирризиновой кислоты, противогрибковая и антибактериальная активность, методы защиты.

DOI: 10.31857/S000218812306011X, **EDN:** QPCPQI

ВВЕДЕНИЕ

Потери, вызванные порчей винограда, являются серьезной проблемой для производителей и торговли как до, так и после сбора урожая. В период хранения в холодильниках основными возбудителями выступают микроорганизмы, являющиеся представителями эпифитной микрофлоры. Микробиологическая порча, вызванная грибами и бактериями, составляет значительную часть потерь винограда при длительном хранении. Согласно исследованиям, потери и отходы на различных стадиях могут достигать 53% от производимого винограда [1, 2].

После сбора урожая в фруктах и овощах, в том числе в винограде, являющемся живым организмом, продолжают процессы диссимиляции (дыхания), и функция транспирации сохраняется.

Интенсивность этих процессов зависит от сорта винограда, региона выращивания, примененной агротехники, степени вызревания и технологии хранения. По мере увеличения интенсивности биохимических процессов ускоряется ход глубоких и необратимых изменений, свидетельствующих о старении ягод. Снижается лежкость, портится внешний вид гроздей. Они постепенно размягчаются, теряют вкус и пищевую ценность, на них начинают развиваться различные микроорганизмы. Свойства кожицы ягоды — толщина, наличие воскового слоя — имеют большое значение в устойчивости винограда к микробиальному поражению. При нарушении целостности оболочки, путь микробам в глубокие слои тканей открывается.

Постоянный состав микрофлоры винограда в основном представлен грибами видов *Cladosporium herbarium*, *Aspergillus niger*, *Fusarium sp.*, *Penicillium sp.*, *Botrytis cinerae*, *Alternaria alternata*, *Mucor fresen*. Обычно порча начинается с развития плесневых грибов, т.к. кислая среда тканевого сока благодатна для них. На более поздней стадии бактерии также могут быть вовлечены в процесс порчи. Особенно интенсивно разрушение происходит при высоких температурах. В благоприятных условиях споры растут, образуя ростовые трубки, которые заражают кожицу здоровых ягод. Если таких условий нет, гриб образует мелкие черные плотные производные — склероции, которые могут долго храниться. Склероции развиваются во влажных условиях при высокой температуре и образуют конидии. При дождях, особенно при низких температурах, происходит резкое усиление болезни винограда. Чем плотнее гроздь, чем тоньше кожица, и чем больше загущена крона куста, тем опаснее становится заболевание [1, 3].

По мнению специалистов, эпифитная микрофлора разных сортов винограда схожа. При хранении после очередной дезинфекции количество микроорганизмов в воздухе резко снижается, а затем в период между дезинфекциями постепенно увеличивается.

Послеуборочная гниль в основном вызывается *Botrytis cinerea*; однако в зависимости от условий хранения другие патогены также могут вызывать повреждения. Необходим комплексный подход для предотвращения риска развития гнили. До сбора урожая профилактические действия сводятся в основном к мерам по предотвращению или снижению риска возникновения заражения, но не ограничиваются лишь применением фунгицидов. Аккуратное обращение при сборе и упаковке — ключевое требование для снижения порчи при хранении за счет минимизации повреждений и, в конечном счете, инфекций. После упаковки и во время хранения внимание следует сосредоточить на уменьшении возможности возникновения заражения и ограничении распространения гниения. В связи с этим соблюдение правильного режима хранения играет решающую роль. Химические и нехимические упаковочные материалы могут быть полезными для предотвращения порчи в течение периода хранения. Осуществление обработок SO_2 (способом фумигации, использованием подушек с двойным высвобождением SO_2 , и т.п.) является неотъемлемой частью борьбы с гниением при среднесрочном и долгосрочном хранении. Правильный выбор материала, используемого при упаковке, особенно внутренней упаковки, имеет важное значение для со-

хранения качества винограда. В течение всего срока хранения каждую неделю проводят окулирование из расчета 0.5–1.5 г/м³ объема камеры. Фумигации обычно предшествует проверка для определения качества хранимой продукции [1, 2, 4].

Показатель лежкоспособности винограда при хранении определяется индивидуальными особенностями сорта, его устойчивости к болезням и вредителям, физиологическим нарушениям, механическим повреждениям и стрессовым факторам окружающей среды. Например, на возникновение и степень распространения микробиологических заболеваний влияет химический состав ягод — наличие дубильных веществ, красителей и других веществ из группы полифенолов. Срок хранения также во многом зависит от строения тканей мякоти и кожицы ягод, наличия воскового слоя. Чем плотнее кожица и ткани мякоти, тем труднее возбудителю или вредителю проникнуть внутрь ягоды и повредить ее. Защита ягод от потерь при хранении способствует выполнению всех агротехнических требований, постоянный фитосанитарный и токсикологический контроль почвы и насаждений, создание и поддержание оптимального состава газовой среды в камере хранения и ряд других мероприятий. Агротехнические факторы, такие как придание кустам оптимальной формы и нагрузки глазками, также оказывают важное влияние на успешное хранение винограда. С их помощью можно влиять на качество винограда и увеличивать срок его хранения [5, 6].

В период хранения фрукты и овощи “живут” за счет пластических и энергетических питательных веществ, которые они накапливают в течение вегетационного периода. В связи с этим основной принцип хранения продукции заключается в максимальном замедлении потребления питательных веществ самим объектом хранения. Интенсивность дыхания может существенно варьировать в зависимости от условий хранения, являясь объективным показателем скорости созревания, старения и в целом пригодности к хранению продукта разных видов и сортов. Традиционное хранение в холодильниках при температуре, близкой к 0°C, основано на возможности минимизировать интенсивность дыхания. В таких условиях замедляется перезревание продукта, а также подавляется активность фитопатогенной микрофлоры [7–9].

Как известно из литературы, глицирризиновая кислота, выделенная из состава очень распространенной в Азербайджане солодки сладкой (*Glycyrrhiza glabra*) [10], обладает широким спектром фармакологического действия, включая ан-

Таблица 1. Выход стандартной продукции при различных способах хранения винограда сорта Молдова

Вариант, №	Препарат	Выход стандартной продукции, %	Сахаристость				
			при сборе, г/см ³	OIV 505	после хранения, г/см ³	OIV 505	прирост, %
1	Na ₂ S ₂ O ₅ (контроль)	98	”	”	18.0	7	8.4
2	Препарат 2	52.7	16.6	5	17.4	5	4.8
3	Препарат 3	73.4	”	”	17.8	5	7.2
4	Корень солодки	44.6	”	”	17.5	5	4.9

тибактериальное, противомикробное, противовирусное, антиоксидантное, антидотное, спазмолитическое, фибронитическое, иммуностропное и др. благодаря вышеперечисленным качествам, солодка широко используется в медицинской практике в качестве лекарственных препаратов [8, 11–18]. Принимая во внимание вышесказанное, нами были синтезированы аминные соли глицирризиновой кислоты, которые были испытаны для предотвращения порчи винограда в период хранения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

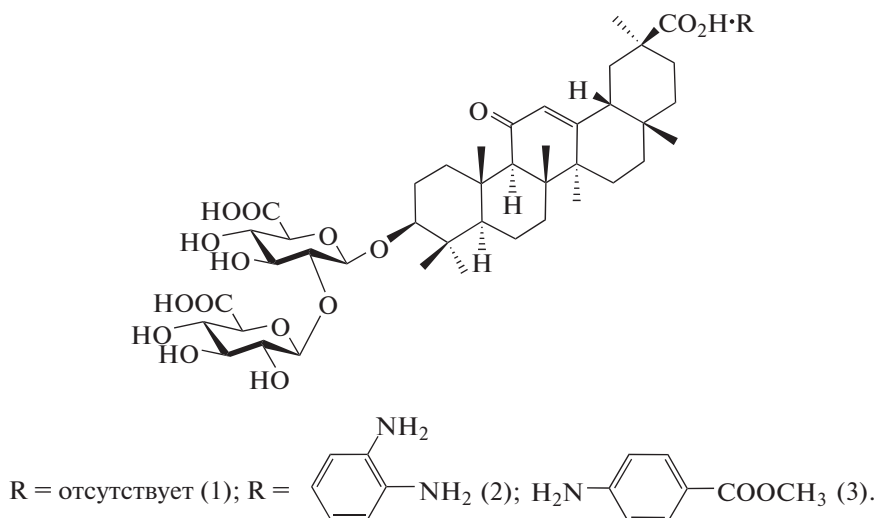
В качестве объекта исследования был выбран универсальный сорт винограда Молдова, выращенный в Абшеронской ампелографической коллекции научно-исследовательского института виноградарства и виноделия (НИИВиВ). Хранение осуществляли в холодильнике при температуре 5°C в течение 4 мес. Для предупреждения развития патогенной микрофлоры использовали гранулы метабисульфита натрия (Na₂S₂O₅) из расчета 20 г на 7–8 кг винограда; это классический способ предотвращения развития болезнетворной микрофлоры, основанный на бактерицидном и фунгицидном свойствах сернистого ангидрида; в такой же дозе гранулы *o*-фенилендиамина глицирризиновой кислоты (соединение 2) (вариант 2) и метилового эфира *n*-аминобензойной кислоты (соединение 3) (вариант 3), а также гранулы высушенных измельченных корней солодки (вариант 4). Препараты, представленные для испытаний Институтом полимеров НАНА [3], были синтезированы с использованием аминных солей глицирризиновой кислоты по методике, описанной в литературе. По окончании срока хранения был проведен товарный анализ вино-

града, хранившегося разными способами, и определен выход стандартной продукции, а также определена степень повышения сахаристости ягод посредством лабораторного анализа и по методике, разработанной Международной организацией винограда и вина [19, 20].

Синтез аминных солей глицирризиновой кислоты. После заливки эквимолярной глицирризиновой кислоты и соответствующих аминов в трехгорлую колбу емкостью 100 мл прибавляли 100 мл сухого ацетона и перемешивали реакционную массу в течение 25–30 мин при температуре 55–60°C. После вытеснения растворителя на водяной бане соли глицирризиновой кислоты переносили в вакуум и полностью очищали от ацетона. Соответственно получали 92–95% аминных солей глицирризиновой кислоты. Строение синтезированных солей подтверждено данными элементного анализа, ИК- и УФ-спектров. В ИК-спектрах соединений 2, 3 наблюдали следующие полосы поглощения (ν , см⁻¹): 3700–3300 (ОН), 2995–287 (СН алифатические), 1760–1580 (С=О), 1270–1025 (К–О). В УФ-спектре соединений 2 и 3 наблюдались максимумы характеристических [нм (ε)] 250 (8000) полос поглощения.

Характеристика *o*-фенилендиамина соли глицирризиновой кислоты (соединение 2): выход – 92%, $T_{пл}$ – 216°C. Найдено, %: С – 62.36, Н – 7.79, N – 2.76. Общая формула – C₄₈H₇₀N₂O₁₆. Вычислено, %: С – 61.92, Н – 7.58, N – 3.01.

Характеристика соли метилового эфира *n*-аминобензойной кислоты глицирризиновой кислоты (соединение 3): выход – 95%, $T_{пл}$ – 179°C. Найдено, %: С – 65.81, Н – 7.68, N – 1.43. Общая формула – C₅₀H₇₁O₁₈N. Вычислено, %: С – 66.60, Н – 7.90, N – 1.56. Структурная формула соединений имеет вид:



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента приведены в табл. 1. Показано, что в варианте, где для защиты от воздействия вредоносной микрофлоры применяли $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, потерь ни от гниения, ни от отрыва ягод от гребня грозди практически не было отмечено, цвет и консистенция ягод остались такими же, как и при хранении. Хотя цвет гребня грозди немного изменился, он остался на уровне, характерном для свежего винограда (рис. 1). Что касается испытанных препаратов, то при одинаковом применении в варианте с применением гранул сушеного корня солодки потери составили более половины, в варианте 2 — около половины продукции, а в варианте 3 выход стандартной продукции составил более 70% заложенной на хранение партии. В многочисленных источниках [2, 4,

7] отмечено, что сахаристость винограда увеличивается при хранении. В наших исследованиях сахаристость винограда увеличилась на 4.8–11.2% во всех вариантах. Наименьшее увеличение зафиксировано в варианте 2, что еще раз подтвердило информацию многочисленных литературных источников о том, что стабильность при хранении прямо пропорциональна увеличению содержания сахара в течение срока хранения. Результаты проведенного исследования еще раз подтвердили высокую эффективность применения серы для предотвращения развития патогенной микрофлоры при длительном хранении винограда. Учитывая экологическую чистоту новых препаратов, видится целесообразным продолжение их испытания, особенно варианта 3 (метилового эфира *n*-аминобензойной кислоты), с целью

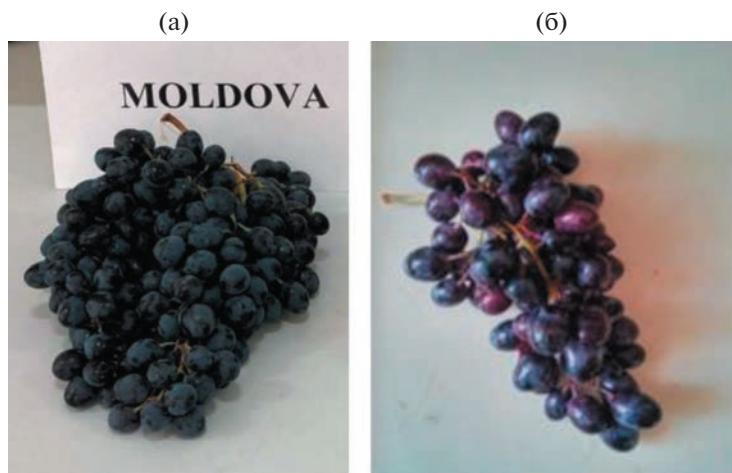


Рис. 1. Вид виноградной грозди после хранения: (а) — $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (контроль). (б) — вариант 3.

определения оптимальной дозы и повторности применения.

ВЫВОДЫ

1. Взаимодействием глицирризиновой кислоты (выделенной из распространенной в Азербайджане солодки сладкой) с *о*-фенилендиамин и метиловым эфиром *n*-аминобензойной кислоты в среде сухого ацетона были синтезированы соответствующие соли глицирризиновой кислоты с высокими выходами (92–95%).

2. Синтезированные препараты, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ и гранулы высушенного корня солодки были испытаны с целью предотвращения порчи винограда в период его хранения. Выявлено, что при использовании $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ цвет и консистенция ягод остались такими же, как и при хранении, хотя цвет гребня грозди немного изменился. При использовании препаратов 2, 3 и глицирризиновой кислоты, выделенной из солодки сладкой, при одинаковом применении в варианте 4 терялось более, в варианте 2 — около половины продукта, а в варианте 3 выход стандартной продукции составил >70% заложенной на хранение партии. Проведенные испытания препаратов в качестве противогрибковых и антибактериальных средств показали перспективность этих экологически чистых соединений для снижения потерь при хранении винограда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асадуллаев Р.А. Развитие микрофлоры винограда при хранении // Азербайджан. сел.-хоз. наука. 2011. № 4. С. 93–95.
2. Ярмилка В.Б. Современные способы хранения плодов, овощей, ягод и винограда // Агроновость. 2010. С. 21–24.
3. Салимов В.С., Нураддинова Х.К. Опасные болезни и вредители винограда (рекомендации для фермеров). Баку; Изд-во “Сапфир-15”, 2021. С. 26.
4. Roberto S., Junior O., Muhlbeier D., Koyama R., Ahmed S., Dominguez A. Post-harvest conservation of “Benitaka” table grapes with different SO_2 -generating pads and plastic liners under cold storage // BIO Web Conf. 2019. V. 15. doi.org/https://doi.org/10.1051/bioconf/20191501003
5. Raj K.A., Parthiban S., Subbiath A., Sangeetha V. Effect of severity of pruning on yield and quality characters of Grapes (*Vitis vinifera* L.): A Review // Inter. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 2017. V. 6. № 4. P. 818–835 https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.103
6. Tangolar S., Tarım G., Kelebek H., Tangolar S.G., Topçu S. The effects of bud load and regulated deficit irrigation on sugar, organic acid, phenolic compounds and anti-oxidant activity of Razaki table grape berries. https://doi.org/10.1051/bioconf/20150501002
7. Кушнерева Е.В., Гугучкина Т.И., Панкин М.И., Агеева Н.М. Изменение концентрации сахара и органических кислот в процессе созревания виноградной ягоды // Изв. вуз. Пищ. технол. 2012. № 1. С. 34–36.
8. Рясенский Д.С., Асеев А.В., Эльгали А.И. Влияние глицирризиновой кислоты на состояние мембранных структур мононуклеаров у больных туберкулезом легких на фоне противотуберкулезной химиотерапии // Туберкулез и болезни легких. 2018. Т. 96. № 10. С. 35–40. https://doi.org/10.21292/2075-1230-2018-96-10-35-40
9. de la Fuente Lioareda M., Novello V., Romanazzi G., Altindisli A. Alternatives to sulphites and another preservatives for table and dried grapes OIV publications. 1st ed. 2017. ISBN 979-10-91799-78-2
10. Амирова Г.С. Солодка в Азербайджане. Баку: Элм, 1993. С. 103.
11. Дикусар Е.А., Поткин В.И., Козлов Н.Г., Гаджи-лы Р.А., Тлегинов Р.Т., Ювченко А.П., Желдакова Р.А. Синтез и изучение фунгицидной активности аминных солей глицирризиновой кислоты // Хим. растит. сырья. 2011. № 4. С. 53–56.
12. Яковичин Л.А., Прошковец В.И., Корж Е.Н. Супрамолекулярный комплекс моноаммониевой соли глицирризиновой кислоты (глицирамин) с аргинином и глицином // Уч. зап. Крым. фед. ун-та им. В.И. Вернадского. Биол. Хим. 2014. Т. 27. № 66. С. 131–137.
13. Azani N., Babineau M., Bailey C.D., Banks H., Barbosa A., Pinto R.B., Boatwright J., Borges L., Brown G., Kite G.C. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny — The Legume Phylogeny Working Group (LPWG) (ing.) // Taxon: Official News Bulletin of the International Society for Plant Taxonomy Utrecht: International Association for Plant Taxonomy, Wiley. 2017. V. 66. № 1. P. 44–77. DOI: https://doi.org/10.12705/661.3
14. Baltina L., Kondratenko R., Baltina L. A.Jr., Plyasunova O.A., Pokrovskii A.G., Tolstikov G.A. Prospects for the creation of new antiviral drugs based on glycyrrhizic acid and its derivatives (a review) // Pharmaceut. Chem. J. 2009. V. 43. № 10. Art. 348. P. 539–548.
15. Graebin C.S. The pharmacological activities of glycyrrhizic acid (“Glycyrrhizin”) and glycyrrhetic acid // Referen. Ser. Phytochem. Berlin, Germany: Nature Publishing Group, 2018. P. 245–261.
16. Ibtisam S.A., Mohamed E., Mabrouk El., Saad A., Mohamed M.A.-D. The protective effects of 18β-glycyrrhetic acid against acrylamide-induced cellular damage in diabetic rats // Environ. Sci. Pollut. Res. 2021. V. 28. № 41. P. 58322–58330. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14742-4
17. Richard S.A. Exploring the pivotal immunomodulatory and antiinflammatory potentials of glycyrrhizic and glycyrrhetic acids // Mediat. Inflamm. 2021.

- V. 2021. Art. ID 6699560.
<https://doi.org/10.1155/2021/6699560>
18. Yang Y.A., Tang W.J., Zhang X., Yuan J.W., Liu X.H., Zhu H.L. Synthesis, molecular docking and biological evaluation of glycyrrhizin analogs as anticancer agents targeting EGFR // *Molecules*. 2014. V. 19. № 5. P. 6368–6381.
<https://doi.org/10.3390/molecules19056368>
 19. Салимов В.С. Ампелографический скрининг винограда. Баку; Изд-во “Муаллим”, 2019. С. 319.
 20. OIV. Descriptor list for grape varieties and Vitis species (2nd edition). 2018. <http://www.oiv.int/en/technical-standards-and-documents/description-of-grape-varieties/oiv-descriptor-list-for-grape-varieties-and-vitis-species-2nd-edition>

Application of Amine Salts of Glycyrrhizic Acid for Prevention of Grape Rot during Storage Period

M. I. Shatirova^{a, #}, R. A. Asadullayev^b, and Sh. F. Nagiyeva^a

^a*Institute of Polymer Materials of Azerbaijan National Academy of Sciences
 AZ5004 Sumgait, S. Vurgun Str., 124, Azerbaijan*

^b*Azerbaijani Scientific Research Institute of Viticulture and Wine-making
 AZ0118 pos. Mekhdiabat, Absheron district, Str. January 20, Azerbaijan*

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

Rots of various origins account for a significant part of the losses of grapes both during the growing season and during long-term storage. Along with traditional methods, to prevent damage to grapes during storage, environmentally friendly preparations were tested, the raw materials for which were licorice roots (*Glycyrrhiza*). The corresponding salts of glycyrrhizic acid were synthesized by the interaction of glycyrrhizic acid with *o*-phenylenediamine and methyl ester of *p*-aminobenzoic acid in a medium of dry acetone. The universal grape variety Moldova was chosen as the object of the study, and the storage was carried out in a refrigerator at a temperature of 5°C for 4 months. To prevent the development of pathogenic microflora, granules of sodium metabisulfite (Na₂S₂O₅) were used at the rate of 20 g per 7–8 kg of grapes and in the same dose granules of *o*-phenylenediamine glycyrrhizic acid and methyl ether of *p*-aminobenzoic acid, as well as granules of dried crushed licorice root. It was revealed that when using Na₂S₂O₅, to protect against the effects of harmful microflora, there were no losses either from rotting or from tearing the berries from the crest of the bunch, the color and consistency of the berries remained the same as during storage. The effectiveness of the tested drugs with the same method of application was somewhat less: in the variant with licorice root granules, losses amounted to more than half, with *o*-phenylenediamine glycyrrhizic acid (compound 2) – about half of the product, with methyl ester of *p*-aminobenzoic acid (compound 3), the yield of standard products was slightly more than 70% of the batch stored.

Key words: grapes, long-term storage, microbiological spoilage, glycyrrhizic acid amine salts, antifungal and antibacterial activity, protection methods.

УДК 632.122.1: 577.122:633.2:546.815

СОДЕРЖАНИЕ АМИНОКИСЛОТ В КОРМОВЫХ ТРАВАХ ПРИ ВОЗРАСТАЮЩЕМ СОДЕРЖАНИИ СВИНЦА В ПОЧВЕ¹

© 2023 г. Г. Я. Елькина

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН
167982 Сыктывкар, Ул. Коммунистическая, 28, Россия*

E-mail: elkina@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 30.01.2023 г.

После доработки 19.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Изучили влияние свинца на аминокислотный состав однолетних кормовых трав. Установлено, что в ответ на загрязнение почв в растениях увеличилось содержание азота и аминокислот в составе белков. Значимые изменения в содержании азота и большинства аминокислот в бобовом растении происходили при содержании подвижного свинца от 2.2 до 10.0 мг/кг. Загрязнение вызвало рост относительного содержания пролина и аспарагиновой кислоты и снижение доли глутаминовой кислоты в белках гороха. В биомассе овса увеличилась относительное содержание аспарагиновой и глутаминовой кислот, доля пролина снизилась. Начиная с концентрации свинца в почве 5.5 мг/кг, в белках бобового растения произошло уменьшение доли незаменимых аминокислот.

Ключевые слова: аминокислоты, горох, овес, свинец, почва.

DOI: 10.31857/S000218812306008X, **EDN:** QOXLOQ

ВВЕДЕНИЕ

Свинец является одним из наиболее токсичных тяжелых металлов (ТМ) по степени воздействия на человека и окружающую среду [1–3]. Ингибирование роста и развития растений происходит при содержании элемента от 50 до 2000 мг/кг [4–8]. Вместе с тем известно стимулирующее действие элемента при относительно невысоких концентрациях свинца в почвах [9–13].

Действие ионов свинца значительно зависит от применяемой соли. Меньшая токсичность, так же как и положительный эффект, установлены при использовании азотнокислого свинца [14, 15]. При этом необходимо отметить, что в исследованиях в основном изучали высокие дозы свинца, минимальные из них были близкими или превышали предельно допустимые и ориентировочно допустимые концентрации (ПДК/ОДК).

Активация защитных ферментов, синтез металлсвязывающих соединений и стрессовых белков, повышающих устойчивость растений, приводят к изменениям в азотном обмене в зависимости от концентрации ионов металла и фазы

ответной реакции. В первой фазе идет усиление приспособительных функций, во второй – угнетение метаболических процессов [1, 8, 16, 17].

В качестве ответной реакции на действие ТМ в растениях активно синтезируется пролин, являющийся полифункциональным стресс-протекторным соединением, направленным на поддержание метаболизма растительного организма на разных стадиях адаптационного процесса [16–19]. Специфической реакцией на воздействие ТМ является синтез металлсвязывающих соединений, обогащенных тиоловыми (–SH) группами – металлотионеинов и фитохелатинов, образованных с участием цистина [20]. Более интенсивный синтез отдельных свободных аминокислот под воздействием ТМ отражает ответную реакцию растительного организма на конкретном (тестируемом) этапе его развития.

Определение аминокислотного состава белков кормовых трав в период их заготовки позволяет оценить результаты сложных процессов метаболизма азота, выявить суммарный эффект воздействия элемента на синтез аминокислот с учетом изменений в развитии растений, а также охарактеризовать качество растительной продукции.

Исследований по влиянию свинца, как и других металлов, на аминокислотный состав, кормовую ценность растительной продукции крайне

¹ Работа выполнена по теме “Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов” (122040600023-8).

незначительно. Приводится увеличение суммы аминокислот, главным образом за счет пролина, аспарагиновой и глутаминовой кислот, снижение количества незаменимых аминокислот в зерне ячменя при избытке кадмия [8]. Одной из причин повышения содержания отдельных свободных аминокислот может быть их меньшая востребованность для синтеза белков в неблагоприятных условиях вследствие загрязнения [3].

Медь и цинк в оптимальном количестве стимулировали синтез аминокислот растениями, при их избытке происходило ингибирование процессов. В большей мере изменялось содержание аспарагиновой, глутаминовой кислот и пролина. Микроэлементы повысили выход сырого протеина и долю незаменимых кислот в биомассе растений [21, 22]. Загрязнение кадмием вызвало рост относительного количества глутаминовой кислоты в белках гороха, аспарагиновой кислоты в белках овса, снижение доли пролина в обоих растениях [23]. При избытке кобальта в бобовом растении была высока доля пролина, наблюдался рост относительного содержания аспарагиновой кислоты в обеих культурах и глутаминовой кислоты в биомассе овса [24].

Влияние ТМ на растения, их биохимические показатели приводится в основном по результатам экспериментов в водной культуре в условиях лабораторий, исследования в почвенной культуре и в полевых условиях незначительны. Изучали в основном высокие концентрации элемента, действие концентраций, незначительно отличающихся от фонового содержания элемента в почве и наиболее часто встречающихся в реальных условиях, остается слабо изученным, так же как и влияние ТМ на качество сельскохозяйственной продукции, в том числе и на аминокислотный состав.

Цель работы — изучение действия возрастающего содержания свинца в почве на содержание азота и аминокислотный состав наземной массы однолетних трав.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в микрополевым эксперименте на искусственно загрязненной легкосуглинистой пахотной подзолистой почве со следующей агрохимической характеристикой: pH 5.3–5.7, содержание гумуса — 1.8–1.9%, сумма обменных оснований — 5.8–6.1 мг-экв/100 г, гидролитическая кислотность — 2.6–3.7 мг-экв/100 г, азот гидролизуемый — 3.0–4.9 мг/100 г, содержание подвижных фосфора — 25.8–28.5 и калия — 11.7–12.2 мг/100 г (по Кирсанову).

Разные по содержанию свинца образцы почвы были получены при смешивании ранее загряз-

ненной почвы с почвой контроля. В загрязненную почву был внесен $Pb(CH_3COO)_2$ в количестве 100 мг Pb/м² (0.34 мг Pb/кг почвы), время стабилизации после внесения уксуснокислой соли свинца составило 4 года. Почву весом в 10 кг помещали в полиэтиленовые сосуды без дна (диаметр — 20, высота — 30 см), которые зарывали в траншеи. Эксперимент выполняли в четырехкратной повторности.

В сосуды высевали по 15 семян гороха (*Pisum sativu*) сорта Альбумен и овса (*Avena sativa*) сорта Львовский-82, оставляя впоследствии по 10 растений каждого вида. Отбор растительных проб осуществляли в фазе образования бобов гороха и в фазе колошения овса при учете продуктивности.

Азот определяли методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-0). Относительная погрешность анализа при содержании азота 0.5–2.6% составляла 18.0% при содержании 2.6–20% азота — 6.7%. Содержание аминокислот, входящих в состав белков растений, определяли методом жидкостной хроматографии на аминокислотном анализаторе ААА Т 339 М. Относительная погрешность анализа конкретных аминокислот (при $P = 0.95$) приведена в табл. 2 и 3. Гидролиз белков осуществляли в концентрированном растворе серной кислоты в запаянной ампуле при $t = 110^\circ\text{C}$. Анализы выполняли в аккредитованной экоаналитической лаборатории (уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц РОСС RU.0001.511257). Методы анализа растительных и почвенных образцов на содержание свинца приведены в [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание свинца в эксперименте изменялось от 9.7 до 62.4 мг/кг, не превышая ПДК/ОДК, которые для кислых ($pH_{KCl} < 5.5$) суглинистых и глинистых почв составляют 65 мг/кг. Начиная с варианта 4, количество свинца, экстрагируемое ацетатно-аммонийным буфером pH 4.8 (ААБ) превзошло норматив по подвижным формам (6.0 мг/кг) [26]. Рост загрязнения свинцом вызвал изменения подвижности элемента и увеличение относительного содержания подвижных форм [25].

В пределах изученных концентраций свинец не оказал токсическое действие на растения (табл. 1). Элемент стимулировал развитие кормовых трав, особенно бобового растения. Сухая наземная биомасса гороха в вариантах со свинцом была значительно больше, чем в контроле.

Стимулирующее действие свинца в дозе 250 мг Pb/кг также было установлено и на кормовых бобах, высокие дозы азотнокислой соли металла

Таблица 1. Биомасса растений и выход сырого протеина при возрастающем содержании свинца в почве

Вариант, №**	Содержание свинца в почве, мг/кг		Масса одного растения (воздушно-сухая, г)		Выход сырого протеина на одно растение, мг	
	валовое	ААБ-вытяжка	горох	овес	горох	овес
Контроль	9.7	0.3	0.36 ± 0.05*	0.40 ± 0.04	25.4	43.0
1	12.8	2.2	0.41 ± 0.09	0.47 ± 0.05	37.0	49.0
2	22.4	2.3	0.49 ± 0.07	0.50 ± 0.06	44.5	52.2
3	32.4	5.5	0.67 ± 0.12	0.53 ± 0.04	66.9	55.2
4	31.2	7.1	1.03 ± 0.14	0.52 ± 0.07	126	57.4
5	36.5	8.6	1.18 ± 0.13	0.55 ± 0.07	139	58.1
6	36.4	10.0	1.48 ± 0.14	0.57 ± 0.07	185	56.7
7	47.9	13.3	1.73 ± 0.11	0.59 ± 0.07	211	52.6
8	50.6	17.1	1.83 ± 0.11	0.54 ± 0.06	208	48.8
9	60.1	17.6	2.43 ± 0.09	0.52 ± 0.05	281	47.2
10	62.4	20.9	2.80 ± 0.13	0.50 ± 0.06	338	45.7

* ± – стандартное отклонение.

**Нумерация вариантов та же в табл. 2, 3.

(1000 и 1500 мг Pb/кг) вызвали снижение продуктивности [13, 27].

Влияние свинца на овес было менее выражено: более высокая биомасса сформировалась при содержании подвижного свинца 5.5–10.0 мг/кг. Начиная с варианта 7, продуктивность овса была не только меньше максимальной, что связано не только с влиянием высоких концентрации элемента, но и с конкуренцией (за освещенность, элементы питания) со стороны хорошо развитых растений гороха.

Токсичность элемента в форме ацетата свинца в отношении овса на серой лесной почве проявилась при внесении более высокой, чем в нашем эксперименте, дозы – 300 мг Pb/кг почвы [15]. Уменьшение продуктивности пшеницы отмечали при достижении концентрации 100 мг Pb/кг [14], в нашем исследовании элемент поступал в почву в меньшем количестве.

Стимулирующее действие свинца на бобовое растение в какой-то мере связано с улучшением азотного питания. Количество азота в биомассе гороха увеличилось с 1.21 (контроль) до 2.00% при содержании подвижной формы свинца 10.0 мг/кг (табл. 2). Превышающие относительную погрешность анализа изменения в бобовом растении начались при содержании подвижного свинца в почве 2.3 мг/кг.

Зависимость между содержанием подвижного свинца в почве и количеством азота в бобовых растениях аппроксимируется логарифмической зависимостью ($y = 0.192\ln(x) + 1.3869$, $R^2 = 0.80$), наиболее тесной при содержании свинца от 0.3 до 10.0 мг/кг ($r = 0.97$, $P < 0.001$). Во всем диапазоне

изученных концентраций (0.3–21 мг/кг) корреляция была менее тесной ($r = 0.74$, $P < 0.001$). Наиболее значительные изменения в поступлении азота, так же как и биомассы гороха, происходили при повышении содержания подвижного свинца до 10 мг/кг, при более высоких концентрациях металла продуктивность гороха и поглощение азота стабилизировались.

Количество азота в биомассе овса в отличие от бобового растения было достаточно постоянным – 1.55–1.64% (табл. 3) с тенденцией к повышению при содержании свинца (ААБ) 8.6–17.1 мг/кг.

Увеличение содержания азота с 1.24 до 1.42% в биомассе другого бобового растения (вики) в ответ на действие свинца (500 мг Pb/кг) было отмечено на слабоокультуренной дерново-подзолистой почве. Количество азота в биомассе ячменя при поступлении в почву 2000 мг Pb/кг увеличилось с 0.47 до 0.90% [8].

Влияние свинца на азотный обмен и продуктивность трав может быть обусловлена изменением состава и активности микробного сообщества почв. Приведены данные о повышении азотфиксирующей [28, 29] и нитрифицирующей [8] способностей почв под воздействием свинца в низких дозах. При высоком содержании элемента происходило ингибирование процессов.

Углубленных исследований по азотфиксации клубеньковыми бактериями нами не было предусмотрено. Однако визуально у высокопродуктивных растений гороха (при содержании подвижного свинца 7.1–13.0 мг/кг) количество клубеньков было более высоким, чем в контроле, они были более крупными и ярко окрашенными.

Таблица 2. Влияние свинца на аминокислотный состав биомассы гороха

Аминокислота	Варианты											Погрешность, %
	0**	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Аспарагиновая	0.51/11.3	0.67/11.5	0.65/10.8	0.90/12.7	0.98/12.6	0.99/13.6	1.21/15.1	1.15/14.8	1.23/14.8	1.24/16.3	1.25/16.0	16
Треонин	0.23/0.51	0.28/4.9	0.27/4.5	0.31/4.3	0.33/4.2	0.30/4.1	0.32/4.0	0.30/3.9	0.31/3.7	0.27/3.6	0.31/4.0	16
Серин	0.26/5.8	0.33/5.7	0.35/5.7	0.37/5.2	0.40/5.2	0.37/5.1	0.42/5.2	0.37/4.7	0.44/5.3	0.38/5.0	0.43/5.5	14
Глутаминовая	0.55/12.3	0.66/11.5	0.68/11.2	0.77/10.8	0.82/10.7	0.76/10.5	0.87/10.9	0.87/11.2	0.91/11.0	0.79/10.4	0.78/10.0	13
Пролин	0.33/7.5	0.56/9.7	0.66/10.9	1.04/14.7	1.26/16.4	1.23/16.9	1.30/16.2	1.34/17.3	1.54/18.5	1.45/19.1	1.48/18.9	31
Глицин	0.27/6.1	0.33/5.7	0.34/5.6	0.35/5.0	0.38/5.0	0.35/4.8	0.38/4.8	0.36/4.6	0.33/3.9	0.34/4.4	0.34/4.3	16
Аланин	0.30/6.7	0.36/6.3	0.35/5.9	0.38/5.4	0.43/5.6	0.41/5.6	0.43/5.3	0.40/5.2	0.41/4.9	0.37/4.9	0.38/4.9	19
Цистин	0.000/0.00	0.000/0.00	0.000/0.00	0.000/0.00	0.003/0.04	0.004/0.05	0.003/0.04	0.004/0.05	0.003/0.04	0.003/0.04	0.002/0.03	
Валин	0.31/6.9	0.38/6.5	0.45/7.5	0.46/6.5	0.44/5.8	0.42/5.7	0.44/5.5	0.48/6.1	0.50/6.0	0.45/5.9	0.44/5.6	14
Метионин	0.005/0.11	0.011/0.19	0.011/0.18	0.019/0.27	0.015/0.19	0.012/0.16	0.015/0.19	0.018/0.23	0.007/0.08	0.013/0.17	0.007/0.09	
Изолейцин	0.22/5.0	0.27/4.7	0.29/4.9	0.29/4.1	0.33/4.3	0.31/4.2	0.31/3.9	0.33/4.2	0.33/4.0	0.29/3.8	0.31/4.0	12
Лейцин	0.39/8.6	0.49/8.6	0.53/8.8	0.55/7.8	0.59/7.6	0.54/7.4	0.58/7.2	0.54/6.9	0.55/6.6	0.47/6.2	0.52/6.6	13
Тирозин	0.23/5.2	0.31/5.4	0.30/5.0	0.35/5.0	0.35/4.5	0.35/4.8	0.35/4.3	0.36/4.6	0.37/4.5	0.33/4.3	0.34/4.3	20
Фенилаланин	0.21/4.6	0.29/5.0	0.29/4.9	0.32/4.5	0.34/4.3	0.29/4.0	0.31/3.9	0.31/4.0	0.34/4.1	0.29/3.8	0.31/4.0	16
Гистидин	0.09/1.9	0.11/2.0	0.11/1.8	0.12/1.7	0.14/1.8	0.13/1.7	0.14/1.7	0.13/1.6	0.14/1.7	0.12/1.6	0.13/1.7	19
Лизин	0.36/7.9	0.42/7.3	0.46/7.6	0.51/7.2	0.53/6.8	0.49/6.8	0.53/3.6	0.49/6.3	0.51/6.1	0.47/6.2	0.45/5.8	16
Аргинин	0.22/5.0	0.29/5.0	0.28/4.7	0.35/4.9	0.39/6.8	0.34/4.7	0.41/5.1	0.34/4.3	0.40/4.8	0.31/4.1	0.34/4.3	19
Сумма	4.49	5.76	6.02	7.08	7.71	7.29	7.99	7.77	8.31	7.59	7.83	
Содержание азота, %	1.21	1.43	1.44	1.60	1.96	1.88	2.00	1.95	1.81	1.85	1.93	10
Содержание свинца, мг/кг	0.8	0.8	0.9	1.5	1.9	2.4	2.7	2.9	3.2	2.9	2.6	20

Примечание. Над чертой — содержание в г/100 г воздушно-сухой массы, под чертой — относительное содержание, %. То же в табл. 3.

Таблица 3. Влияние свинца на аминокислотный состав биомассы овса

Аминокислота	Варианты										Погрешность, %	
	0**	1	2	3	4	5	6	7	8	9		10
Аспарагиновая	0.83/15.0	0.83/15.2	0.88/15.7	0.85/15.3	0.89/16.2	0.91/16.3	0.94/16.6	0.96/16.9	0.99/17.0	0.95/16.2	0.97/16.6	16
Треонин	0.23/4.1	0.22/4.0	0.21/3.8	0.24/4.3	0.22/3.9	0.22/3.9	0.23/4.0	0.22/3.8	0.26/4.5	0.25/4.3	0.25/4.2	16
Серин	0.23/4.2	0.24/4.3	0.23/4.1	0.22/3.9	0.23/4.2	0.23/4.2	0.24/4.2	0.25/4.4	0.24/4.1	0.25/4.3	0.27/4.6	14
Глутаминовая	0.66/11.9	0.65/12.0	0.67/12.0	0.66/11.8	0.69/12.6	0.68/12.1	0.74/13.0	0.76/13.4	0.78/13.4	0.80/13.6	0.76/13.0	13
Пролин	0.89/16.0	0.89/16.2	0.90/16.0	0.86/15.4	0.82/14.9	0.81/14.5	0.82/14.5	0.79/13.9	0.77/13.2	0.75/12.8	0.76/13.0	31
Глицин	0.24/4.4	0.24/4.3	0.25/4.5	0.26/4.7	0.23/4.2	0.24/4.3	0.25/4.4	0.25/4.4	0.24/4.2	0.26/4.4	0.25/4.3	16
Аланин	0.36/6.5	0.35/6.4	0.37/6.6	0.35/6.3	0.35/6.4	0.36/6.5	0.35/6.1	0.36/6.3	0.37/6.3	0.36/6.1	0.35/6.0	19
Цистин	0.000/0.00	0.000/0.00	0.002/0.04	0.001/0.02	0.002/0.04	0.001/0.02	0.001/0.02	0.002/0.04	0.001/0.02	0.001/0.02	0.001/0.02	
Валин	0.36/6.5	0.35/6.4	0.35/6.3	0.36/6.5	0.34/6.2	0.36/6.5	0.34/6.1	0.34/6.0	0.35/6.1	0.36/6.1	0.36/6.1	14
Метионин	0.009/0.16	0.009/0.16	0.024/0.43	0.015/0.27	0.012/0.22	0.013/0.23	0.010/0.18	0.026/0.46	0.012/0.21	0.021/0.36	0.012/0.20	
Изолейцин	0.19/3.4	0.20/3.7	0.21/3.8	0.22/3.9	0.22/4.0	0.22/3.9	0.22/3.8	0.22/3.8	0.22/3.7	0.21/3.6	0.22/3.8	12
Лейцин	0.39/6.9	0.38/6.9	0.40/7.1	0.38/6.9	0.37/6.7	0.39/6.9	0.39/6.8	0.37/6.5	0.39/6.8	0.41/7.0	0.39/6.7	13
Тирозин	0.27/4.9	0.26/4.7	0.26/4.7	0.27/4.8	0.25/4.6	0.27/4.8	0.25/4.4	0.27/4.7	0.26/4.5	0.26/4.5	0.27/4.5	20
Фенилаланин	0.25/4.4	0.21/3.9	0.24/4.3	0.24/4.4	0.23/4.1	0.23/4.1	0.24/4.2	0.22/3.9	0.26/4.5	0.27/4.6	0.27/4.7	16
Гистидин	0.08/1.5	0.08/1.4	0.09/1.6	0.09/1.6	0.08/1.5	0.09/1.5	0.09/1.6	0.08/1.4	0.09/1.5	0.10/1.7	0.09/1.6	19
Лизин	0.31/5.6	0.33/6.0	0.28/5.1	0.29/5.3	0.31/5.6	0.29/5.2	0.30/5.4	0.30/5.2	0.31/5.3	0.33/5.6	0.34/5.8	16
Аргинин	0.26/4.6	0.25/4.5	0.23/4.1	0.25/4.5	0.25/4.6	0.27/4.9	0.27/4.7	0.28/4.9	0.28/4.8	0.30/5.1	0.29/5.0	19
Сумма	5.55	5.47	5.59	5.55	5.49	5.57	5.66	5.69	5.82	5.88	5.86	
Содержание азота, %	1.3	1.3	1.2	1.3	1.0	1.6	2.0	2.1	2.6	2.3	2.2	10
Содержание свинца, мг/кг	1.55	1.62	1.57	1.49	1.49	1.64	1.32	1.40	1.42	1.35	1.64	20

Реакция растений на свинец, проявившаяся изменениями в продуцировании биомассы, определялась влиянием элемента на физиолого-биохимические процессы, проходящие в тканях растений. Наиболее изучено влияние высоких токсичных концентраций, выявлены механизмы, обеспечивающие устойчивость растений к избытку элемента [19]. Но в то же время под воздействием умеренных концентраций свинца происходила активация ряда процессов в листовых пластинках проростков яровой пшеницы [30]. В невысоких концентрациях (25 мг Pb/кг почвы) свинец увеличил биомассу проростков ячменя [31], в дозе 50–100 мг/кг стимулировал прорастание проростков пшеницы [12]. Под действием низких концентраций свинца в овсе увеличились белок-синтезирующая способность, активность пероксидаз и полифенолоксидаз, концентрации хлорофиллов и каротиноидов [32].

В наших исследованиях улучшение азотного обмена, белоксинтезирующей способности и увеличение продуктивной массы гороха положительно сказались на выходе сырого протеина. Он увеличился с 25 до 338 мг/растение пропорционально росту содержания подвижного свинца ($r = 0.98$, $P < 0.001$) в почве и содержанию элемента в органах растений ($r = 0.86$, $P < 0.001$). В злаковом растении более высокий (на 28–35%) сбор сырого протеина пришелся на концентрации подвижного свинца 7.1–10.0 мг/кг (табл. 1).

Изменение стабильности белкового обмена, вызванное ростом содержания свинца в почве, является ответной реакцией растений на стресс и результатом адаптации к сложившейся экологической ситуации. Изменения обусловлены процессами поглощения и транспорта азота, включением его в соединения, обеспечивающие защитные силы растительного организма в присутствии ТМ [17]. Под действием ТМ происходит снижение активности нитратредуктазы, в результате которой происходит ингибирование восстановления нитратов и накопление нитратного азота в органах растений [8, 16]. Наряду с ростом количества азота происходит и снижение содержания азота в растениях, ухудшение азотного обмена под влиянием высоких концентраций ТМ [17].

С увеличением количества азота в наземной биомассе растений изменилось содержание практически всех аминокислот. Суммарное их количество в горохе повысилось с 4.49 до 8.31 (табл. 2), в овсе – с 5.55 до 5.92 г/100 г (табл. 3). Сумма аминокислот положительно коррелировала с содержанием азота в горохе ($r = 0.93$, $P < 0.001$) и овсе ($r = 0.86$, $P < 0.001$), а также с количеством свинца как в бобовой ($r = 0.79$, $P < 0.001$), так и злаковой ($r = 0.90$, $P < 0.001$) культуре. Увеличение суммар-

ного содержания аминокислот в зерне ячменя под действием ТМ наблюдали и при возделывании культуры на дерново-подзолистой почве [8].

При этом необходимо отметить, что связи между величиной биомассы растений и суммой аминокислот носили разнонаправленный характер: положительный ($r = 0.74$, $P < 0.001$) для бобовой и отрицательный – для злаковой ($r = -0.53$, $P < 0.05$) культуры, что объясняется стабилизацией и некоторым снижением величины биомассы овса с ростом содержания свинца в почве.

Значимое увеличение содержания большинства аминокислот в горохе произошло при содержании подвижного свинца в почве ≥ 2.2 мг/кг, свинца в растениях – ≥ 0.8 мг/кг (табл. 2). Доказанный рост количества аланина в составе белков начался при более высоком количестве подвижного элемента в почве – 5.5 мг/кг и в растениях – 1.5 мг/кг.

В большей мере в белках наземной биомассы бобового растения увеличилось содержание пролина – с 0.33 до 1.53 г/100 г, различие с контролем достигло 4.4 раза. Количество аспарагиновой кислоты (0.51–1.25 г/100 г) изменилось в 2.5 раза. Для остальных аминокислот разница составила 1.2–1.5 раза. При содержании подвижного свинца ≥ 7.1 мг/кг в составе аминокислот был обнаружен цистин.

С наличием подвижного свинца в почве наиболее тесно коррелировало содержание аспарагиновой кислоты ($r = 0.92$, $P < 0.001$) и пролина ($r = 0.90$, $P < 0.001$), менее тесная взаимозависимость установлена в отношении глутаминовой кислоты, серина и гистидина. Количество этих аминокислот увеличивалось пропорционально росту биомассы бобового растения. При этом необходимо отметить, что содержание пролина наиболее интенсивно увеличивалось вплоть до содержания подвижного свинца 8.6, аспарагиновой кислоты – 10, глутаминовой кислоты – 17.1 мг/кг.

Изменения в аминокислотном составе биомассы овса были менее существенны, чем в бобовом растении. Статистически доказано увеличение количества аспарагиновой кислоты при содержании подвижного свинца ≥ 13.3 мг/кг и глутаминовой кислоты при его концентрации ≥ 10 мг/кг. Содержание этих аминокислот связано с наличием свинца (ААБ) в почве ($r = 0.91$ – 0.92 , $P < 0.001$). Кроме того, установлено статистически значимое повышение уровня изолейцина, начиная с содержания свинца 5.5 мг/кг и изолейцина при содержании подвижной формы элемента 17.6–20.9 мг/кг.

Изменения в содержании остальных аминокислот в наземной массе овса находились в пределах погрешности, имея в основном тенденцию к росту по мере повышения количества свинца в

почве. Исключением был пролин, уровень его содержания составил 84–96% от контроля. В отношении этой важной с точки зрения адаптационных процессов аминокислоты [16, 18, 19] выявлена тенденция к снижению (показатели в пределах погрешности). В целом изменения в содержании аминокислот в биомассе овса были менее существенными, чем в бобовом растении.

Анализ относительного количества аминокислот (в % от их суммы) в большей мере, чем их абсолютное содержание, дает возможность оценить участие отдельных из них в синтезе белков и других соединений, связанных с адаптацией растений к создавшимся экологическим условиям. Этот показатель, кроме того, позволяет определить питательную ценность белков кормовых культур.

В белках бобовой культуры, исходя из относительного содержания аминокислот, преобладали глутаминовая и аспарагиновая кислоты (табл. 2). Содержание аспарагиновой кислоты в белках гороха с ростом уровня загрязнения существенно повысилось с 11.3 до 16.3%, в большей мере при содержании подвижного свинца ≥ 8.6 мг/кг. Доля этой аминокислоты в составе белков бобового растения положительно коррелировала с количеством свинца в почве ($r = 0.94$, $P < 0.001$) и в растениях ($r = 0.92$, $P < 0.001$), а также с величиной биомассы ($r = 0.95$, $P < 0.001$).

Относительное содержание глутаминовой кислоты с ростом содержания свинца в почве и растениях, наоборот, снизилось с 12.3 до 10.0%. Между наличием подвижного свинца в почве и долей глутаминовой кислоты в белках гороха установлена отрицательная корреляция ($r = -0.72$, $P < 0.001$). Участие ее в формировании белков также отрицательно было связано с транслокацией свинца в растения ($r = -0.61$, $P < 0.05$).

Рост количества аспарагиновой кислоты в белках гороха в ответ на действие свинца связан с тем, что эта аминокислота является источником азота для синтеза новых аминокислот [33], входящих в состав белков и соединений, способствующих интоксикации ТМ. Аналогичное увеличение доли аспарагиновой кислоты в биомассе гороха вследствие адаптационных процессов происходило и под действием меди и цинка [21, 22].

С ростом концентрации свинца в почве в наземной биомассе гороха более чем в 2 раза (с 7.45 до 19.1%) увеличилась доля пролина. Относительное содержание этой аминокислоты положительно коррелировало с содержанием элемента в почве ($r = 0.90$, $P < 0.001$) и растениях ($r = 0.92$, $P < 0.001$). Белки высокопродуктивных бобовых растений отличались более высокой долей пролина ($r = 0.86$, $P < 0.001$).

Достоверное увеличение содержания свободного пролина в листьях кормовых бобов наблюдали при загрязнении свинцом, в вариантах Pb_{1500} и Pb_{2000} количество его увеличилось на 66 и 236% соответственно [27].

Увеличение количества пролина обусловлено особой ролью этой аминокислоты в метаболизме растений при адаптации к стрессу [16–19]. Изменения в формировании аминокислоты происходят в зависимости от фазы ответной реакции (фазы адаптации и фазы повреждения) растительного организма на стресс, связанный с действием ТМ [34]. Дисбаланс между синтезом пролина, включением его в состав белков и деструкцией в ответ на высокие концентрации свинца в почве обусловил изменения в содержании аминокислоты в биомассе бобового растения.

При содержании подвижного свинца ≥ 1.9 мг/кг в горохе активизировался синтез цистина. В контроле и при более низких концентрациях свинца он не был установлен. Доля метионина в горохе была более высокой при содержании подвижного свинца 1.5–2.9 мг/кг. Однако вследствие значительных потерь этих кислот при гидролизе ($t = 110^\circ C$) можно говорить лишь о тенденции к росту их долевого участия в белках.

Увеличение синтеза цистина и метеонина обусловлено тем, что ТМ в растениях могут связываться с соединениями, содержащими тиоловые группы, в т.ч. и с замещенным цистеином [35]. Цистеин образуется в результате восстановления цистина. Синтез металлсвязывающих соединений с тиоловыми ($-SH$) группами в ответ на избыток ТМ является одним из наиболее специфических механизмов поддержания гомеостаза в растительной клетке [20].

За счет увеличения относительного количества аспарагиновой кислоты и пролина участие остальных аминокислот в синтезе белковых соединений с ростом поступления свинца в растения гороха несколько снизилось. По сравнению с бобовым растением овес характеризовался более низким относительным содержанием большинства аминокислот, кроме аспарагиновой кислоты и пролина. Доля аспарагиновой кислоты в наземной биомассе злака (в контроле) в 1.3 раза, пролина — в 2.0 раза превышала их количество в бобовом растении.

С ростом загрязнения относительное содержание аспарагиновой кислоты в составе белков овса увеличилось с 15.0 до 17.0% (табл. 3), положительно коррелируя с содержанием свинца в почве ($r = 0.75$, $P < 0.001$) и в растениях ($r = 0.72$, $P < 0.001$). Участие аспарагиновой кислоты в синтезе белковых соединений увеличивалось также при избытке меди [21], цинка [22] кадмия [23] и кобальта [24].

Наряду с аспарагиновой в злаковом растении возросло относительное содержание глутаминовой кислоты (с 11.9 до 13.5%), изменения происходили пропорционально росту содержания свинца в почве ($r = 0.84$, $P < 0.001$) и в биомассе растений ($r = 0.86$, $P < 0.001$). Высокие концентрации меди и кобальта в почве также привели к увеличению ее доли в составе белков наземной биомассы овса [21, 24]. Усиленный синтез аминокислот мог осуществляться за счет увеличившейся под действием ТМ активности глутаминсинтетазы [36].

Интенсификация синтеза глутаминовой кислоты в растениях овса, так же как и аспарагиновой кислоты, в обоих растениях обусловлена их ролью в реакциях переаминирования [33]. Выступая в качестве источника азота, эти аминокислоты поддерживают синтез аминокислот, в том числе и тех, которые входят в состав белков и соединений, способствующих снижению токсичности ТМ. В частности, биосинтез одной из наиболее важных аминокислот для адаптации растений в условиях стресса — пролина — осуществляется из глутамина, им же завершается и его деструкция [18, 36].

Вовсе под действием свинца преобладали процессы деструкции пролина, относительное его содержание снизилось с 16.0 до 12.8%, негативно коррелируя с наличием элемента в почве ($r = -0.98$, $P < 0.001$), в растениях ($r = -0.88$, $P < 0.001$).

Как и в бобовом растении, в злаке увеличилась доля цистеина и метионина. Тенденцию к росту содержания серосодержащих аминокислот в биомассе гороха наблюдали и при загрязнении другими ТМ [21–24]. Незначительно повысилась доля изолейцина и лейцина в 2-х последних вариантах. Доля остальных аминокислот с повышением содержания свинца в почве в основном осталась прежней.

Отсутствие существенных изменений в относительном содержании преобладающей части аминокислот (табл. 2, 3) обусловлено генетической стабильностью аминокислотного состава белков растений. Непропорциональные изменения в содержании отдельных из них свидетельствуют о нарушении белкового обмена, вызванного высоким содержанием свинца в почве и органах растений. Дестабилизация аминокислотного состава связана с экспрессией генов в ответ на стресс, в результате которого в растениях активируется синтез стрессовых белков и металлсвязывающих соединений [1, 17], обеспечивающих адаптацию растений к изменившимся условиям. Неустойчивый синтез аминокислот в условиях загрязнения ТМ обусловлен также невосребованностью отдельных аминокислот для синтеза белков [3].

Кроме нарушений в синтезе аминокислот вследствие адаптивных реакций на состав белков повлияли изменения в фенологическом развитии и морфологии растений. Под действием свинца растения на 2–3 сут раньше вступали в фазу цветения, в более ранние сроки и более интенсивно шло образование плодов. Среднее количество бобов на одно растение при содержании подвижного свинца 8.6 мг/кг составляло 1.0 ± 0.2 , при содержании 20.9 мг/кг — 1.9 ± 0.5 шт., в контроле к моменту уборки растения продолжали цвести. Изменившееся соотношение между вегетативными и репродуктивными органами сказалось на содержании азота, фракционном и аминокислотном составе продуктивной массы. Направленность метаболизма азота в значительной мере зависит от фазы развития растений, в период формирования семян увеличивается приток азота из вегетативных органов [37].

Одним из важных показателей качества растительной продукции является наличие в белках незаменимых аминокислот, определяющих пищевую ценность кормовых культур. Абсолютное содержание незаменимых аминокислот в биомассе гороха под влиянием свинца увеличилось с 1.71 до 2.56 г/100 г. Наиболее интенсивные изменения происходили при росте содержания подвижного свинца в почве от 0.3 (контроль) до 8.6 мг/кг ($r = 0.91$, $P < 0.001$). При более высоких концентрациях элемента количество незаменимых аминокислот стабилизировалось с небольшим снижением при содержании свинца >17.6 мг/кг. Относительное количество незаменимых аминокислот при этом было наибольшим (37.2–38.3%) при низком содержании свинца, начиная с концентрации 5.5 мг/кг, их доля постепенно сократилась до 30.1%.

Биомасса овса по относительному количеству незаменимых кислот (30.3–31.5%) отставала от обеспеченности ими белков надземной массы гороха. Синтез незаменимых аминокислот в злаке был достаточно постоянным.

В аминокислотном составе культур, в изменениях, вызванных загрязнением, отразились специфические особенности растений. Надземная масса гороха отличалась более высоким относительным содержанием большинства аминокислот. Обе кормовые культуры в контроле характеризовались достаточно близким относительным содержанием глутаминовой кислоты. На загрязненной свинцом почве доля глутаминовой кислоты в белках злакового растения была больше, чем в контроле. В бобовой культуре ее количество снизилось. Биомасса овса характеризовалась более высоким относительным содержанием пролина и аспарагиновой кислоты: различия по участию

этих аминокислот в составе белков кормовых растений в контроле составили соответственно 2.1 и 1.3 раза. В результате приспособительных реакций, обусловленных избытком свинца, доля аспарагиновой кислоты в биомассе гороха увеличилась в большей мере, чем в белках злака. В бобовой культуре существенно возросла доля пролина, в злаковом растении относительное количество этой аминокислоты, наоборот, снизилось.

Анализ аминокислотного состава белков кормовых трав позволил оценить результаты сложных процессов метаболизма азота, азотсодержащих соединений, выявить суммарный эффект воздействия свинца на участие аминокислот в синтезе белков с учетом изменений в развитии растений, а также оценить качество растительной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, свинец оказал значительное влияние на метаболизм азота в кормовых растениях, в результате приспособительных реакций в растениях увеличилось содержание азота и суммы аминокислот. Интенсивность процессов определялась концентрацией элемента и спецификой культур. Значимые изменения в содержании азота и большинства аминокислот в бобовом растении происходили при содержании подвижного свинца от 2.2 до 10.0 мг/кг.

Суммарное количество аминокислот в биомассе гороха увеличилось до 1.8 раза. Изменения в содержании преобладающей части аминокислот были пропорциональны увеличившейся их сумме. Более существенно, чем сумма, возросло содержание пролина (до 4.4 раза) и аспарагиновой кислоты (до 2.5 раза). Изменения в содержании азота и аминокислот в биомассе овса были менее значительными.

В ответ на стресс в бобовой культуре произошел рост относительного содержания пролина и аспарагиновой кислоты при одновременном сокращении доли глутаминовой кислоты. В белках овса увеличилось относительное содержание аспарагиновой и глутаминовой кислот, доля пролина при этом снизилась. Изменения свидетельствовали об участии этих аминокислот в синтезе стрессовых белков и других металлсвязывающих соединений в процессе адаптации растений к экологическим условиям.

Относительное количество незаменимых аминокислот было наиболее высоким при низком содержании свинца, начиная с концентрации 5.5 мг/кг, доля их снизилась. В белках овса доля незаменимых аминокислот была более постоянной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. С. 439.
2. *Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С.* Микроэлементозы человека: экология, классификация, органопатология. М.: Медицина, 1991. С. 496.
3. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва—растение. Новосибирск: СО РАН, 2012. С. 220.
4. *Обухов А.И.* Доступность свинца растениям // Свинец в окружающей среде. М.: Наука, 1978. С. 109—116.
5. *Обухов А.И., Ефремова Л.Л.* Охрана и рекультивация почв, загрязненных тяжелыми металлами // Мат-лы 2-й Всесоюзн. конф. "Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы". М., 1980. С. 23—35.
6. *Зырин Н.Г., Каплунова Е.В., Сердюкова А.В.* Нормирование содержания тяжелых металлов в системе почва—растение // Хим. в сел. хоз-ве. 1985. № 6. С. 45—48.
7. *Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Казнина Н.М.* Влияние ионов свинца на рост и морфофизиологические показатели растений ячменя и овса // Физиол. и биохим. культ. раст. 2001. Т. 33. № 5. С. 387—393.
8. *Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 5. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. С. 148.
9. *Вальков В.Ф., Колесников С.И., Казеев К.Ш.* Влияние загрязнения тяжелыми металлами на фитотоксичность чернозема // Агрохимия. 1997. № 6. С. 50—55.
10. *Степанок В.В.* Влияние высоких доз свинца на элементный состав растений // Агрохимия. 1998. № 7. С. 69—76.
11. *Дмитраков Л.М., Дмитрикова Л.К.* Транслокация свинца в растениях овса // Агрохимия. 2006. № 2. С. 71—77.
12. *Убугунов В.Л., Доржонова В.О.* Оценка фитотоксичности свинца в дерново-подбуре // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2010. № 338. С. 207—211.
13. *Арышева С.П., Анисимов В.С., Санжарова Н.И.* Изучение миграционной способности Pb в системе почва—растение и его фитотоксичность в почвах разного типа // Агрохимия. 2013. № 1. С. 85—94.
14. *Ильин В.Б.* Оценка защитных возможностей системы почва—растение при модельном загрязнении почвы свинцом (по результатам вегетационных опытов) // Агрохимия. 2004. № 4. С. 52—57.
15. *Дмитраков Л.М., Дмитрикова Л.К., Абашина Н.А., Пинский Д.Л.* Влияние свинца на морфометрические показатели овса // Агрохимия. 2004. № 8. С. 48—53.
16. *Бабкин В.В., Завалин А.А.* Физиолого-биологические аспекты действия тяжелых металлов на растения // Хим. в сел. хоз-ве. 1995. № 5. С. 17—21.

17. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2014. С. 194.
18. Кузнецов В.В., Шевякова Н.И. Пролин при стрессе: биологическая роль, метаболизм, регуляция // Физиология растений. 1999. Т. 46. № 2. С. 321–336.
19. Серегин И.В., Иванов В.Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
20. Серегин И.В. Фитохелатины и их роль в детоксикации кадмия у высших растений // Усп. биол. химии, 2001. Т. 41. С. 283–300.
21. Елькина Г.Я. Содержание аминокислот в растениях при разных уровнях содержания меди в почве // Агрохимия. 2018. № 12. С. 88–96.
22. Елькина Г.Я. Влияние различного содержания цинка в почве на аминокислотный состав биомассы кормовых трав // Агрохимия. 2020. № 4. С. 57–65.
23. Елькина Г.Я. Влияние разных уровней загрязнения почвы кадмием на содержание аминокислот в растениях // Агрохимия. 2014. № 5. С. 72–78.
24. Елькина Г.Я. Содержание аминокислот в растениях при разных уровнях содержания кобальта в почве // Агрохимия. 2022. № 8. С. 78–86.
25. Елькина Г.Я. Поведение свинца в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2015. № 8. С. 73–80.
26. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве // Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. 2021. С. 389–391.
27. Арышева С.П., Дикарев В.Г., Гераскин С.А. Продуктивность, морфологические и физиолого-биохимические показатели бобов кормовых, выращенных на загрязненной свинцом почве // Агрохимия. 2013. № 2. С. 77–85.
28. Умаров М.М., Азиева Е.Е. Некоторые биохимические показатели загрязнения почв тяжелыми металлами // Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 109–115.
29. Романов Г.Г., Спицина Т.Е. Влияние тяжелых металлов на биологическую активность почвы // Тр. Коми НЦ УрО РАН. 1996. № 146. С. 101–107.
30. Берников Л.Р. Индуцированный свинцом умеренный биологический стресс проростков яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Изв. Калининград. ГТУ. 2013. № 31. С. 126–133.
31. Панин М.С., Сапакова А.К. Влияние различных доз свинца на содержание форм его соединений в системе “почва–проростки ячменя” // Тез. докл. Международ. научн. конф. “Современные проблемы загрязнения почв”. М., 2004. С. 148–150.
32. Елькина Г.Я., Табаленкова Г.Н., Куренкова С.В. Влияние тяжелых металлов на урожайность и физиолого-биохимические показатели овса // Агрохимия. 2001. № 8. С. 73–78.
33. Власюк П.А., Шкварук Н.М., Сапаты С.Е., Шамотиенко Г.Д. Химические элементы и аминокислоты в жизни растений и человека. Киев: Наукова думка, 1974. С. 220.
34. Селезнева Е.М., Гончарова Л.И., Белова Н.В. Влияние кадмия на некоторые морфофизиологические и биохимические показатели ячменя // Агрохимия. 2008. № 4. С. 82–86.
35. Дубинина Ю.Ю., Дульцева Г.Г., Палесский С.В., Скубневская Г.И. Изучение химической природы защитной реакции растений на избыточное содержание кадмия в почве // Экол. химия. 2003. № 12. С. 41–46.
36. Wang Z., Yuan Y., Ou J., Lin Q., Zhang C. Glutamine synthetase and glutamate dehydrogenase contribute differentially to proline accumulation in leaves of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings to different salinity // J. Plant Physiol. 2007. V. 164. P. 695–701.
37. Измайлов С.Ф. Азотный обмен в растениях. М.: Наука, 1986. С. 320.

Content of Amino Acids in Plants at Different Levels of Lead in the Soil

G. Ya. El'kina

*Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch, RAS
ul. Kommunisticheskaya 28, Syktyvkar 167982, Russia
E-mail: elkina@ib.komisc.ru*

The effect of lead on the amino acid composition of annual fodder grasses was studied. It was found that in response to soil pollution in plants, the content of nitrogen and amino acids in the composition of proteins increased. Significant changes in the content of nitrogen and most amino acids in the legume plant occurred at a content of mobile lead from 2.2 to 10.0 mg/kg. The contamination caused an increase in the relative content of proline and aspartic acid and a decrease in the proportion of glutamic acid in pea proteins. In the biomass of oats, the relative content of aspartic and glutamic acids has increased, the proportion of proline has decreased. Starting from the concentration of lead in the soil of 5.5 mg/kg, the proportion of essential amino acids in the proteins of the legume plant decreased.

Key words: amino acids, peas, oats, lead, soil.

УДК 631.417.2:543

АНАЛИЗ ГУМИНОВОГО ВЕЩЕСТВА МЕТОДОМ ОЭС-ИСП¹

© 2023 г. Р. П. Колмыков

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
650099 Кемерово, просп. Советский, 18, Россия

E-mail: kolmykoff.roman@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.11.2022 г.

После доработки 12.01.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Оценены возможности оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ОЭС-ИСП) (в режиме радиального наблюдения плазмы) гуминовых препаратов (ГП), предложенная методика позволяет количественно определить до 24-х элементов (As, Al, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Si, Sr, Ti, V и Zn). Перечень этих элементов позволит давать оценку использованию ГП для питания почвы, а также поможет избежать опасности, если содержание в них токсичных примесей будет выходить за рамки их предельно допустимых концентраций. В отсутствие стандартных образцов с аттестованным содержанием определяемых элементов правильность анализа для макрокомпонентного состава подтверждена сравнением результатов гравиметрического определения зольности исследованных объектов с расчетными данными, полученными при обработке результатов ОЭС-ИСП анализа. Систематические ошибки при определении микропримесей были минимизированы при использовании метода добавок стандартных растворов (от матричных влияний), а также с 6-тью параллельными измерениями образцов, приготовленных независимо друг от друга. Правильность методики также оценивали с помощью модельных растворов, близких к возможному микропримесному минеральному составу ГП и *t*-критерия Стьюдента. Проведено сравнение результатов, полученных для выделенной фракции гуминовых кислот, с литературными данными.

Ключевые слова: гуминовое вещество, гуминовый препарат, элементный анализ, оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ОЭС-ИСП).

DOI: 10.31857/S0002188123060091, **EDN:** QOYAXJ

ВВЕДЕНИЕ

Гуминовые вещества (ГВ) — это важнейший компонент широкого ряда объектов окружающей среды — от почв до бурых углей [1]. ГВ во многом определяют степень плодородия земель сельскохозяйственного назначения [2], принимают участие в распределении питательных веществ и микроэлементов [3], а также помогают обезвреживать загрязняющие агенты [4]. Хорошо известно, что ГВ стимулируют рост растений. Плодородие почв возрастает благодаря 2-м механизмам воздействия ГВ на субстрат. Прямое воздействие заключается в обогащении истощенной почвы органическим веществом, а опосредованное — в способности ГВ участвовать в комплексообразовании с ионами железа, что повышает биодоступность последнего и приводит к увеличению интенсивности роста растений [5, 6].

Очевидно, что при снижении плодородия почвы следует увеличивать в ней количество ГВ при помощи специально выделенных из биолитогенных пород гуминовых препаратов (ГП). Однако минеральное сырье содержит широкий перечень токсичных элементов-примесей [7], а в свете того, что ГВ являются мощными комплексообразователями [8, 9], не вызывает сомнения, что при их выделении может происходить накопление этих элементов в ГП, что в свою очередь может привести не только к пользе, но и к осложнениям от их применения. Совершенно ясно, что минеральный состав ГП будет разниться в зависимости от нахождения природного месторождения и его типа, а также способа их получения.

Отдельно следует отметить, что ГП уже широко применяют в промышленности — от целлюлозно-бумажного до строительных производств [5], а также перспективно их применение для охраны окружающей среды и биомедицины, что связано с их способностью к комплексообразованию с тяжелыми металлами и радионуклидами и

¹ Работа выполнена на оборудовании Научно-аналитического центра исследования химического состава и структуры углеродистых веществ (КемЦКП ФИЦ УУХ СО РАН) при использовании средств Сибирского отделения РАН (проект № 121033100144-8).

подавлению активности патогенных микроорганизмов и вирусов [10].

Вместе с таким широким спектром возможных областей применения ГП существует серьезная проблема стандартизации как самих препаратов, так и применения инструментальных методов к их анализу [11]. Более того, комплексное определение минерального состава ГП полностью не обеспечено ни научной базой, ни нормативной: отсутствуют общепризнанные стандартные образцы ГП, аттестованные на содержание минеральных компонентов, и методики их определения.

Подводя итоги, можно заключить, что, с одной стороны, определение основных и примесных минеральных компонентов актуально для контроля качества получаемых или отработанных ГП, с другой стороны, существует необходимость определения их сорбционной емкости тяжелых и токсичных металлов. Для достижения этих целей необходимо применение мощного инструментального метода элементного анализа, каким является оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ОЭС-ИСП). Представленная работа посвящена применению этого метода к элементному анализу ГП.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

От общего количества сухого гуминового препарата отбирали пробы по 100 мг. Эти навески помещали в полипропиленовые герметичные пробирки (Environmental Express, США), в которые добавляли по 4 мл смеси концентрированный азотной кислоты (ООО “Сигма Тек”, Россия) и деионизированной воды, полученной при помощи деионизатора воды “ДВ-1” (ООО “Цвет-Хром”, Россия), взятых в равных объемах. Закупоренные пробирки помещали в термоблок “Hot-Block” (Environmental Express, США), где его выдерживали при температуре 100°C в течение 2 ч.

Из полученного рассола готовили анализируемые растворы с использованием аттестованных мультиэлементных смесей (ООО НПП “Скат”, Россия) и государственных стандартных образцов ионов элементов (ООО “Уральский завод химической продукции”, Россия). Растворы анализировали на эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой “iCAP 6500” (Thermo, Великобритания) по методу добавок стандартных растворов.

Для выделения из коммерческого ГП гуминовых кислот и их последующего анализа отбирали 300 мг исходного препарата, заливали смесь 50 мл деионизированной воды и добавляли концентрированную кислоту до pH раствора 1.0–2.0 ед. Смесь нагревали в термоблоке до 80°C в течение 1 ч для

полноты выделения гуминовых кислот в отдельную фазу. После остывания параллельно приготовленных 6-ти смесей, их помещали в центрифугу для обработки при 4000 об./мин в течение 15 мин. Осадок промывали декантацией 2 раза, повторяя цикл центрифугирования. После его отделения пробирки помещали в термоблок и сушили при 80°C до образования влажных солей. Сушение проб продолжали в вакуумном сушильном шкафу “U-Lab” (ООО “U-Lab”, Россия) при 105°C. Пробирки с сухим остатком взвешивали на аналитических весах “ВСЛ-200/0.1А” (ООО “ТК Вессервис”, Россия) и по разнице массы пробирки с обезвоженным препаратом и до ее использования находили массу сухого остатка.

Озоление ГП проводили по методике [12] с последующим гравиметрическим анализом. Около 1 г сухого ГП помещали в электропечь “ЭКПС-10” (ОАО “Смоленское СКТБ СПУ”, Россия) в корундовой лодочке (ООО “Оятская керамика”, Россия) и выдерживали его при температуре 850°C. По разнице масс лодочки без образца и с ним определяли массу зольного остатка. Процедуру озоления повторяли 3 раза.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

О подготовке проб к анализу. Для проведения анализа навеску кристаллического порошка ГП необходимо перевести в раствор. В работах [13, 14] для вскрытия пробы использовали разложение азотной кислотой в автоклавах, помещенных в лабораторную микроволновую печь. Такие суровые условия пробоподготовки были призваны помочь полному вскрытию пробы. Условия такой обработки авторы не раскрывают, как не говорят и об альтернативных методах.

В этом исследовании для подобной обработки использовали термоблок с полипропиленовыми пробирками. Кристаллический порошок заливали водным раствором азотной кислоты (1 : 1). Пробирку герметично закрывали, помещали на 2 ч в термоблок, нагретый до 100°C. Такие условия позволяли получить полностью прозрачный раствор коричневого цвета. Таким образом, микроволновое разложение возможно заменить использованием объемного нагрева герметичных пробирок.

После того, как пробирки остыли, их содержимое переносили в мерные колбы 2-го класса точности на 50 мл, где раствор доводили до метки. Важно отметить, что через несколько часов после разведения начинает выпадать темный желеобразный осадок гуминовых кислот, т.к. среда в растворе сильно кислая; нужно успеть выполнить анализ приготовленных образцов в течение 1 сут (дня их приготовления), если есть намерение

провести валовый элементный анализ ГП, а не гуминовых и фульвокислот по отдельности.

Для того, чтобы получить кристаллический порошок, содержащий гуминовые кислоты, получали студенистый осадок из рассола при pH 1.0–2.0, который несколько раз промывали деионизированной водой, центрифугировали, а затем высушивали в 2 этапа (см. методику исследования). Центрифужные пробирки взвешивали на аналитических весах до их использования и после полного высушивания анализируемого материала. По разнице в массе пробирки с материалом и без него определяли массу полученного остатка. Средняя масса такого остатка – 184 ± 6 мг, при исходной массе в 300 мг кристаллического препарата, таким образом, это 61.3% от исходной массы ГП, что подтверждает обещанное производителем обещано содержание гуминовых кислот в препарате на уровне не менее 60 мас. %.

Стратегия калибровки и аналитические характеристики метода. Поскольку основными минеральными компонентами исследуемого ГП являются легкоионизируемые калий, кальций и натрий, можно говорить о наличии серьезных матричных воздействий на аналитические сигналы определяемых элементов.

Тем не менее, согласно литературному обзору, в гуминовых препаратах может потребоваться определить до 24-х элементов. Руководствуясь практикой спектрального химического анализа предпочтительным способом калибровки спектрометрического оборудования, следует выбрать метод добавок стандартных растворов.

Для того, чтобы оптимально использовать возможности лабораторного оборудования, все элементы были разделены на 2 группы по их содержанию в материале. Первую группу (0.3–4.0 масс. % в ГП), представляли распространенные элементы: кальций, калий, натрий, фосфор, железо и магний. Ко 2-й группе, от предела количественного определения (ПКО) до 0.3 масс. %, можно отнести As, Al, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, S, Si, Sr, Ti, V и Zn. Для получения адекватных калибровочных зависимостей, нужно снять данные об интенсивности спектрального излучения во всем выбранном концентрационном диапазоне, а затем выбрать нужный концентрационный интервал (в несколько концентраций элемента в ГП).

В качестве одной из возможных стратегий калибровки в данном исследовании предложено использовать мультиэлементные рабочие растворы с концентрацией 25 мг/л. В этом случае при приготовлении проб с добавками в 25 мл мерных колбах можно создать ситуацию, когда 1 мл добавленного к пробе раствора будет эквивалентен

Таблица 1. Концентрационный диапазон добавок стандартных растворов

V, мл	0.02	0.04	0.1	0.2	0.4	1	2	4
C, мг/л	0.04	0.08	0.2	0.4	0.8	2	4	8
W, %	0.02	0.04	0.1	0.2	0.4	1	2	4

Таблица 2. Настройки ИСП-инструмента

Параметры измерений	
Мощность плазмы, Вт	1200
Распылительный поток, л/мин	0.6
Охлаждающий поток, л/мин	12
Вспомогательный поток, л/мин	0.6
Обзор плазмы	Радиальный
Время записи сигнала, с	10
Скорость подачи исследуемого образца, мл/мин	1.5

1 масс. % в ГП. Пример такого подхода приведен наглядно в табл. 1. В этом случае для анализа необходима навеска ГП 100 мг. Примеры калибровочных графиков, полученных при использовании такого подхода приведены на рис. 1.

Параметры работы спектрометра (табл. 2) подбирали из соображений о широкой применимости метода, т.е. при таких условиях может работать самый доступный по стоимости эмиссионный ИСП-спектрометр.

Выбранные для проведения исследования аналитические эмиссионные длины волн элементов представлены в табл. 3, все аналитические линии свободны от спектральных наложений при выбранных условиях. Не было необходимости в использовании самых интенсивных линий при определении элементов, концентрации которых достигают единиц % в ГП, поэтому выбраны линии невысокой интенсивности, которые гораздо стабильнее сильных при записи спектра, что позволяет избежать возможных осложнений и сохранить линейность полученного сигнала. Как следствие, при построении калибровочных зависимостей величины их коэффициентов корреляции находятся в диапазоне 0.9999–0.999999, что свидетельствует о высокой стабильности заданных параметров спектрометра и правильной подготовке исследуемого материала к элементному анализу. В табл. 3 также приведены пределы обнаружения (ПО), достигнутые в ходе работы, рассчитанные программным обеспечением спектрометра по 3S-критерию с учетом таких тонких параметров как время экспозиции, величина шума детектора, количество его пикселей для записи сигнала и др.

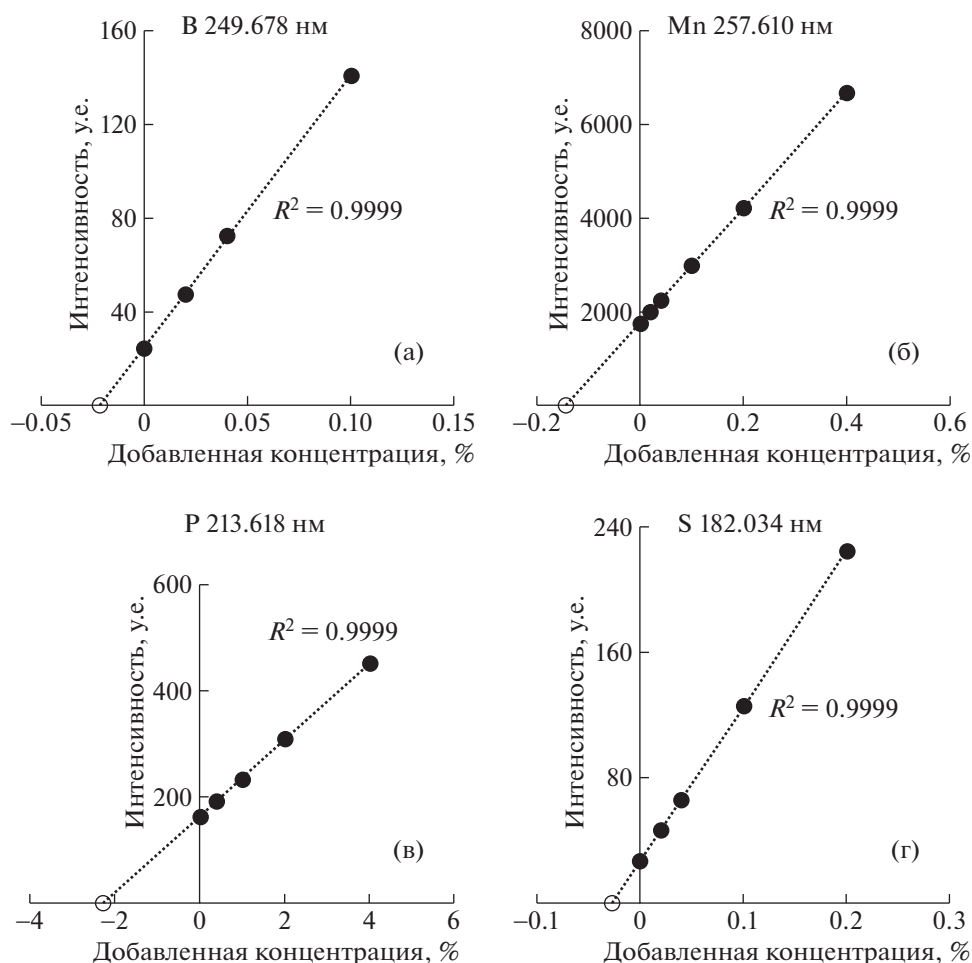


Рис. 1. Некоторые калибровочные зависимости, построенные для элементов разных концентрационных диапазонов: (а) – бор из ПКО – 0.3%, (б) – марганец из ПКО – 0.3%, (в) – фосфор из 0.3 – 4.0%, (г) – сера из ПКО – 0.3%.

При подготовке проб к анализу не удалось избежать ошибок, связанных со взвешиванием навесок ГП и разбавлением растворов, его содержащих. Чтобы оценить возможную погрешность представленной методики нужно учесть ошибки, связанные с приготовлением стандартных образцов и растворов, построением калибровок и дрейфом аналитического сигнала. Так, суммарная ошибка определения концентрации элементов на уровне 0.1% не должна превышать 4%.

Проверка правильности методики. Для того, чтобы проверить правильность проведенного анализа в отсутствие возможности применения других инструментальных методов и аттестованных стандартных образцов гуминовых препаратов, результаты элементного анализа сравнили с результатами озоления сухого остатка ГП. Это озоление проводили по методике, описанной в ГОСТ 55661-2013 “Топливо твердое минеральное. Определение зольности” [12]. Согласно исполь-

зуемой методике, для одного акта озоления необходимо 1 г вещества.

Средняя экспериментально определенная зольность ГП составила 14.9%. Расчетная зольность по результатам элементного анализа (при учете концентраций элементов $\geq 0.1\%$) составляла $\approx 14.2\%$. Результаты такого расчета приведены в табл. 4. Расхождение результатов, полученных независимо друг от друга, составляли 4.7%, что косвенно подтверждало правильность определения макрокомпонентного минерального состава ГП.

Для того чтобы проверить правильность методики, также можно использовать *t*-критерий, анализируя результаты анализа растворов ГП с введенными в него известными концентрациями элементов, которые этот рассол не содержит. Результаты такой статистики приведены в табл. 5.

Средние величины измеренных содержаний умеренно отличаются от заданных. Среднеквадратичное отклонение при 6-ти параллельных анализах не превышает 9% при минус 2-м порядке

Таблица 3. Эмиссионные аналитические линии определяемых элементов с пределами обнаружения, коэффициентами корреляции калибровочных графиков и доверительными интервалами, полученными при определении элементного состава гуминового препарата

Элемент	Аналитическая линия, нм	Предел обнаружения, %	Элемент	Аналитическая линия, нм	Предел обнаружения, %
Al	396.152	2.3×10^{-3}	Mn	257.610	8.5×10^{-5}
As	197.262	1.0×10^{-2}	Mo	202.030	1.3×10^{-3}
B	249.678	9.0×10^{-4}	Na	818.326	4.2×10^{-2}
Ba	455.403	3.9×10^{-5}	Ni	231.604	9.0×10^{-4}
Ca	318.128	6.5×10^{-3}	P	213.618	4.9×10^{-3}
Cd	226.502	2.4×10^{-4}	Pb	220.353	3.2×10^{-3}
Co	228.616	7.0×10^{-4}	S	182.034	1.6×10^{-3}
Cr	267.716	4.4×10^{-4}	Si	251.611	1.1×10^{-3}
Cu	324.754	6.0×10^{-4}	Sr	421.552	2.4×10^{-5}
Fe	259.941	4.9×10^{-4}	Ti	334.941	1.9×10^{-4}
K	766.490	5.5×10^{-3}	V	292.402	6.0×10^{-4}
Mg	279.079	4.9×10^{-4}	Zn	213.856	2.8×10^{-4}

концентраций определяемых элементов. Коэффициенты Стьюдента, рассчитанные при доверительной вероятности 0.95 и степени свободы 5 не превышают его теоретической величины 2.57. Изложенное свидетельствует в пользу того, что предлагаемая методика характеризуется удовлетворительной точностью при анализе исследуемого объекта на содержание элементов с низкой концентрацией.

Сравнение результатов анализа с литературными данными. При сопоставлении результатов представляемой работы с результатами, взятыми из литературного обзора (табл. 6), обнаружены существенные отличия, которые определенно связаны с тем, что в других исследованиях анализировали гуминовые кислоты, а в этом — гуминовое вещество без разделения его на гуматы и фульваты. Для того чтобы иметь возможность сопоставить результаты этой работы с другими, была получена фракция гуминовых кислот и проведен ее элементный анализ по описанной в работе методике. Важно отметить, что природа происхождения анализируемого в данной работе ГП производителем не раскрывается в рекламации.

В работе [13] использовали микроволновое разложение гуминовых кислот в концентрированной азотной кислоте для последующего определения Al, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, V, Zn и Sr методом эмиссионного спектрального анализа с индуктивно связанной плазмой. В результате получили большую концентрацию натрия из-за щелочной обработки сырья. Кроме того, авторы работы считают, что присутствие кремния, железа и алюминия в определен-

ных количествах также связано с использованием гидроксида натрия в ходе синтеза. В то же время концентрация алюминия в исследуемом ГП и полученной из него фракции гуминовых кислот в данной работе гораздо меньше, чем в работе [13], несмотря на сопоставимое количество натрия. Количество кремния в [13] сопоставимо с данной работой, железа — гораздо меньше (табл. 6). Содержание Cd, Co и Pb не было определено, так же как и в текущем исследовании. В работе [13] серу и кремний количественно определили при помощи энергодисперсионной спектроскопии на базе электронного микроскопа, однако точных результатов в работе не привели.

В работе [14] изучали химический состав гуминовой кислоты, полученной из лигнита (бурого

Таблица 4. Моделирование состава золы исследованного гуминового препарата на основании данных элементного анализа

Элемент	$C_{\text{элемент}}, \%$	Оксид-эквивалент	$W_{\text{окс}}, \%$
Al	0.281 ± 0.008	Al_2O_3	0.53
Ca	2.16 ± 0.05	CaO	3.0
Fe	0.854 ± 0.019	Fe_2O_3	1.2
K	1.58 ± 0.03	K_2O	1.9
Mg	0.422 ± 0.010	MgO	0.71
Mn	0.144 ± 0.003	MnO	0.19
Na	0.998 ± 0.026	Na_2O	1.3
P	2.28 ± 0.05	P_2O_5	5.2
Si	0.1076 ± 0.0023	SiO_2	0.2
Итого	8.83	Итого	14.23

Таблица 5. Воспроизводимость при анализе искусственно введенных в исследованный гуминовый препарат концентраций элементов и экспериментальные величины коэффициента Стьюдента ($n = 6$, $P = 0.95$)

	$X_{\text{введ}}, \%$	$\langle X \rangle_{\text{найд}}, \%$	$S, \%$	t_{exp}
Cd	1.00×10^{-2}	1.05×10^{-2}	5.7%	2.04
Co	1.00×10^{-2}	1.04×10^{-2}	4.8%	1.96
Cr	1.00×10^{-2}	0.95×10^{-2}	5.8%	2.23
Ni	1.00×10^{-2}	1.04×10^{-2}	4.6%	2.15
V	1.00×10^{-2}	1.05×10^{-2}	5.0%	2.36
Pb	1.00×10^{-2}	0.92×10^{-2}	8.6%	2.48
Mo	1.00×10^{-2}	0.94×10^{-2}	6.5%	2.41

угля), при этом серу определяли при помощи СН-NOS-анализа. Следовательно, не смогли определить ее в гуминовой кислоте этим же методом, хотя ее содержание в лигните, по приведенным в тексте работы данным, составило 0.4552% (здесь и далее округление авторское). Затем в табл. 6 работы [14] привели результаты, совершенно не соответствующие предыдущему анализу: 0.2204% — в лигните и 0.0533% — в гуминовой кислоте (методом ОЭС-ИСП после микроволнового разложения). В работе также указывают на содержание в лигните — 0.0222%, содержание в гуминовой кислоте — 29.1 мг/кг, гуминовая кислота — это выделенная из лигнита фракция, указывают на содержание фосфора в лигните, указывают на содержание фосфора в гуминовой кислоте, опять же без приведения подробностей аналитической методики. В табл. 5 и 6 работы [14] приведены пределы обнаружения, которые никак не согласуются с определенными концентрациями, что вносит путаницу в результаты анализа при пересчете на сухое вещество. В общем, концентрации элементов, определенных в представленной работе, существенно больше, чем в работе [14].

Работа [15] интересна тем, что у авторов был доступ к стандартным образцам гуминовых кислот Международного общества гуминовых веществ (почвы из Эллиота и торфа из Воскиша), которые практически не доступны для приобретения. В той работе задались целью определять элементарный фосфор в гуминовых веществах количественно для того, чтобы иметь возможность исследовать его круговорот в природе.

Для решения поставленной задачи использовали УФ-спектроскопию, метод с молибденовой синью и характеристическую длину волны 850 нм. Описанный в [15] метод, несомненно, более трудоемкий, чем представленный в данном исследовании.

Результаты анализа стандартных веществ и степень их соответствия паспортным показателям в [15] приведены не были, но обсуждались данные изменения количества фосфора в стандартах при различных добавках к ним энзима. Также в работе приведены паспортные содержания Al, Ca (до 6.2 мг/кг), Fe (до 1.7 мг/кг) и Mn (до 7 мг/кг) определенные при помощи ОЭС-ИСП. Эти содержания много меньше, чем определенные в исследованном ГП (табл. 6).

В работе [16] метод ОЭС-ИСП использовали для определения сорбционной активности гуминовых кислот в отношении Cu, Pb, Cr, Ni и Cd; при этом не приведены аналитические характеристики и валовые концентрации определенных элементов, что делает проведение аналогии с текущей работой затруднительным.

Проанализировав весь массив данных, можно предположить, что одной из наиболее вероятных причин такого расхождения в определении примесных элементов в гуматах является использование методов с калибровкой по внешним стандартам со слабым учетом матричных влияний или без него. Ввиду отсутствия подробных данных по методическому сопровождению цитируемых работ, отвергнуть такую гипотезу нельзя. Таким образом, можно заключить, что методический подход к минеральному анализу гуминовых веществ проработан слабо — его необходимо развивать и систематизировать для повышения эффективности исследований, связанных с миграцией минеральных компонентов в сельскохозяйственном цикле.

Можно с определенной уверенностью говорить и о том, что коммерческий ГП и его гуматы, исследованные в представленной работе, существенно отличаются от производных гуминовых кислот из литературы. Этот факт также позволяет сделать качественный вывод о существенных различиях в технологических схемах приготовления препаратов в случае, если коммерческий ГП получен из каменноугольного сырья, или же из разных по типу источников получения. Это делает методику чрезвычайно востребованной при установлении происхождения и определения качества подобных препаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценены возможности оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ОЭС-ИС) при аттестации гуминовых препаратов в части минерального состава. Предложенная методика позволяет определить до 24-х элементов (As, Al, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Si, Sr, Ti, V и Zn) в разных концентрационных диапазонах. Пере-

Таблица 6. Сравнение концентраций минеральных компонентов, полученных из литературных источников и в публикуемой работе

	W, % [13]	W, % [14]	W, % [15]	W, % в ГП	W, % в ГК
Al	0.1259 ± 0.0055	3.102×10^{-2}	<ПО	0.281 ± 0.008	$(3.48 \pm 0.29) \times 10^{-2}$
As	—	6×10^{-6}	—	<ПО	<ПО
B	—	—	—	$(2.15 \pm 0.09) \times 10^{-2}$	<ПО
Ba	—	—	—	$(2.64 \pm 0.11) \times 10^{-2}$	$(5.3 \pm 0.4) \times 10^{-2}$
Ca	$(2.01 \pm 0.28) \times 10^{-2}$	8.8×10^{-4}	$(3.1-6.2) \times 10^{-4}$	2.16 ± 0.05	0.440 ± 0.011
Cd	<ПО	6×10^{-5}	—	<ПО	<ПО
Co	<ПО	$<5 \times 10^{-6}$	—	<ПО	<ПО
Cr	—	$<5 \times 10^{-6}$	—	<ПО	<ПО
Cu	$(1.55 \pm 0.09) \times 10^{-3}$	$<5 \times 10^{-6}$	—	$(5.16 \pm 0.12) \times 10^{-2}$	$(5.06 \pm 0.14) \times 10^{-2}$
Fe	$(1.37 \pm 0.15) \times 10^{-2}$	4.47×10^{-2}	$(0.1-1.7) \times 10^{-4}$	0.854 ± 0.019	0.182 ± 0.005
K	$(4.48 \pm 0.20) \times 10^{-3}$	7.16×10^{-3}	—	1.58 ± 0.03	0.475 ± 0.014
Mg	$(4.54 \pm 0.90) \times 10^{-3}$	3.8×10^{-4}	—	0.422 ± 0.010	$(8.2 \pm 0.3) \times 10^{-2}$
Mn	$(5.74 \pm 1.30) \times 10^{-4}$	8.1×10^{-4}	7×10^{-4}	0.144 ± 0.005	$(6.03 \pm 0.12) \times 10^{-2}$
Mo	$(6.06 \pm 0.25) \times 10^{-3}$	—	—	<ПО	<ПО
Na	1.0552 ± 0.0062	0.9950	—	0.998 ± 0.026	0.557 ± 0.016
Ni	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	3×10^{-5}	—	<ПО	<ПО
P	—	2.91×10^{-3}	$(0.1-3.1) \times 10^{-4}$	2.28 ± 0.05	$(7.8 \pm 0.3) \times 10^{-2}$
Pb	<ПО	$<5 \times 10^{-6}$	—	<ПО	<ПО
S	—	5.33×10^{-2}	$(2.9-8.9) \times 10^{-4}$	$(2.65 \pm 0.13) \times 10^{-2}$	$(2.53 \pm 0.12) \times 10^{-2}$
Si	$<3 \times 10^{-2}$	1.55×10^{-2}	—	0.1076 ± 0.0023	$(5.45 \pm 0.23) \times 10^{-2}$
Sr	$(3.46 \pm 0.25) \times 10^{-4}$	—	—	$(2.12 \pm 0.08) \times 10^{-2}$	$(4.5 \pm 0.3) \times 10^{-3}$
Ti	—	—	—	$(6.6 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	$(5.38 \pm 0.25) \times 10^{-2}$
V	$(1.01 \pm 0.04) \times 10^{-3}$	$<5 \times 10^{-6}$	—	<ПО	<ПО
Zn	—	2.2×10^{-4}	—	$(5.7 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	$(4.56 \pm 0.06) \times 10^{-3}$

чень определяемых элементов позволяет делать выводы о ценности получаемых препаратов для питания почвы минеральными компонентами и микроэлементами, необходимыми для роста сельскохозяйственных культур, а также помогает избежать применения потенциально опасных ГП, если содержание токсичных примесей будет выходить за рамки их предельно допустимых концентраций.

В ходе выполнения работы из-за отсутствия стандартных образцов с аттестованными содержаниями определяемых элементов правильность определения макрокомпонентного состава была подтверждена при помощи сравнения результатов независимого цикла гравиметрического определения зольности исследованных объектов с расчетными данными, полученными при обработке результатов ОЭС-ИСП-анализа. Систематические ошибки при определении микропримесей были минимизированы с помощью метода

добавок стандартных растворов (пассивный учет матричных влияний) и 6-ти параллельных измерений на образцах, приготовленных независимо друг от друга.

Разработанная экспрессная методика элементного анализа ГП является частью методического комплекса для инструментальных методов анализа, применяющихся в Институте углей ИХИ РАН для анализа продуктов переработки угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Enev V., Pospíšilová L., Klučáková M., Liptaj T., Doškočil L. Spectral characterization of selected humic substances // Soil Water Res. 2014. V. 9 (1). P. 9–17. <https://doi.org/10.17221/39/2013-SWR>
2. Dudek M., Łabaz B., Bednik M., Medýnska-Juraszek A. Humic substances as indicator of degradation rate of chernozems in South-Eastern Poland // Agronomy.

2022. V. 12. P. 733.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12030733>
3. Mellett T., Buck K.N. Spatial and temporal variability of trace metals (Fe, Cu, Mn, Zn, Co, Ni, Cd, Pb), iron and copper speciation, and electroactive Fe-binding humic substances in surface waters of the eastern Gulf of Mexico // *Marine Chem.* 2020. V. 227. 103891.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2020.103891>
 4. Bi D., Yuan G., Wei J., Xiao L., Feng L., Meng F., Wang J. A Soluble humic substance for the simultaneous removal of cadmium and arsenic from contaminated soils // *Inter. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. V. 16. 4999.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16244999>
 5. Peña-Méndez E.M., Havel J., Patočka J. Humic substances-compounds of still unknown structure: applications in agriculture, industry, environment, and biomedicine // *J. Appl. Biomed.* 2004. V. 3. P. 13–24.
<https://doi.org/10.32725/jab.2005.002>
 6. Anuchina M.M., Pankratov D.A., Abroskin D.P., Kulikova N.A., Gabbasova D.T., Matorin D.N., Volkov D.S., Perminova I.V. Estimating the toxicity and biological availability for interaction products of metallic iron and humic substances // *Moscow Univer. Soil Sci. Bul.* 2019. V. 74. № 5. P. 193–198.
<https://doi.org/10.3103/S0147687419050028>
 7. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // *Inter. J. Coal Geol.* 2009. V. 78. P. 135–148.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
 8. Zhang S., Song J., Du Q., Cheng K., Yang F. Analog synthesis of artificial humic substances for efficient removal of mercury // *Chemosphere.* 2020. V. 250. 126606.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126606>
 9. Radaelli M., Scalabrin E., Toscano G., Capodaglio G. High performance size exclusion chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry to study the copper and cadmium complexation with humic acids // *Molecules.* 2019. V. 24 (17). P. 3201.
<https://doi.org/10.3390/molecules24173201>
 10. de Melo B.A.G., Motta F.L., Andrade Santana M.H. Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments // *Mater. Sci. Engin.* 2016. C. 62. P. 967–974.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.001>
 11. Grigorieva E.E. About humic preparations // *Inter. Agricult. J.* 2020. V. 5. P. 43–58.
<https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10210>
 12. ГОСТ 55661-2013 Топливо твердое минеральное. Определение зольности. М.: Стандартиформ, 2014. 29 с.
 13. Xavier D.M., Silva A.S., Santos R.P., Mesko M.F., Costa S.N., Freire V.N., Cavada B.S., Martins J.L. Characterization of the coal humic acids from the Candiota coalfield, Brazil // *Inter. J. Agricult. Sci.* 2012. V. 4 (5). P. 238.
 14. Sarlaki E., Paghaleh A.S., Kianmehr M.H., Vakilian K.A. Chemical, spectral and morphological characterization of humic acids extracted and membrane purified from lignite // *Chem. Technol.* 2020. V. 14 (3). P. 353–361.
<https://doi.org/10.23939/chcht14.03.353>
 15. He Z., Ohno T., Cade-Menun B.J., Erich S.M., Honeycutt W.C. Spectral and chemical characterization of phosphates associated with humic substances // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006. V. 70. P. 1741–1751.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0030>
 16. de la Rosa G., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresdey J.L. Utilization of ICP/OES for the determination of trace metal binding to different humic fractions // *J. Hazard. Mater.* 2003. B. 97. P. 207–218.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00262-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00262-5)

ICP-OES-Analysis for Humic Substance

R. P. Kolmykov

*Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS
 prosp. Sovetskiy 18, Kemerovo 650099, Russia
 E-mail: kolmykoff.roman@yandex.ru*

The possibilities of optical emission spectrometry with inductively coupled plasma (OES-ICP analysis) (in radial plasma observation) of humic preparations (HP) are evaluated, the proposed technique allows quantifying up to 24 elements (As, Al, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Si, S, Sr, Ti, V and Zn). The list of these elements will allow determining the value of such preparations for soil nutrition, and will also help to avoid danger if the content of toxic impurities in them goes beyond their maximum permissible concentrations. In the absence of standard samples with certified contents of the elements to be determined, the correctness of the analysis for the macrocomponent composition is confirmed by comparing the results of gravimetric determination of the ash content of the studied objects with the calculated data obtained when processing the results of OES-ICP analysis. Systematic errors in the determination of trace impurities were minimized by using the method of adding standard solutions (from matrix influences), as well as 6 parallel measurements of samples prepared independently of each other. The correctness of the methodology was also evaluated by using model solutions close to the possible micro-impurity mineral composition of HP using the Student's *t*-test. The results obtained for the isolated fraction of humic acids are compared with the literature data.

Key words: humic substance, humic preparation, elemental analysis, optical emission spectrometry with inductively coupled plasma (OES-ICP).

УДК 63.54:631.417:631.46

АГРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ CO₂ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ. СООБЩЕНИЕ 1. ФАКТОРЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОБНЫМ ЗВЕНОМ АГРОГЕОХИМИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА

© 2023 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*

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 26.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

В обзоре рассмотрено применение агрогеохимических технологий, направленных на восстановление агрогеохимических циклов в сельскохозяйственных экосистемах, прежде всего в микробном звене, регулирующем потоки CO₂. Показаны факторы управления этим микробным звеном при внесении как минеральных, так и органических удобрений. Рассмотрены процессы минерализации органических веществ почвы и методы регулирования сопряженной углерод- и азотминерализующей способности почв. Рассмотрены изменения продуктивности сельскохозяйственных экосистем в условиях повышения концентрации углекислого газа в атмосфере и в почвенном воздухе. Показаны различные агротехнологические приемы, в том числе применение нулевой обработки почвы, органических удобрений различной природы, а также различных мелиорантов, в том числе фосфогипса. На основании многочисленных данных сделан вывод о том, что агроэкосистемы в большинстве случаев являются чистым источником CO₂, а секвестрация происходит только при переводе сельскохозяйственных угодий в залежь. Оценены методы, направленные на снижение потоков CO₂ при использовании удобрений в цикле “производство–внесение”. Показано, что существующая практика внедрения сельскохозяйственных низкоуглеродных технологий (agricultural low carbon technologies – ALCT) пока не может свидетельствовать об их применимости для обеспечения как продовольственной, так и экологической безопасности.

Ключевые слова: агроэкосистемы, потоки CO₂, микробоценозы, регулирующие факторы, удобрения, агрогеохимические технологии

DOI: 10.31857/S0002188123060042, **EDN:** QOFTYT

ВВЕДЕНИЕ

Начало нынешнего века ознаменовалось обострением глобальных изменений природной среды и климата, что привело к нарушениям углеродных и азотных биогеохимических циклов, увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере, утрате биоразнообразия и стабильности экосистемы, ухудшению качества и здоровья почвы [1–10].

Такие экологические нарушения в свою очередь коренным образом изменяют биогеохимические процессы и круговорот химических элементов как на уровне агроэкосистемы в целом, так и на уровне профиля почвы, затрагивая, прежде всего, почвенную биоту. Биогеохимические циклы превращаются в агрогеохимические. Изменения происходят как на макроуровне (корневая система растений, почвенные животные), так и

на уровне сообщества почвенных микроорганизмов, осуществляющих противоположно направленные процессы образования и разложения почвенного органического вещества. Дисбаланс этих процессов приводит к изменению запасов почвенного гумуса и увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу [11]. Возделываемые в агроэкосистемах культуры являются результатом чистой первичной продукции фотосинтеза, которая затем становится источником CO₂ при ее разложении [12, 13].

Органический углерод, оставшийся после микробного разложения чистых первичных продуктов, превращается в образующуюся биомассу, а доля углерода, возвращаемого в пахотную землю, ограничена и не компенсирует затраты углерода в почвенной органике на микробное дыхание при обработке почвы, включая минерализа-

цию. В результате сельское хозяйство становится чистым источником CO_2 [14–16].

В настоящее время широко распространено снижение содержания органического вещества в почвах при их длительном сельскохозяйственном использовании. Это объясняется, во первых, тем что формирование биомассы сельскохозяйственных культур происходит за счет элементов, выделяющихся при минерализации органических веществ, а их восполнение в почвах за счет внесения минеральных удобрений лишь частично компенсирует вынос питательных веществ урожаем. Во-вторых, сбор сельскохозяйственной продукции приводит к почти повсеместному отрицательному балансу углерода в почвах агроэкосистем. Известны также способы восполнения углеродной массы за счет внесения в почву органических удобрений различной природы: навоза, отходов пищевой, деревообрабатывающей и химической промышленности, осадков коммунально-бытовых сточных вод, различных сапропелей и др. Также существует ряд агротехнологий, которые позволяют поддерживать и пополнять запас органического вещества в почвах: минимальная обработка, запашка бобовых и сидератов, различные специализированные севообороты, лесовосстановление [17].

Однако этих методов недостаточно в современных условиях, когда углекислый газ накапливается в атмосфере за счет природных и антропогенных процессов. По некоторым оценкам, поступление углекислого газа в атмосферу с сельскохозяйственных угодий планеты составляет $\approx 10\%$ доли CO_2 , образующейся при сжигании ископаемого топлива [7, 14].

Следовательно, требуется регулирование состава органического вещества в почвах, но характер этого процесса определен далеко не четко на качественном и количественном уровнях, а роль совокупного внесения минеральных и органических удобрений (в том числе “зеленых” удобрений) в формировании поглощающего углерод пула органического вещества почвы не ясна. Нет однозначной количественной параметризации процессов стока и эмиссии CO_2 в системе “почва–растение–атмосфера”, особенно в условиях меняющегося климата. Нет четкого представления и о параметрах биогеохимического цикла углерода в конкретных агроэкосистемах, прежде всего в его микробном звене. Также имеются серьезные нарушения биогеохимических циклов N и C в агроэкосистемах. В то же время известно, что микробная биомасса является ключом к оценке потоков CO_2 и NO_x .

Таким образом, возникает необходимость управления микробными процессами в сельскохозяйственных почвах. Это приобретает особое значение в условиях современного сельского хозяйства, направленного на получение максимального количества продукции, когда роль почвы часто сводится к субстрату, обеспечивающему механическую фиксацию корней растений и регулирующему водно-воздушный режим. Для получения высоких урожаев вносят все возрастающие дозы минеральных удобрений. В таких условиях существенно изменяется микробное звено биогеохимического круговорота основных биогфильных (питательных) элементов, прежде всего углерода и азота по сравнению с естественными параметрами, упрощается микробиоценоз, разрушаются взаимоотношения между разными видами микробов, нарушаются их функции. Нарушается замкнутость биогеохимических циклов, они переходят в агрогеохимические циклы с выбросом газов в атмосферу, в частности, парниковых газов – CO_2 и NO_x [18, 19].

Следовательно, необходимы новые технологические подходы к управлению выбросами CO_2 из агроэкосистем. Одним из таких подходов является разработка природоподобных биогеохимических технологий. Биогеохимический инжиниринг и биогеохимические технологии направлены на восстановление биогеохимических циклов в различных экосистемах, а в условиях современных агроэкосистем уже можно говорить об агрогеохимических технологиях. Необходимо рассмотреть применимость таких технологических приемов для управления потоками CO_2 в сельскохозяйственных системах. Поэтому целью работы было изучение различных факторов, связанных с управлением выбросами CO_2 в агроэкосистемах, и целенаправленного управления почвенным микробиомом с использованием агрогеохимических технологий.

ФАКТОРЫ УПРАВЛЕНИЯ. ВНЕСЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

Управление процессами минерализации органического вещества почвы. Выделение почвами и сток в них CO_2 , а также CH_4 и N_2O (парниковых газов, ПГ) является результатом различных микробиологических процессов, которые в свою очередь зависят от факторов, определяющих условия роста и развития микроорганизмов. Поведение CO_2 (CH_4 и N_2O) может варьироваться в зависимости от типа почвы, ее физико-химических параметров, температуры, влажности и плотности почвы, содержания органического вещества и

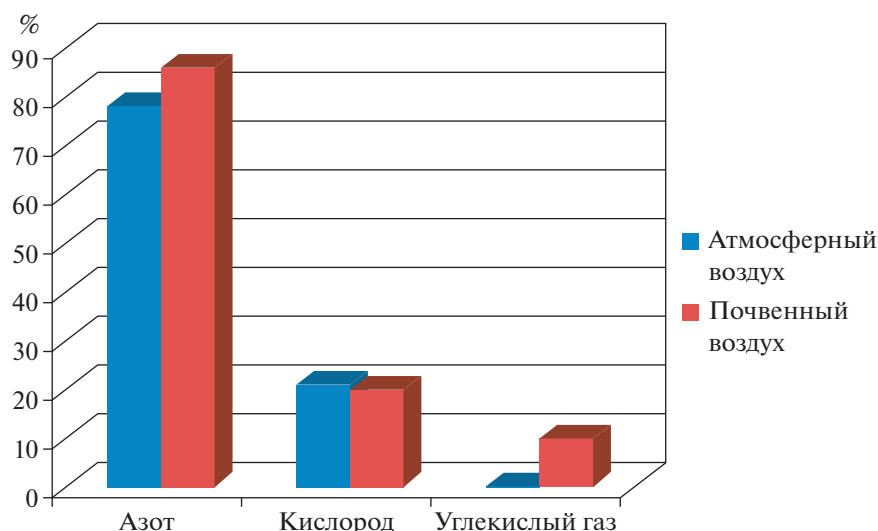


Рис. 1. Основные компоненты атмосферного и почвенного воздуха, % (по данным [20]).

т.п. К основным факторам, влияющим на интенсивность выделения ПГ почвами или их поглощения, относят температуру и влажность почвенного покрова. Содержание углекислого газа в почвенном воздухе в сотни раз больше, чем в атмосферном, а кислорода — на 10–20% меньше (рис. 1).

В пахотных почвах концентрация CO₂ составляет всего 1–2%. При внесении свежих органических удобрений содержание углекислого газа увеличивается до 2, а иногда и до 9–12%. Выброс углекислого газа в атмосферу зависит от почвы, содержания органического вещества, влажности и температуры. Почвенный воздух обеспечивает растения CO₂ за счет его постоянного обмена с атмосферным воздухом. За 1 сут обновляется 10–15% состава почвенного воздуха [21]. В то же время в агроэкосистемах состав почвенного воздуха во многом регулируется органическим веществом.

Было подтверждено, что в случае применения минеральных удобрений в органическом веществе (ОВ) черноземной почвы трудноминерализуемого углерода больше, чем в контрольной почве, но в 1.1–2.2 раза меньше, чем при проведении аналогичного сравнения с использованием навоза. Выявленные особенности структуры активного пула органического вещества могли быть обусловлены как минимум 2-мя причинами. Во-первых, более интенсивной минерализацией и стабилизацией свежего органического вещества в почве агроценоза по сравнению с залежью, во-вторых — недостаточным и неустойчивым возвратом свежего органического вещества в почву,

преобладанием низкокачественного материала с самым разным соотношением C : N в его составе, что препятствует развитию быстрорастущих микроорганизмов и накоплению микробной биомассы в почве. Фактическое содержание углерода микробной биомассы (C_{мб}) в контрольной почве и в почве с применением удобрений составило всего 0.4–0.6% C_{орг} при незначительных различиях между этими вариантами и было в 4.7–7.3 раза меньше, чем в почве залежного земельного участка. Повышенные величины метаболического коэффициента в экспериментальных вариантах почвы и особенно при внесении минеральных удобрений свидетельствуют о неблагоприятном эколого-физиологическом состоянии почвенных микроорганизмов, которые вынуждены потреблять углерод преимущественно из вновь поступивших источников для сохранения содержания органического вещества и его качества. Так как растительные остатки минерализуются до CO₂ быстрее и в большей степени, чем свежий или перепревший навоз, количество органического углерода, накопленного в почве, уменьшается согласно следующему ряду: перепревший навоз > > свежий навоз > солома > зеленая масса растений. При этом биомасса микроорганизмов, выращенных на легко перерабатываемых органических субстратах, быстрее и эффективнее превращается в гуминовые вещества [22, 23]. Органическое вещество почвы, образованное в основном из растительных остатков, содержит больше ароматических соединений и, следовательно, более устойчиво по сравнению с органическим веществом, образованным из навоза. Применение ми-

неральных удобрений по сравнению с внесением навоза либо не вызывало значительного повышения минерализации органического вещества и его потерь, либо количество поступающих в почву растительных остатков в случае с удобрениями превышало потери минерализации.

Количество CO_2 , выделившееся за исследованный период ($n = 48$), достоверно коррелировало с общими потерями почвенного азота и удобрений ($r = 0.578$), а также с содержанием минерального азота в почве ($r = -0.427$). Динамику чистой минерализации азота в почвах с растениями на контрольных участках и при внесении азотных удобрений наиболее точно описывает параболическая функция [24].

УПРАВЛЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ РАСТЕНИЙ И МИКРООРГАНИЗМОВ

Постоянно возрастающая концентрация CO_2 в атмосфере оказывает непосредственное влияние не только на климат Земли, но и на первичную биопродуктивность наземных экосистем. В свою очередь изменение биопродуктивности растений и некоторых их физиологических процессов может приводить к изменению структуры и функционирования как естественных, так и искусственных растительных сообществ, а также повлиять на баланс подповерхностного углерода [14].

Первичная продуктивность растений напрямую зависит от усвоения CO_2 листьями и от всасывания питательных веществ корнями. Повышенная концентрация углекислого газа потенциально может увеличить рост C_3 -растений, но реализация этого потенциала зависит от наличия других питательных веществ и наличия влаги. Данные, полученные в ходе полевых экспериментов, показывают неоднозначную реакцию дикорастущих и сельскохозяйственных видов растений на повышенную концентрацию CO_2 . Тем не менее, в большинстве экспериментов ответная реакция растений на повышенную концентрацию CO_2 была положительной: повышение урожайности составило от 30 до 50%, а продуктивность некоторых древесных пород увеличивалась на 100–300% [25].

В подробном обзоре [25] обобщено более 500 сообщений о влиянии повышенной концентрации CO_2 на биомассу древесных растений. Вариабельность величины эффекта CO_2 рассмотрена во взаимодействии с другими факторами. Общая биомасса и чистая ассимиляция CO_2 древесными культурами значительно увеличились при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере

независимо от условий выращивания. В другом обзоре [26] показано, что в подавляющем большинстве опытов наблюдали увеличение сухой массы (на 100–200%) и длины корней (на 110%) при увеличении концентрации атмосферного CO_2 независимо от климатических условий. Более того, увеличение сухой массы происходило почти полностью за счет роста мелких корней. Тем не менее, имеются противоречивые данные, особенно о соотношении корней и стеблей, объема корней и их длины. Разброс данных может быть вызван условиями эксперимента, т.к. прирост подземной биомассы сильно зависит от поглотительной способности корневой системы, которая в свою очередь определяется объемом почвы на одно растение.

Положительная реакция растений на повышенную концентрацию CO_2 возможна при условии отсутствия дефицита в почвах других основных питательных элементов (азота, фосфора, калия). Несмотря на обилие информации о влиянии повышенной концентрации CO_2 на рост растений, в литературе очень мало сведений о его воздействии на ризосферу и почвенные процессы в целом. Повышенная концентрация CO_2 в атмосфере позволяет увеличить содержание углерода в ризосфере за счет усиления корневых выделений растений, что влияет на численность и активность грибов, бактерий, в том числе и азотфиксирующих видов.

В работе [27] проведено исследование влияния высоких концентраций углекислого газа в атмосфере (400, 800 и 1200 ч./млн) на рост тополя дельтовидного (*Populus deltoides*). Работа выполнена на базе закрытой системы “Биосфера-2” (Аризона, США). Исследования показали, что повышение концентрации углекислого газа в атмосфере можно рассматривать как фактор атмосферного удобрения, способствующий повышению продуктивности растений. В проведенном эксперименте наибольшая общая масса дельтовидного тополя образовалась при увеличении концентрации CO_2 в атмосфере в 2 раза по сравнению с существующей на данный момент. Утроение концентрации CO_2 не вызывало дальнейшего повышения продуктивности растений. Прирост биомассы растений при двукратном увеличении концентрации CO_2 в атмосфере осуществлялся в основном за счет увеличения их надземной части, тогда как при трехкратном увеличении — за счет увеличения доли корней в общей массе растений. Повышение содержания CO_2 в атмосфере с 400 до 800 и 1200 ч./млн усиливало процессы минерали-

зации органических остатков в почвах под деревьями. Интенсивность выбросов в модельном атмосферном воздухе увеличивалась в диапазоне 400, 800 и 1200 ч./млн концентраций CO₂.

Содержание микробной биомассы в почве под влиянием высоких концентраций атмосферного углекислого газа увеличивалось. Наибольшее количество C_{mb} отмечено в случае с утроенной концентрацией CO₂ (75.1 мг/100 г), наименьшее — при нормальной концентрации (53.7 мг/100 г). Повышение концентрации CO₂ в атмосфере сопровождалось снижением эффективности метаболизма почвенных микроорганизмов. Метаболический коэффициент $C-CO_2 : C_{mb}$ составил 2.35, 2.43 и 3.07 соответственно для биомов 400, 800 и 1200 ч./млн.

Современные исследования [28], выполненные с использованием спутниковых данных, показывают увеличение площади листовой поверхности за счет прямых факторов (управление землепользованием со стороны человека) и косвенных факторов (таких как изменение климата, подкормка CO₂, осаждение азота и восстановление после природных нарушений). Среди них главными движущими силами, по-видимому, являются изменение климата и воздействие подкормки CO₂. Тем не менее, согласно новым спутниковым данным (2000–2017 гг.), наблюдается закономерность в озеленении: она поразительно заметна в Китае и Индии и распространяется на пахотные угодья во всем мире. Только на Китай приходится 25% глобального чистого прироста площади листовой поверхности при том, что она занимает только 6.6% глобальной площади растительности. Озеленение в Китае происходит за счет лесов (42%) и пахотных угодий (32%), в Индии — в основном за счет пахотных угодий (82%) с незначительным вкладом лесов (4.4%). Китай разрабатывает амбициозные программы по сохранению и расширению лесов с целью смягчения последствий деградации земель, загрязнения воздуха и изменения климата. С 2000 г. производство продуктов питания в Китае и Индии увеличилось более чем на 35% — в основном за счет увеличения посевных площадей при использовании многократных посевов, чему способствовало использование удобрений и орошение поверхностными и/или грунтовыми водами. Такие результаты свидетельствуют, что данный прямой фактор является ключевым драйвером “озеленения Земли”, процесса, на долю которого приходится более 1/3, возможно и больше наблюдаемого чистого прироста площади зеленого листового покро-

ва. Они подчеркивают необходимость реалистичного представления практики землепользования человеком в моделях Земли как системы.

В исследовании европейских авторов [29] также оценивали факторы, связанные с повышением продуктивности агроэкосистем в условиях увеличения потоков CO₂, в первую очередь за счет сельского хозяйства. Авторы отмечали, что если рассматривать продовольственную безопасность и смягчение последствий изменения климата в качестве основных задач устойчивого развития сельского хозяйства, главной целью является обеспечение приемлемого уровня выбросов парниковых газов (ПГ) в сельскохозяйственном производстве. Описаны эффекты воздействия ПГ. Для оценки воздействия парниковых газов на урожай зерновых в странах ЕС созданы модели данных длительного наблюдения. Исследование сосредоточено на изменении климата, вызванном выбросами ПГ, которые оказывают непосредственное влияние на сельское хозяйство в том, что касается производства зерновых. В связи с этим была выполнена оценка влияния ПГ на производство зерновых в Европейском союзе, за исключением Мальты, в период 2000–2016 гг. Результаты показали положительное влияние выбросов ПГ от сельского хозяйства и потребления удобрений в предыдущем году на производство зерновых в ЕС. Такой результат говорит об обеспечении устойчивости сельского хозяйства, которое производит больше зерновых в условиях роста выбросов ПГ.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наметившаяся устойчивая тенденция к увеличению концентрации CO₂ в атмосфере в результате различных процессов не только не оказывает вредного воздействия на растительный мир Земли, но и способствует увеличению продуктивности его фотосинтеза. Повышенное усвоение углекислого газа растениями при увеличении его концентрации в атмосфере можно рассматривать как дополнительный сток CO₂. Величину этого стока пока трудно оценить, однако можно прогнозировать, что в целом биопродуктивная деятельность на земном шаре возрастет, но вместе с ней, очевидно, увеличится дыхательная активность не только растений, но и почвенных микроорганизмов. На вопрос, будет ли увеличиваться запас углерода в виде продуктов биомы при длительном пребывания в нем углерода, пока нет ответа [14].

УПРАВЛЕНИЕ УГЛЕРОД- И АЗОТМИНЕРАЛИЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ПОЧВЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ МИНЕРАЛЬНЫХ (АЗОТНЫХ, ФОСФОРНЫХ) И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

Несмотря на десятилетия исследований точная оценка микробиологического процесса минерализации углерода и азота остается сложной задачей [6, 9–15]. Показатели минерализации зависят от свойств почвы, количества и качества органических веществ и климатических факторов [30–32]. Например, исследования с использованием индикаторов ^{15}N показывают, что азот, минерализованный из почвенного органического вещества (ПОВ), обычно обеспечивает >50% азота, поглощаемого кукурузой в течение вегетационного периода, несмотря на широкое использование азотных удобрений [33].

Оценивая результаты определения минерализации азота, полученные различными методами, следует подчеркнуть, что наряду с учетом ряда факторов, определяющих минерализацию углерода и азота в почве, не учитывается один из важнейших факторов, а именно влияние на этот процесс вносимых минеральных азотных удобрений. Хотя разработано множество аналитических приемов и методов расчета и определения влияния данного фактора, например, с помощью меченых азотных удобрений, на практике ни один из указанных приемов не был в полной мере реализован ни при оценке эффективности использования азота, ни для диагностики азотного питания или общей минерализации. Поэтому необходимо было разработать достаточно простой, но при этом информативный метод определения азотминерализующей способности почв.

Методологически он основан на следующих подходах. Оценку азотминерализующей способности почвы, которая служит важнейшим критерием степени выраженности агрохимического круговорота азота, можно выполнить методом определения содержания минерализованного азота почвы, эквивалентного по своей доступности азотным удобрениям. Для этого образцы почвы компостируют с увеличением дозы азотных удобрений. Компостирование образцов почвы проводят при оптимальных температурных условиях (18–28°C) и влажности (60% водоудерживающей способности) в течение 4-х нед с набором (4–6) доз азотных удобрений, эквивалентных дозам, запланированным для различных культур. Величина азотминерализующей способности почвы определяется путем нахождения первой производной квадратного уравнения регрессии, описывающего накопление доступного азота (нитра-

тов и обменного аммония) в почве в зависимости от доз внесенных азотных удобрений. Также можно использовать метод решения этого уравнения путем нахождения его корней. Используя математическое выражение зависимости накопления доступного азота в почве при компостировании от доз азотных удобрений, можно оценить азотминерализующую способность почвы, в которую войдет весь потенциально доступный азот почвенного фонда, способный к минерализации в течение прогнозируемого вегетационного периода [34]. Влияние гидротермических условий вегетационного периода учитывают, используя долгосрочные метеорологические прогнозы или долгосрочные средние данные для конкретного региона. Такой учет осуществляется с учетом поправок на скорость накопления доступного азота в почве при компостировании в зависимости от температурно-влажностного режима.

Обоснование предлагаемого метода определения азотминерализующей способности связано с оценкой так называемого “прайминг-эффекта” или величин “экстра”-азота, характеризующих степень повышенной минерализации азотных и углеродистых соединений почвы при внесении азотных удобрений, по состоянию микрофлоры [11, 30–35]. Таким образом, в любой момент времени величина азотминерализующей способности будет пропорциональна величине “экстра”-азота. Содержание “экстра”-азота, обнаруженное в почве в виде доступных соединений азота после компостирования почвы в полиэтиленовых мешках, отражает фактическую способность почвы осуществлять минерализацию органических компонентов азота.

При определении этой величины предложенным способом дается оценка фактической азотминерализующей способности почв, т.е. способности, которая может проявиться в течение следующего прогнозируемого вегетационного периода. В этом его отличие от азотминерализующего потенциала, при котором определяется потенциально минерализованный азот. Поэтому расчетные данные, полученные предложенным методом, будут в основном меньше.

Например, азотминерализующую способность серой лесной почвы оценивали в ходе многофакторного эксперимента. В этом эксперименте изучали воздействие 3-х видов обработки почвы — отвально-плуговую, поверхностно-фрезерную и комбинированную (поверхностное + свободное рыхление) и 3 способа удобрения — без удобрений, оптимальный уровень (60 кг N/га под ячмень и 90 кг N/га под озимую пшеницу) и высокий уровень (120 кг N/га + навоз 20 т/га под яч-

мень и 120 кг N/га + навоз 40 т/га под озимую пшеницу). Величину полевой влагоемкости оценивали для слоев 0–20 см и 20–40 см почвы.

Азотминерализующая способность (АМС) серой лесной почвы в верхнем слое (0–20 см), как правило, была больше, чем в подстилающем слое (20–40 см), достигая 180 кг N/га при совместном внесении органических и минеральных удобрений. Минимальные показатели были отмечены при использовании отвальной вспашки без удобрений – до 10 кг N/га. Необходимо отметить, что внесение высокой дозы азота вместе с навозом смещало максимальный показатель в нижний слой, и наиболее ярко это проявлялось при минимальной обработке почвы.

Изучение типа возделываемой культуры и, соответственно, степени удобрения почвы проводили также на выщелоченной тяжелосуглинистой черноземной почве и дерново-подзолистой супесчаной почве. Величина АМС целинного чернозема была больше, чем целинной дерново-подзолистой почвы. Внесение органических удобрений под технические культуры, такие как картофель и конопля, а также под кукурузу и озимую пшеницу (навоз КРС 40–100 т/га) привело к повышению азотминерализующей способности как чернозема, так и дерново-подзолистой почвы. Возделывание ячменя в севообороте зерновых на черноземе без удобрений сопровождалось снижением способности почвы к минерализации азота в 2 раза по сравнению с целинной (115 и 66 кг N/га). Выращивание многолетних трав, наоборот, увеличивало АМС обоих типов почв, причем в относительном выражении это увеличение было более значительным для дерново-подзолистой почвы [36].

Потенциальную минерализационную способность органического вещества выщелоченного чернозема, а также залежных земель изучали при различных системах удобрения полевых культур, включая внесение возрастающих доз навоза (5 и 10 т/га) и минеральных удобрений (N52P48K50 и N114P96K94). При этом общее производство C-CO₂ почвами (метод мембранных пробоотборников) в ходе эксперимента превышало его эмиссию (метод изоляторов) в 11.6 раза под растениями и в 8 раз в пару при явной приближенной взаимосвязи между этими показателями ($r = 0.730$). При оценке выделения C-CO₂ с помощью обоих методов, было выявлено различие между почвами по содержанию общего и микробного углерода, которое возрастало в присутствии растений и активизировалось при внесении азотных удобрений. Константа скорости минерализации (k , сут⁻¹,

изменялась от 0.005–0.006 при внесении навоза до 0.014–0.019 при дополнительном внесении минеральных удобрений. При этом, несмотря на максимальные запасы потенциально минерализованного углерода, величины константы скорости минерализации в залежи составляли 0.009. Продуцирование и выделение C-CO₂ в динамике коррелировало с нетто-мобилизацией почвенного азота ($r = 0.845$ – 0.976 и $r = 0.905$ – 0.942 соответственно). На единицу чистого подвижного азота в почве производилось 40–80 единиц C-CO₂, а в атмосферу выбрасывалось 4–8 единиц C-CO₂ [22].

Интенсивность выделения CO₂ почвой за длительный период инкубации при постоянных условиях дает представление о доступности углерода для микроорганизмов как источника питания и энергии [37]. В первые 9 сут наибольшая скорость выделения C-CO₂ была характерна для почвы с применением минеральных удобрений и навоза (10 т/га) и достигала 4–5 мг C-CO₂/100 г почвы/сут. Чуть меньшее количество углекислого газа образовалось в почве при внесении только навоза – до 3 мг C-CO₂/100 г почвы/сут. Интенсивность образования C-CO₂ в почве при внесении навоза 5 т/га с минеральными удобрениями также была несколько больше, чем в контрольной почве. В дальнейшем образование углекислого газа происходило с постоянной скоростью, при этом в почве с различными минеральными удобрениями она была меньше, чем в соответствующих субстратах без их внесения. Скорость образования C-CO₂ почвой залежи по сравнению с опытными вариантами была достоверно больше на протяжении всего исследованного периода с постепенным снижением до <1 мг C-CO₂/100 г почвы/сут к концу наблюдений.

Величина общего продуцирования C-CO₂ почвой оцененных образцов за 125 сут эксперимента достигала 200–300 мг C-CO₂/100 г почвы в залежи, в случаях с применением навоза в дозах 5–10 т/га – 60–80 мг C-CO₂/100 г почвы, при совместном внесении навоза и минеральных удобрений снижалась до 40–60 мг C-CO₂/100 г почвы, а при использовании повышенных доз были зафиксированы еще меньшие показатели. Аппроксимируя кривые суммарно произведенного в ходе инкубации CO₂ однокомпонентным уравнением кинетики первого порядка, можно определить содержание потенциально минерализованного углерода ($C_{\text{пм}}$) в черноземе выщелоченном с помощью различных систем удобрения полевых культур [38].

Почва опытных образцов содержала в 2.2–5.2 раза меньше потенциально минерализованного углерода $C_{\text{пм}}$, чем залежь. Агрогенное истощение выщелоченного чернозема потенциально минерализованным углеродом было значительно больше, чем истощение общим органическим углеродом. Доля потенциально минерализованного углерода в почве залежи составила 5.2% $C_{\text{орг}}$, в неудобренной контрольной почве — 1.5%. Внесение органических удобрений один раз каждые 5 лет в дозах 25 и 50 т/га (5 и 10 т/га при севообороте пашни) привело к повышению обеспеченности выщелоченного чернозема $C_{\text{пм}}$ в 1.9 и 2.4 раза соответственно по сравнению с контролем. Доля $C_{\text{пм}}$ в почве этих образцов достигала 2.7 и 3.2% $C_{\text{орг}}$. Внесение минеральных удобрений на фоне навоза вызывало снижение содержания $C_{\text{пм}}$. Особенно низкий уровень доступного $C_{\text{пм}}$ образовался при внесении минеральных удобрений на фоне навоза 10 т/га, и поэтому его доля в общем $C_{\text{орг}}$ была даже меньше контроля [38].

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ АГРОТЕХНОЛОГИЙ И МЕЛИОРАНТОВ

Анализ собственных данных и другой литературы позволяет оценить возможности пахотных почв в том, что касается секвестрации атмосферного CO_2 при использовании современных агротехнологий, основанных на применении минеральных удобрений и минимальной обработке почвы. За счет повышения урожайности и, соответственно, количества растительных остатков эти технологии обеспечивают относительно небольшой абсолютный прирост $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое почвы — до 0.1%. По ориентировочным оценкам, для лесостепных черноземов это не более 10% от количества $C_{\text{орг}}$, потерянного ими после вспашки до достижения равновесного содержания углерода. Есть как минимум 2 причины, не позволяющие восстановить с помощью агротехнологий большую часть органического вещества, утраченного целинными почвами. Первая связана с резким — как минимум в 3 раза — уменьшением поступления растительного вещества в пахотные почвы по сравнению с их целинными аналогами. В результате в первую очередь теряются легкоминерализуемые фракции органического вещества, что наиболее заметно по изменению содержания детрита или мортмассы в почве. Вторая причина недостаточной углерод-секвестрирующей способности пахотных почв связана с их неспособностью прочно закреплять свежесформированные гумусовые вещества, тем самым предохраняя гу-

мусовые вещества от дальнейшей минерализации почвенными микроорганизмами. Показано, что при ежегодном внесении меченых ^{14}C растительных остатков к 5-му году эксперимента увеличение содержания углерода в почве прекращается из-за установления равновесия между процессами минерализации и фиксации меченых соединений ^{14}C в почве. Возможно, способность прочно закреплять свежесформированные гумусовые вещества является характерным свойством целинных (залежных) почв [39].

Также, основываясь на кинетике (**k**) скорости оборота почвенного органического вещества, а также на количественной оценке источников C в почвах различных хронологических последовательностей и парных участков в России и США, получены нелинейные показатели оборота запасов углерода в почве после обработки естественных пастбищ и последующем залесении пахотных земель. Показано, что скорость снижения содержания C в почвах в течение 250 лет после перехода с естественных пастбищ на постоянные пахотные земли составляет 0.010 год^{-1} . В то же время после залесения содержание C в почве происходило быстрее ($k = 0.055 \text{ год}^{-1}$). Этот вклад “древесного” углерода достиг 22 мг $\text{C}/\text{га}$ через 70 лет после посадки деревьев [17].

Следовательно, пашни могут играть существенную роль в секвестрации атмосферного CO_2 только после их перевода в залежь. Однако по понятным причинам такой способ секвестрации CO_2 можно применять в очень ограниченных масштабах, в основном на землях, которые по тем или иным причинам нецелесообразно использовать для производства зерновых культур. Также следует подчеркнуть, что увеличение содержания органического вещества в почве происходит только в течение первых 20–30 лет, а затем этот показатель стабилизируется [40].

Эффективность секвестрации почвенного органического углерода (**ПОУ**) как подходящей технологии с отрицательным уровнем выбросов зависит главным образом от поступления органического углерода растительного происхождения и его распределения в стабилизированных пулах ПОУ. На эти процессы может влиять использование удобрений и тип почвы. Было проведено исследование влияния органического удобрения (компост из птичьего помета), минерального удобрения (фосфорит) и их смеси на перенос органического углерода (**ОУ**) из растения в почву. Добавление компоста из птичьего помета и его смеси с фосфоритом привело к увеличению корневой биомассы и большему переводу корневых

ОУ в активные пулы, чем при внесении одного только фосфорита. Почва, дополненная компостом из птичьего помета, отличалась более высоким содержанием микробной биомассы, чем почва с минеральными удобрениями из-за более высокого содержания доступного органического фосфора. Различия в динамике пулов стабилизированного органического углерода среди почв могут быть связаны с влиянием источников фосфорных удобрений на процессы стабилизации ПОУ. Таким образом, органические и минеральные фосфорные удобрения могут оказывать противоположное воздействие на поступление органического углерода из растения в почву и, в частности, на распределение органического углерода, полученного из корней растений, в лабильные или устойчивые фракции ПОУ [41].

Долговременное поверхностное внесение извести (И) и/или фосфогипса (ФГ) в системах с нулевой обработкой почвы (НО) может улучшить рост растений, а также физиологические и биохимические процессы. Несмотря на наличие множества исследований, посвященных влиянию извести на биомассу и рост растений, до сих пор отсутствует комплексная оценка воздействия этой практики на чистую ассимиляцию CO₂, активность антиоксидантных ферментов и синтез сахарозы. Соответственно, важно изучить влияние долгосрочного поверхностного применения извести и фосфогипса на плодородие почвы и, как следствие, их действие на рост корней, питание растений, фотосинтез, метаболизм углерода и антиоксидантов, а также на выход зерна (ВЗ) кукурузы в засушливых зимних регионах. Сочетание извести с фосфогипсом усиливало эти эффекты, а также увеличивало количество S-SO₄²⁻. Мелиорирующее вещество с известью и фосфогипсом усилило развитие корневой системы на большей глубине и улучшило питание растений кукурузы. Их комбинированное воздействие способствовало повышению концентрации фотосинтетических пигментов и газообмена даже при низкой доступности воды. Более того, была повышена активность рибулозо-1,5-бифосфаткарбоксилазы/оксигеназы, сахарозосинтазы и антиоксидантных ферментов, что позволило снизить окислительный стресс. Такие улучшения физиологических показателей растений кукурузы привели к повышению ВЗ. В целом результаты подтверждают, что комбинирование почвенных мелиорантов является важной стратегией повышения плодородия почвы и обеспечения урожайности в регионах, где во время цикла выращивания случаются периоды засухи. Важно отметить и усиление про-

цесса поглощения углекислого газа (секвестрации). Чистая скорость фотосинтеза была максимальной при обработке известью и фосфогипсом и достигала 30–40 мкмоль С-CO₂/м/с [42].

Для улучшения свойств почвы и повышения урожайности сельскохозяйственных культур можно повторно использовать отходы фосфогипса (ФГ) и отходы водоподготовки (ОВП) в сельскохозяйственных целях. Исследование проводили с целью определения влияния ФГ и ОВП, внесенных в тяжелые глинистые почвы (содержащие более 50% глинистых частиц) в дозах 5 и 10 т/га с рекомендуемым азотным удобрением (АУ), на основные свойства почвы и урожайность кукурузы. Результаты показали, что углерод микробной биомассы почвы (УМБ), выделение CO₂ и активность дегидрогеназы (ДГА) значительно увеличились при добавлении ФГ или ОВП. Применение ФГ с АУ в дозе 10 т/га показало самую высокую микробную активность, доступность питательных веществ в почве, урожайность зерна кукурузы по сравнению с другими видами обработки. Добавление АУ + ФГ в дозах 10 и 5 т/га и АУ + ОВП в дозах 10 и 5 т/га способствовало повышению ДГК в 1.70, 1.60, 1.40 и 1.20 раза соответственно по сравнению с обработкой АУ. Можно сделать вывод, что применение ФГ и ОВП в рекомендуемых дозах внесения поможет улучшить свойства тяжелых глинистых почв. Содержание углерода микробной биомассы в почве менялось от 630 до 915 мкг/г. Полученные данные существенно отличались в зависимости от способа обработки. Содержание УМБ на участках, обработанных ФГ, было больше, чем на участках, обработанных ОВП при тех же дозах. Выделение CO₂ значительно выросло ($p < 0.05$), составив от 200 до 337 мг/100 г. Самый высокий показатель выделения CO₂ был зафиксирован на участках, обработанных АУ + ФГ10, самый низкий – на участках, обработанных АУ. Внесение АУ + ФГ10, АУ + ФГ5, АУ + ОВП10 и АУ + ОВП5 значительно увеличило выделение CO₂ – на 26.3, 17.9, 20.9 и 8.60% соответственно по сравнению с обработкой АУ [43].

Была проведена оценка влияния суперфосфата (СФФ) и фосфогипса (ФГ) на сукцессию бактериальных и грибных сообществ и молекулярных экологических сетей при компостировании. Добавление СФФ и ФГ оказало положительное влияние на видовое многообразие бактерий и насыщенность видами, но негативно сказалось на видовом многообразии грибов и их насыщенности видами. Микробное разнообразие и богатство были больше в случае с фосфогипсом, чем с су-

Таблица 1. Суммарные и удельные выбросы парниковых газов 1 и 2 степеней охвата (по данным ПАО “ФосАгро” в целом за год (2018–2021 гг.) и плановые на 2028 г., тыс. т CO₂-экв.)

Показатель	Годы				
	2018	2019	2020	2021	2028
Валовые выбросы парниковых газов: степень охвата 1, тыс. т	4855.3	4656.3	4739.4	4675.8	4175.5
Валовые выбросы парниковых газов: степень охвата 2, тыс. т	924.1	967.0	978.3	893.3	794.7
Удельные выбросы парниковых газов, степень охвата 1, кг/т	158.0	143.3	140.1	132.7	109.1

перфосфатом. Неметрический многомерный масштабный анализ позволил четко разделить СФФ и ФГ от контрольной обработки без добавок. Преобладающими родами оказались *Turicibacter*, *Bacillus*, *norank_o_SBR1031*, *Thermobifida*, *norank_f_Limnochordaceae*, *Truepera*, *Thermopolyspora*, *Mycothermus*, *Dipodascus*, *Thermomyces* и *Unclassified_p_Ascomycota*. При всех видах обработки основные виды бактерий четко различались на более поздних стадиях компостирования — термофильной, стадии охлаждения и созревания, тогда как основные виды грибов значительно отличались на термофильной стадии. Изменения в преобладающих видах микроорганизмов при внесении СФФ и ФГ могли воспрепятствовать или способствовать деградации органического вещества на различных стадиях компостирования. Добавление СФФ и ФГ привело к образованию более сложных бактериальных сетей и менее сложных грибковых сетей, причем СФФ оказывал более неблагоприятное воздействие на грибковые сети, чем ФГ. СФФ и ФГ потенциально могли изменить закономерности совместной встречаемости для бактериального и грибкового сообществ путем изменения наиболее влиятельных видов. СФФ и ФГ изменили состав и последовательность микробного сообщества, воздействуя на различные физико-химические свойства на разных стадиях компостирования, где основным объясняющим фактором была величина pH. В целом это формирует новое представление о влиянии СФФ и ФГ на микробное сообщество и его взаимодействия с другими сообществами в процессе компостирования [44].

“ЗЕЛЕНое” СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ЕГО ДОСТИЖИМОСТЬ. ПРОИЗВОДСТВО УДОБРЕНИЙ

При производстве минеральных удобрений неизбежны выбросы различных газов, прежде всего CO₂. Поскольку производство находится в

начале цепи “удобрение—урожай”, важно оценивать этот процесс применительно к конкретному производителю. Например, компания ПАО “Фосагро”, один из ведущих мировых производителей удобрений, большое внимание уделяет производству продукции, направленной на минимизацию как удельных, так и суммарных выбросов CO₂ в атмосферу (табл. 1). Расчет удельных выбросов парниковых газов осуществляется путем арифметического деления величин валовых выбросов (степень охвата 1) на величины показателей выпускаемой продукции и полуфабрикатов. Для достижения целевых уровней выбросов была принята программа, задачей которой является снижение фактических уровней к 2028 г. Целевая величина удельных выбросов парниковых газов (степень охвата 1) составит 109.1 кг CO₂-экв./т, что на 30.9% меньше базового уровня 2018 г.

Для выбросов степени охвата 1 (прямые выбросы) и 2 (косвенные выбросы) устанавливают научно обоснованные целевые показатели в соответствии с международными требованиями. Суммарная величина научно обоснованных целевых уровней выбросов парниковых газов 1 и 2 степеней охвата в 2028 г. составит (степень охвата 1 — 4175.6 и степень охвата 2 — 794.7) в общей сложности 5134898 т CO₂-экв., что на 14% (или на 835914 т CO₂-экв.) меньше базового уровня [45, 46].

При этом валовые выбросы ПАО “Фосагро” по степеням охвата 1, 2 в 2021 г. составили 5569.1 тыс. т CO₂-экв. Как отмечалось, промышленные выбросы на территории России значительно меньше выбросов CO₂ из почв. Согласно оценке почвенного дыхания в России, на долю почвенного покрова России приходится около 9 млрд т от общего объема выбросов CO₂ за вегетационный период [47]. Более поздние оценки [15] показали, что в 1990–2016 гг. пахотные земли в России представляли собой чистый источник C-CO₂, обеспечивая 21–27 (в среднем 24.5) млн т C-CO₂/год,



Рис. 2. Судьба сельскохозяйственной продукции [15].

или ≈ 95 млн т CO₂ по состоянию на текущий момент.

В последние годы в литературе наметилась тенденция оценивать весь жизненный цикл продукта, включая его “углеродный след”. В то же время ряд компаний, производящих минеральные удобрения, объявили о создании производственных мощностей по выпуску полностью “зеленых” удобрений. Предполагалось, что вся энергия, используемая в этом производственном процессе, будет получена из возобновляемых источников энергии. Однако энергетический кризис привел к существенной корректировке таких планов. Поэтому представляется логичным показать сохранившиеся планы отдельных компаний, например, ПАО “Фосагро”, относительно сокращения выбросов CO₂. Наряду с экологическими последствиями, это также будет способствовать энергосбережению.

Аналогичные исследования были проведены в ряде других регионов, в частности, в различных провинциях Китая. Показано, что экономический рост, финансовые возможности и энергоемкость оказывают обратное U-образное нелинейное влияние на выбросы CO₂. В то же время механизмы влияния этих 3-х влияющих факторов различны, и соответствующее государственное регулирование должно быть адаптировано к этим параметрам. Например, влияние урбанизации на выбросы CO₂ показывает мягкую “М-образную” закономерность, и существует обратная “N-образная” нелинейная зависимость между открытостью торговли и выбросами CO₂. Следовательно, природоохранные нормативы должны учитывать

дифференцированную политику сокращения выбросов на разных этапах [48, 49].

ВЫРАЩИВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Особенностью сельскохозяйственного производства является то, что вся производимая продукция представляет собой чистые первичные продукты фотосинтеза (ЧПП), которые быстро утилизируются и становятся источником CO₂ (рис. 2).

Органический углерод, оставшийся после микробного разложения ЧПП, переходит в категорию продуктов экосистемы (истинный прирост фитомассы). Истинный прирост фитомассы является трудно определяемой величиной в условиях сельскохозяйственного производства. В современном агропромышленном комплексе преобладают однонаправленные потоки использования агрогеохимических веществ. Собранный урожай (ЧПП) перерабатывают, используют в пищу, на корм животным или как сырье для промышленности. Отходы производства (за исключением навоза) практически не возвращаются на поля и в почву. Доля органического углерода, возвращаемого обратно на поля с навозом, весьма ограничена и не компенсирует затраты углерода органического вещества почвы на микробное дыхание в процессе обработки почвы. В агроэкосистемах поступление в почвы “чистых продуктов фотосинтеза” очень мало, они практически не компенсируют расход углерода в продуктах биомы на минерализацию. В результате сельскохоз-

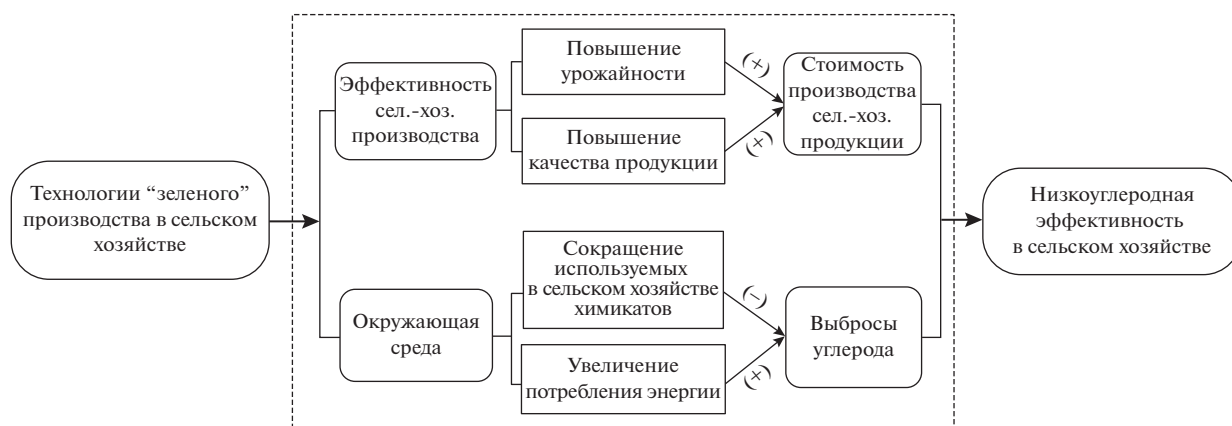


Рис. 3. Пути от экологически чистых ("зеленых") сельскохозяйственных технологий производства к "низкоуглеродной" эффективности [51].

ственное производство является чистым источником CO_2 [15].

Небольшие изменения в больших запасах почвенного органического углерода (ПОУ) могут серьезно сказаться на том, какое воздействие оказывает сельское хозяйство на климат. На основе информации шведской программы мониторинга почв в сочетании с данными переписи ферм были проанализированы концентрации ПОУ и изменения запасов ПОУ на молочных фермах за 10 лет по сравнению с другими типами ферм, а также была проведена оценка влияния этих изменений на "углеродный след". Данные мониторинга почв включали пробы верхнего слоя почвы, полученные во время 2-х обследований на 159 молочных фермах, 86 мясных фермах, 318 пахотных фермах и 13 свинофермах, взятые в одних и тех же местах в 2001–2007 и 2011–2017 гг. Концентрации ПОУ на молочных фермах (3.0%) были значительно больше, чем в земледельческих хозяйствах (2.3%) и на свинофермах (2.4%), но не значительно отличались от показателей ферм по выращиванию крупного рогатого скота (3.1%). Концентрация ПОУ коррелировала с долей угодий в масштабах фермы. Запасы ПОУ в верхних 20 см почвы значительно увеличились на молочных фермах, фермах по выращиванию КРС и земледельческих фермах на 0.38, 0.14 и 0.21 мг С/га/год, соответственно в период с 2001 по 2007 г. и с 2011 по 2017 г. Для молочных ферм это соответствует 1.4 мг CO_2 /га и примерно 0.22 кг CO_2 /кг энергетически скорректированного молока, а это свидетельствует о том, что изменения ПОУ могут иметь существенное влияние на "углеродный след" молока [50].

ТЕХНОЛОГИИ "ЗЕЛЕННОГО" ПРОИЗВОДСТВА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Пути от экологически чистых ("зеленых") сельскохозяйственных технологий производства к "низкоуглеродной" эффективности показаны на рис. 3. Все большее внимание уделяется влиянию экологически чистых ("зеленых") технологий сельскохозяйственного производства (ЗТСП) на продуктивность сельского хозяйства и окружающую среду. На основании данных длительного наблюдения за сельскохозяйственным производством материкового Китая с 2000 по 2017 г. проводили исследование, задачей которого было выяснить, как темпы внедрения ЗТСП могут повлиять на повышение низкоуглеродной эффективности при использовании модели случайного воздействия Тобита [52]. Обнаружили, что уровень внедрения ЗТСП в среднем составляет менее 20%, причем сосредоточена эта практика на северо-востоке и северо-западе материкового Китая. В период с 2000 по 2017 г. отмечали тенденцию к увеличению суммарного объема выбросов углерода в сельском хозяйстве и к снижению низкоуглеродной эффективности. Глубокая обработка почвы с внесением удобрений приводила к увеличению выбросов углерода на национальном и региональном уровнях. Более того, водосберегающее орошение, механизированная глубокая вспашка и скарификация, а также беспашотный посев препятствовали внедрению низкоуглеродных эффективных технологий на национальном и региональном уровнях.

При этом установлено, что внедрение данных технологий имело не только экономическую, но и социальную составляющую. Например, была проведена оценка на уровне 1115 рисоводческих хозяйств субъективного восприятия изменений

климата фермерами, внедрения низкоуглеродных сельскохозяйственных технологий (СХНТ) и решающих факторов, определяющих адаптацию выращивающих рис фермеров к изменению климата в бассейне р. Янцзы (центральный Китай). Результаты показали, что большинство фермеров, выращивающих рис, полностью согласны с тем, что в прошлом году наблюдали изменение местных погодных условий 52.74% респондентов и нерегулярный режим выпадения осадков — 52.56%. Кроме того, более 2/3 респондентов считали, что сельскохозяйственное производство способствует изменчивости климата (26.73% полностью согласны, 40.54% согласны с этим утверждением). В том, что касается интенсивности внедрения СХНТ, установлено, что ≈96% выращивающих рис фермеров внедрили как минимум одну низкоуглеродную технологию. Важно отметить, что восприятие фермерами изменения климата положительно связано с адаптацией к изменению климата. К другим важным показателям адаптации к изменению климата относится многолетний опыт, доступ к сельскохозяйственному образованию через службы распространения знаний, обмен технической информацией между фермерами и доступ к мобильным сетям и почтовым службам [53].

Более того, возникала необходимость адаптировать низкоуглеродные сельскохозяйственные технологии и меры по управлению сельским хозяйством к местным условиям с учетом различных географических, климатических и социально-экономических особенностей развития, а также сформировать регионально дифференцированную систему низкоуглеродных сельскохозяйственных технологий и мер управления. Окончательный перечень низкоуглеродных технологий и мер управления высокой продуктивностью производства углерода в сельском хозяйстве может служить ориентиром для принятия решений при разработке системы технологий сокращения выбросов углерода в сельском хозяйстве и планирования развития низкоуглеродного сельского хозяйства [54–56].

“Зеленое” развитие сельского хозяйства становится все более важной стратегией и привлекает значительное внимание во всем мире. Учитывая проблемы, связанные с агроэкосистемой и окружающей средой, последние разработки в области биотехнологий предлагают более надежный подход к обеспечению продовольственной безопасности для будущих поколений, а также к решению сложных экологических проблем. Перспективной стратегией противодействия потерям органического вещества сельскохозяйственными почвами является использование компоста из зе-

ленных и древесных остатков. Системы органического земледелия могут предоставить полезные решения текущих проблем, влияющих на микробиом почвы. Использование “зеленых” удобрений способствует устойчивому управлению почвой и питательными веществами в сельском хозяйстве, однако невозможно точно определить реакцию почвенных микробных сообществ на разные способы удобрения в региональном масштабе [57–72].

Если говорить о низкоуглеродных технологиях, одним из устойчивых и эффективных подходов к переработке сельскохозяйственных отходов (СО) в сельском хозяйстве является компостирование. Тем не менее традиционный процесс компостирования занимает много времени, а произведенный компост обладает низким содержанием азота по сравнению с химическими азотными удобрениями. По этой причине требуется провести всестороннее исследование, чтобы усовершенствовать процесс компостирования и повысить содержание азота в органических мелиорантах. Работа [68] направлена на изучение положительного влияния комплексного применения биоугля и специфических микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода и азота, на процесс компостирования и качество компостированных продуктов. В стремлении заменить химические азотные удобрения биоорганическими необходимо поднять вопрос эффективности комбинированного применения компоста, биоугля и азотфиксирующих бактерий в системах сельскохозяйственного производства. Понимание умной интеграции СО и действия микроорганизмов в сельском хозяйстве могло бы решить основные сельскохозяйственные и экологические проблемы, связанные с антропогенными потоками C-CO₂ и N-NO_x [70].

С годами возросло значение органического земледелия для обеспечения продовольственной безопасности при минимальном ущербе для экосистемы. Помимо экологических преимуществ у органического земледелия есть и постоянная проблема — неудовлетворительный урожай. Возможное решение может строиться на микробиоме почвы, который играет решающую роль в почвенной системе [71, 72].

Таким образом, можно выращивать сельскохозяйственные культуры без деградации почв, одновременно способствуя как надземной урожайности, так и потокам углерода под землей. Анализ условий, в которых растения производят дополнительный углерод, может способствовать оптимизации методов ведения сельского хозяйства, чтобы обеспечить как производство растениеводческой продукции, так и восстановление здоро-

вья почв [73]. Мы должны учиться у природы тому, как управлять доступностью азота, фосфора и/или воды, чтобы обеспечить непрерывный поток растворимого углерода под землей для поддержки почвенных микроорганизмов [74].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный в данном обзоре анализ систем управления микробиомом в агроэкосистемах может приблизить к пониманию агрогеохимического круговорота углерода и азота в сельском хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев Д.Г., Добровольская Т.Г., Бабьева И.П., Чернов И.М. Развитие представлений о структуре микробных сообществ почв // Почвоведение. 1999. № 1. С. 134–144.
2. Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.Б., Воронин П.Ю. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
3. Семенов А.М., Семенов В.М., Ван Бругген А.Х.К. Диагностика здоровья и качества почвы // Агрохимия. 2011. № 12. С. 4–20.
4. Smith K.A., Ball T., Conen F., Dobbie K.E., Massheder J., Rey A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: Interactions of soil physical factors and biological processes // Europ. J. Soil Sci. 2003. V. 54. P. 779–791.
5. Кудяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия, 2019. № 12. С. 3–15. <https://doi.org/10.1134/S000218811912007X>
6. Mueller N.D., Gerber J.S., Johnston M., Ray D.K., Ramankutty N., Foley J.A. Closing yield gaps through nutrient and water management // Nature. 2012. V. 490. P. 254–257.
7. Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M., Peters G.P., Ciais P., Friedlingstein P. Global carbon budget 2014 // Earth Syst. Sci. Data Discuss. 2014. V. 7. С. 521–610.
8. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. V. 133. P. 461–466.
9. Urdardi M., Below F.E., Castellano M.J., Eagle A.J., Giller K.E., Ladha J.K. A research road map for responsible use of agricultural nitrogen // Front. Sustain. Food Syst. 2021. V. 5 / 660155. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.660155>
10. Башкин В.Н., Галиулина Р.А. Повышение эффективности использования азота: проблемы и пути решения. Сообщение. 2. Биологические подходы // Агрохимия. 2022. № 9. С. 97–110. <https://doi.org/10.31857/S0002188122090034>
11. Благодатская Е.В., Семенов В.М., Якушев А.В. Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Товарищ-во научн. изд. КМК, 2016. 243 с.
12. Заварзин Г.А., Кудяров В.Н. Почва как основной источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестн. РАН. 2006. № 1. С. 14–29.
13. Кудяров В.Н. Роль почв в круговороте углерода // Почвоведение. 2005. № 8. С. 915–923.
14. Кудяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и способность почв России к поглощению углерода // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060.
15. Кудяров В.Н. Почвенное дыхание и биогенный сток углекислого газа на территории России: аналитический обзор // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658.
16. Курганова И.Н., Кудяров В.Н. Экосистемы России и глобальный углеродный бюджет // Наука в России. 2012. № 5. С. 25–32.
17. Hernandez-Ramirez G., Sauer T.J., Chendev Y.G., Genadiev A.N. Nonlinear turnover rates of soil carbon following cultivation of native grasslands and subsequent afforestation of croplands // Soil. 2021. V. 7. P. 415–431.
18. Bashkin V.N. Modern biogeochemistry: Environmental risk assessment. 2d ed. Dordrecht: Springer Publishers, 2006. P. 444.
19. Bashkin V.N. Modern biogeochemistry: Environmental risk assessment. 2d ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. P. 268.
20. Околенова А.А. Экологические принципы сохранения почвенного покрова. Волгоград: РПК “Политехник”, 2006. С. 96.
21. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами // Экол. пробл. Антропогенная трансформация природной среды. 2021. № 1. С. 6–34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
22. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Розанова Л.Н., Кудяров В.Н. Предуцирование почвой CO₂ и его эмиссия при минерализации азотсодержащих компонентов // Почвоведение. 1995. № 10. С. 79–85
23. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // Агрохимия. 2020. № 6. С. 78–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060101>
24. Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Ходжаева А.К., Иванникова Л.А., Семенов В.М. Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разложении растительных остатков // Агрохимия. 2003. № 10. С. 3–12.
25. Curtis P.S., Wang X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology // Oecologia. 1998. V. 113. P. 299–313.
26. Rogers H.H., Peterson C.M., McCrimmon J.N., Cure J.D. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide // Plant Cell Environ. 1992. V. 15. P. 749–752.
27. Kudayarov V.N., Biel K., Blagodatsky S.A., Semenov V.M., Dem'yanova E.G., Dorodnikov M.V. Fertilizing effect of the increasing CO₂ concentration in the atmosphere // Euras. Soil Sci. 2006. V. 39. P. 6–14.
28. Chen C., Park T., Wang X., Piao S., Xu B., Chaturvedi R.K. China and India lead in greening of the world through land-use management // Nat. Sustain. 2019. V. 2. P. 122–129.

29. Simionescu M., Bilan Y., Gędek S., Streimikiene D. The effects of greenhouse gas emissions on cereal production in the European Union // Sustainability. 2019. V. 11. P. 3433.
30. Liu Y., Wang C., He N., Wen X., Gao Y., Li S. A global synthesis of the rate and temperature sensitivity of soil nitrogen mineralization: Latitudinal patterns and mechanisms // Glob. Chang. Biol. 2017. V. 23. P. 455–464.
31. Miller K.S., Geisseler D. Temperature sensitivity of nitrogen mineralization in agricultural soils // Biol. Fertil. Soils. 2018. V. 54. P. 853–860.
32. Miller K., Aegerter B.J., Clark N.E., Leinfelder-Miles M., Miyao E.M., Smith R. Relationship between soil properties and nitrogen mineralization in undisturbed soil cores from California agroecosystems // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2019. V. 50. P. 77–92.
33. Gardner J.B., Drinkwater L.E. The fate of nitrogen in grain cropping systems: A meta-analysis of ¹⁵N field experiments // Ecol. Appl. 2009. V. 19. P. 2167–2184.
34. Башкин В.Н. Увеличение эффективности использования азота: оценка азотминерализующей способности почв // Рос. сел.-хоз. наука. 2022. № 3. С. 45–50.
35. Bashkin V.N. Increasing the efficiency of nitrogen use: Assessing the nitrogen-mineralizing capability of soils // Rus. Agric. Sci. 2022. V. 48. P. 283–289.
36. Башкин В.Н. Оценка величин азотминерализующей способности в различных почвенно-экологических регионах // Использование и охрана природн. ресурсов в России. 2022. № 3. С. 117–122.
37. Кудеяров В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. С. 278.
38. Кузнецов В.Б., Иванникова Л.А., Семин В.Ю., Надежкин С.М., Семенов В.М. Влияние длительного применения удобрений на биологическое качество органического вещества почвы выщелоченного чернозема // Агрохимия. 2007. № 11. С. 21–31.
39. Шарков И.Н., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // Почва и окружающая среда. 2022. Т. 5 (2). С. 175. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175>
40. Курганова И.Н., Телеснина И.М., Лопес де Гереню В.О., Личко В.И., Овсепян Л.А. Изменения запасов углерода, микробной и ферментативной реактивности агродерно-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2022. № 7. С. 825–843. <https://doi.org/10.31857/S003189X22070073>
41. Poblete-Grant P., Cartes P., Pontigo S., Biron P., Mora M.D., Rumpel C. Phosphorus fertiliser source determines the allocation of root-derived organic carbon to soil organic matter fractions // Soil Biol. Biochem. 2022. V. 167. P. 108614.
42. Bossolani J.W., Cruscio C.A., Garcia A., Moretti L.G., Portugal J.R., Rodrigues V.A. Long-term lime and phosphogypsum amended-soils alleviates the field drought effects on carbon and antioxidative metabolism of maize by improving soil fertility and root growth // Front Plant Sci. 2021. V. 12. P. 650296.
43. Mahmoud E., Ghoneim A., El Baroudy A., Abd El-Kader N., Aldhumri S.A., Othman S. Effects of phosphogypsum and water treatment residual application on key chemical and biological properties of clay soil and maize yield // Soil Use Manag. 2021. V. 37. P. 494–503.
44. Lei L., Gu J., Wang X., Song Z., Wang J., Yu J. Microbial succession and molecular ecological networks response to the addition of superphosphate and phosphogypsum during swine manure composting // J. Environ. Manag. 2021. V. 279. P. 111560.
45. Раскрытие компанией “ФосАгро” информации, связанной с изменением климата. Отчет ПАО “ФосАгро” за 2020 год. 2021. С. 43. Доступно: www.phosagro.ru
46. Интегрированный годовой отчет ПАО “ФосАгро” за 2021 год, 2022. С. 360. Доступно: www.phosagro.ru
47. Кудеяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф. Оценка дыхания почв в России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 33–42.
48. Xu B., Xu R. Assessing the carbon intensity of the heavy industry in China: Using a nonparametric econometric model // Environ. Impact Assess. Rev. 2023. V. 98. P. 106925.
49. Xu B., Lin B. Investigating drivers of CO₂ emission in China’s heavy industry: A quantile regression analysis // Energy. 2020. V. 206. P. 118159.
50. Henryson K., Meurer K.H., Bolinder M.A., Kätterer T., Tidåker P. Higher carbon sequestration on Swedish dairy farms compared with other farm types as revealed by national soil inventories // Carbon Manag. 2022. V. 13. P. 266–278.
51. He P., Zhang J., Li W. The role of agricultural green production technologies in improving low-carbon efficiency in China: Necessary but not effective // J. Environ. Manag. 2021. V. 293. P. 112837.
52. Yang X., Zhou X., Deng X. Modeling farmers’ adoption of low-carbon agricultural technology in Jiangnan Plain, China: An examination of the theory of planned behavior // Technol. Forecast. Soc. Change. 2022. V. 180. P. 121726.
53. Li W., Ruiz-Menjivar J., Zhang L., Zhang J. Climate change perceptions and the adoption of low-carbon agricultural technologies: Evidence from rice production systems in the Yangtze River Basin // Sci. Total. Environ. 2021. V. 759. P. 143554.
54. Xu B., Lin B. Factors affecting CO₂ emissions in China’s agriculture sector: Evidence from geographically weighted regression model // Energy Policy. 2017. V. 106. P. 404–414.
55. Xu B., Xu R. Assessing the role of environmental regulations in improving energy efficiency and reducing CO₂ emissions: Evidence from the logistics industry // Environ. Impact Assess. Rev. 2022. V. 96. P. 106831.
56. Xu B., Chen W., Zhang G., Wang J., Ping W., Luo L. How to achieve green growth in China’s agricultural sector // J. Clean. Prod. 2020. V. 271. P. 122770.
57. Naher U.A., Biswas J.C., Maniruzzaman M., Khan F.H., Sarkar M.I., Jahan A. Bio-organic fertilizer: A green technology to reduce synthetic N and P fertilizer for rice production // Front Plant Sci. 2021. V. 12. P. 602052.
58. dos Santos Nascimento G., de Souza T.A., da Silva L.J., Santos D. Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-east-

- ern Brazil // *J. Soils Sediments*. 2021. V. 21. P. 2203–2211.
59. Singh J.S., Kumar A., Rai A.N., Singh D.P. Cyanobacteria: A precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability // *Front Microbiol*. 2016. V. 7. P. 529.
 60. Singh N., Agarwal S., Jain A., Khan S. 3-Dimensional cross linked hydrophilic polymeric network “hydrogels”: An agriculture boom // *Agric. Water Manag.* 2021. V. 253. P. 106939.
 61. Pizzeghello D., Bellin L., Nardi S., Francioso O., Squarini A., Concheri G. Wood-based compost affects soil fertility and the content of available forms of nutrients in vineyard and field-scale agroecosystems // *Agronomy*. 2021. V. 11. P. 518.
 62. Songjuan G.A., Weidong C.A., Guopeng Z.H. Bacterial communities in paddy soils changed by milk vetch as green manure: A study conducted across six provinces in South China // *Pedosphere*. 2021. V. 31. P. 521–530.
 63. Toma Y., Takechi Y., Inoue A., Nakaya N., Hosoya K., Yamashita Y. Early mid-season drainage can mitigate greenhouse gas emission from organic rice farming with green manure application // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2021. V. 67. P. 482–492.
 64. Ferrara R.M., Carozzi M., Decuq C., Loubet B., Finco A., Marzuoli R. Ammonia, nitrous oxide, carbon dioxide, and water vapor fluxes after green manuring of faba bean under Mediterranean climate // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2021. V. 315. P. 107439.
 65. Song H.J., Lee J.H., Canatoy R.C., Lee J.G., Kim P.J. Strong mitigation of greenhouse gas emission impact via aerobic short pre-digestion of green manure amended soils during rice cropping // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 761. P. 143193.
 66. Mao H., Zhou L., Ying R., Pan D. Time Preferences and green agricultural technology adoption: Field evidence from rice farmers in China // *Land Use Policy*. 2021. V. 109. P. 105627.
 67. Sánchez-Monedero M.A., Cayuela M.L., Sánchez-García M., Vandecasteele B., D'Hose T., López G. Agro-nomic evaluation of biochar, compost and biochar-blended compost across different cropping systems: Perspective from the European project FERTIPLUS // *Agronomy*. 2019. V. 9. P. 225.
 68. Fellet G., Pilotto L., Marchiol L., Braidot E. Tools for nano-enabled agriculture: Fertilizers based on calcium phosphate, silicon, and chitosan nanostructures // *Agronomy*. 2021. V. 11. P. 1239.
 69. Peltoniemi K., Velmala S., Fritze H., Lemola R., Pennanen T. Long-term impacts of organic and conventional farming on the soil microbiome in boreal arable soil // *Eur. J. Soil Biol.* 2021. V. 104. P. 103314.
 70. Harindintwali J.D., Zhou J., Muhoza B., Wang F., Herzberger A., Yu X. Integrated ecos-strategies towards sustainable carbon and nitrogen cycling in agriculture // *J. Environ. Manag.* 2021. V. 293. P. 112856.
 71. Durrer A., Gumiere T., Zagatto M.R., Feiler H.P., Silva A.M., Longaresi R.H. Organic farming practices change the soil bacteria community, improving soil quality and maize crop yields // *Peer J*. 2021. V. 9. P. e11985.
 72. Liu Z., Rong Q., Zhou W., Liang G. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil // *PloS One*. 2017. V. 12. P. e0172767.
 73. Prescott C.E., Rui Y., Cotrufo M.F., Grayston S.J. Managing plant surplus carbon to generate soil organic matter in regenerative agriculture // *J. Soil Water Conserv.* 2021. V. 76. P. 99A–104A.
 74. Bashkin V., Alekseev A., Levin B., Mescherova E. Biogeochemical technologies for managing CO₂ flows in agroecosystems // *Adv. Environ. Eng. Res.* 2023. V. 4 (1). P. 012.
<https://doi.org/10.21926/aeer.2301012>

Agrogeochemical Technologies for Managing CO₂ Flows in Agroecosystems.

Message 1. Management Factors of the Microbial Link of the Agrogeochemical Cycle

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*

The review considers the application of agrogeochemical technologies aimed at restoring agrogeochemical cycles in agricultural ecosystems, primarily in the microbial link regulating CO₂ flows. The factors of management of this microbial link in the application of both mineral and organic fertilizers are shown. The processes of mineralization of soil organic substances and methods of regulation of the conjugate carbon- and nitrogen-mineralizing ability of soils are considered. Changes in the productivity of agricultural ecosystems under conditions of increasing the concentration of carbon dioxide in the atmosphere and in the soil air are considered. Various agrotechnological techniques are shown, including the use of zero tillage, organic fertilizers of various nature, as well as various meliorants, including phosphogypsum. Based on numerous data, it is concluded that agroecosystems in most cases are a pure source of CO₂, and sequestration occurs only when agricultural land is transferred to fallow lands. Methods aimed at reducing CO₂ fluxes when using fertilizers in the “production–application” cycle are evaluated. It is shown that the existing practice of introducing agricultural low carbon technologies (agricultural low carbon technologies – ALCT) cannot yet indicate their applicability to ensure both food and environmental safety.

Key words: agroecosystems, CO₂ fluxes, microbocenoses, regulatory factors, fertilizers, agrogeochemical technologies.