

ISSN 0002-1881

Январь 2023

Номер 1

АГРОХИМИЯ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы и продуктивности зернотравяного севооборота в зависимости от баланса питательных веществ

А. Н. Налиухин, А. В. Ерегин, Д. В. Демидов, Ю. Е. Гусева, А. А. Хрунов 3

Плодородие почв

Изменение содержания подвижных форм азота в серых лесных почвах ополья под влиянием ландшафтных особенностей агротехнологий

В. В. Окорков, И. М. Шукин, Л. А. Окоркова, В. И. Шукина, А. А. Козлов 13

Удобрения

Повышение окупаемости азотных подкормок озимой пшеницы при применении оригинальных методов расчета их оптимальных доз

Ю. Ф. Осипов, А. А. Новикова 25

Методика оценки отзывчивости гибридов кукурузы на азотное удобрение

И. Н. Ивашенко, В. Н. Багринцева 33

Регуляторы роста растений

Влияние салициловой и янтарной кислот на показатели роста и фотосинтеза и содержание хлорофилла в растениях пшеницы, выращенных в условиях водного дефицита

А. В. Якунина, Ю. В. Сеницына 39

Действие штаммов бактерий с разной способностью к синтезу ауксинов и цитокининов на рост и водный обмен растений пшеницы

Е. В. Мартыненко, Т. Н. Архипова, З. А. Ахтямова, Л. Ю. Кузьмина 49

Роль и эффективность применения ретардантов в технологии выращивания табака

Т. В. Плотникова, С. В. Гвоздецкая 57

Пестициды

Методические рекомендации по контролю за резистентностью обыкновенной полевки (*Microtus arvalis* Pall) к антикоагулянтным родентицидам

А. А. Яковлев 66

Агрэкология

Химический состав растений яровой пшеницы на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, известкованной кальцийсодержащими отходами промышленности. Эмпирические модели транслокации макро- и микроэлементов в вегетативные и генеративные органы растений

А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, А. О. Ковлева, В. М. Буре 73

Экотоксикология

Влияние длительного применения осадков сточных вод и извести на валовое содержание и концентрацию подвижных форм тяжелых металлов в супесчаной дерново-подзолистой почве

А. С. Фрид, В. А. Касатиков, Т. И. Борисочкина, К. А. Колчанова, Н. С. Никитина 83

Contents

No. 1, 2023

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Changes in Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and Productivity of Grain-Grass Crop Rotation depending on Nutrients Balance
A. N. Naliukhin, A. V. Eregin, D. V. Demidov, Yu. E. Guseva, A. A. Khrunov 3
- Changes in the Content of Mobile Forms of Nitrogen in Gray Forest Soils of Opole under the Influence of Landscape Features of Agricultural Technologies
V. V. Okorkov, I. M. Shchukin, L. A. Okorkova, V. I. Shchukina, A. A. Kozlov 13
-

Fertilizers

- Increasing the Payback of Nitrogen Fertilizing of Winter Wheat with the Use of Original Methods for Calculating Their Optimal Dose
Yu. F. Osipov, A. A. Novikova 25
- Methodology for Estimating Corn Response to Nitrogen Fertilizer
I. N. Ivashenko, V. N. Bagrintseva 33
-

Plant Growth Regulators

- Influence of Salicylic and Succinic Acids on the Indicators of Growth and Photosynthesis and the Content of Chlorophyll in Wheat Plants Grown under Water Deficiency
A. V. Yakunina, Yu. V. Sinitsyna 39
- Effect of Bacterial Strains with Different Ability to Synthesize Auxins and Cytokinins on the Growth and Water Relations of Wheat Plants
E. V. Martynenko, T. N. Arkhipova, Z. A. Akhtyamova, L. Y. Kuz'mina 49
- Role and Efficiency of Retardants in Tobacco Growing Technology
T. V. Plotnikova, S. V. Gvozdetzkaya 57
-

Pesticides

- Guidelines for the Control of Resistance of the Common Vole (*Microtus arvalis* Pall) to Anticoagulant Rodenticides
A. A. Yakovlev 66
-

Agroecology

- Chemical Composition of Spring Wheat Plants on Acidic Sod-Podzolic Light Loamy Soil, Calcified by Calcium-Containing Industrial Waste. Empirical Models of Translocation of Macro- and Microelements into Vegetative and Gene-Rative Organs of Plants
A. V. Litvinovich, A. V. Lavrishchev, A. O. Kovleva, V. M. Bure 73
-

Ecotoxicology

- Effect of Long-Term Use of Sewage Sludge and Lime on the Gross Content and Concentration of Mobile Forms of Heavy Metals in Sandy Loam Sod-Podzolic Soil
A. S. Frid, V. A. Kasatkov, T. I. Borisochkina, K. A. Kolchanova, N. S. Nikitina 83
-
-

ИЗМЕНЕНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕРНОТРАВЯНОГО СЕВООБОРОТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ БАЛАНСА ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2023 г. А. Н. Налиухин^{1,2,*}, А. В. Ерегин^{2,3},
Д. В. Демидов⁴, Ю. Е. Гусева¹, А. А. Хрунов¹

¹Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127434 Москва, ул. Прянишникова, 6, Россия

²Вологодская государственная молочно-хозяйственная академия им. Н.В. Верещагина
160555 Вологда, п. Молочное, ул. Шмидта, 2, Россия

³Государственный центр агрохимической службы “Вологодский”
160555 Вологда, п. Молочное, ул. Студенческая, 11, Россия

⁴Группа ФосАгро, ОП АО “Апатит”
119333 Москва, Ленинский просп., 55/1, стр. 1, Россия

*E-mail: naliuhin@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

После доработки 29.09.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В стационарном полевом опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изучено влияние систем удобрения (органической, минеральной, органо-минеральной) и известкования на баланс питательных веществ, изменение агрохимических параметров почвы и продуктивность зерноотрава-ного севооборота. По завершению 1-й ротации 5-польного севооборота выявлена средней силы корреляция (0.51) между балансом калия и изменением его содержания в почве, определяемого в вытяжке 0.2 н. НС1 (по Кирсанову). Установлено, что известкование по 1.0 Н_г слабокислой почвы увеличило продуктивность севооборота на 10%, что в свою очередь привело к увеличению выноса азота, фосфора и калия урожаем культур на 10–14%. Положительный баланс фосфора был достигнут только в варианте с органо-минеральной системой удобрения при внесении навоза и минеральных удобрений в полной дозе. Выявлено, что при применении органо-минеральной системы удобрения доля биологического азота, поступавшего при распашке клеверного пласта, составляла 26–28%, еще порядка 20–23% N поступало при запашке соломы. Отмечено, что при расчете баланса азота необходимо учитывать его поступление не только с минеральными удобрениями, но и за счет биологической азотфиксации, при заделке соломы и др. Органо-минеральная система обеспечила наибольшую продуктивность зерноотрава-ного севооборота – 51.6 ц з.е./га на неизвесткованном фоне и 57.3 ц з.е./га при известковании. На слабокислом фоне органическая и минеральная системы удобрения обеспечили получение равной продуктивности севооборота – 42.8 ц з.е./га, при известковании небольшое преимущество было за минеральной системой удобрения.

Ключевые слова: баланс питательных веществ, агрохимические свойства почвы, продуктивность севооборота, минеральный и биологический азот, длительный полевой опыт.

DOI: 10.31857/S0002188123010076, EDN: FDSRZR

ВВЕДЕНИЕ

Соблюдение научно обоснованного баланса питательных веществ является основой сохранения и повышения плодородия почв [1, 2]. В Нечерноземной зоне России за последние 30 лет складывался отрицательный баланс всех 3-х элементов питания: азота, фосфора и калия [3–5]. При таком положении дел особенно остро встает вопрос о системах удобрения, которые обеспечат

бездефицитный или положительный баланс. Учеными ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова предложено 3 сценария изменения плодородия почв при различной насыщенности удобрениями в России к 2030 г.: инерционный, базовый, оптимистический [6].

По инерционному сценарию (при сохранении современного уровня применения удобрений) баланс азота и калия прогнозируется отрицатель-

ным (–17 и –19 кг/га соответственно), что приведет к неминусовому снижению урожайности сельскохозяйственных культур и деградации почвенного плодородия. Базовый сценарий предполагает возмещение выноса азота на 100, фосфора – на 194% при отрицательном балансе калия. Это позволит замедлить темпы деградации почвы и даст возможность получать стабильный урожай. И, наконец, оптимистичный сценарий подразумевает возмещение выноса азота на 100, фосфора – на 220 и калия – на 85%, что позволит повысить плодородие почв, добиться увеличения доли почв со средней и повышенной обеспеченностью фосфором, тем самым увеличивая урожайность культур и качество растениеводческой продукции [6].

Таким образом, одной из основных задач в разработке и выборе оптимальной системы удобрения, является поиск такой, которая бы соответствовала (или максимально приближалась) к оптимистическому сценарию баланса питательных веществ.

При расчете баланса питательных веществ в почве необходимо учитывать тип севооборота, агрохимические показатели почвы, поступление и отчуждение элементов питания, уровень кислотности. Например, известкование, способствуя снижению кислотности почвы и увеличению доступности элементов питания, увеличивает урожайность культур севооборота. Однако вместе с этим возрастает и вынос элементов питания [7–9]. Применение систем удобрения неоднозначно влияет на баланс элементов питания в дерново-подзолистой почве.

Например, в условиях Республики Коми, на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в кормовом севообороте использование минеральной системы удобрения обеспечило оптимальный баланс азота, фосфора и калия, имея преимущество перед органо-минеральной и органической системами удобрения [10].

В то же время по данным [11], на дерново-подзолистой супесчаной почве в зернопропашном севообороте оптимальные показатели баланса были выявлены при применении органо-минеральной системы удобрения.

Баланс питательных веществ в почве при выращивании той или иной культуры севооборота, как показал ряд работ, также зависит от изменения агрохимических показателей почвы под действием систем удобрения [12–14]. В немаловажной степени он зависит и от того, сколько питательных веществ в почву возвратится с нетоварной частью выращиваемой продукции (с соломой зерновых, ботвой картофеля, поукосно-

корневыми остатками однолетних и многолетних трав и т.п.).

Было показано, что в длительном полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве возврат с соломой зерновых и зернобобовых культур составил 20–26% азота, 21–34% фосфора и 60–74% калия от общего выноса урожаем [15]. По утверждению работы [16], существует определенная взаимосвязь между величинами содержания элементов питания в почве и их выносом урожаем.

Поскольку вынос – неотъемлемая часть баланса питательных веществ, значит должна существовать связь между балансом и изменением содержания этого элемента питания в пахотном слое почвы.

В связи с этим цель работы – выявить взаимосвязь между величиной баланса питательных веществ и изменением их содержания в пахотном слое дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в зернотравяном севообороте в условиях стационарного полевого опыта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт заложен в 2015 г. на участке учебно-опытного поля Вологодской ГМХА им. Н.В. Верещагина. Опыт развернут во времени и пространстве на 3-х полях севооборота, вводимых последовательно, с одинаковым набором культур и системами удобрения.

Почва – дерново-среднеподзолистая, среднеоккультуренная, легкосуглинистая на покровных суглинках. В среднем в полях севооборота агрохимические показатели слоя 0–20 см почвы были следующие: кислотность (pH_{KCl}) 5.1, гидролитическая кислотность – 3.77 ммоль(экв)/100 г (по Каппену), сумма поглощенных оснований – 11.7 ммоль(экв)/100 г (по Каппену–Гильковицу), содержание органического углерода ($C_{орг}$) – 1.68%, подвижных фосфора – 273, калия – 132 мг/кг почвы (по Кирсанову), обменного калия (по Масловой) – 171 мг/кг, степень подвижности фосфора и калия (по Скофилду) – 0.64 и 11.2 мг/л соответственно.

Площадь опытных делянок – 100 м², учетная – 80 м², расположение систематическое. Исходя из хозяйственных условий региона исследования (Вологодская обл.), были выбраны следующие культуры, организованные в полевой севооборот: викоовсяная смесь–озимая пшеница–ячмень с подсевом клевера–клевер луговой–овес. Использовали следующие сорта культур: вика посевная сорта Льговская 22, озимая пшеница сорта

Таблица 1. Распределение удобрений в вариантах опыта, кг д.в./га

Система удобрения	Внесено с органическими удобрениями			Внесено с минеральными удобрениями			Итого за ротацию			В среднем за ротацию (5 лет)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. Контроль (без удобрений)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. Навоз 50 т/га	150	120	225	0	0	0	150	120	225	30	24	45
3. NPK	0	0	0	150	120	225	150	120	225	30	24	45
4. 1/2 NPK + навоз 25 т/га	75	60	112	75	60	112	150	120	225	30	24	45
5. NPK + навоз 50 т/га	150	120	225	150	120	225	300	240	500	60	48	90

Примечание. В графе 1 – N, 2 – P₂O₅, 3 – K₂O.

Московская 56, ячмень яровой сорта Сонет, клевер луговой сорта Дымковский, овес сорта Лев.

Системы удобрения, и дозы внесения питательных элементов за севооборот представлены в табл. 1.

Во всех вариантах вносили одинаковое количество питательных элементов, в варианте 5 – двойную дозу. Из минеральных удобрений применяли N_{аа} (34.4%), K_x (60%), NPK (N – 15, P₂O₅ – 15, K₂O – 15%), АЗФК (N – 13, P₂O₅ – 19, K₂O – 19%).

В качестве органического удобрения использовали навоз КРС на соломенной подстилке, влажностью 75–80% с содержанием: N – 0.27, P₂O₅ – 0.24, K₂O – 0.45%. Удобрение вносили 1 раз за ротацию под вспашку в занятом пару (под викоовсяную смесь), в дозе 25 и 50 т/га в зависимости от схемы опыта. Известкование проводили также в занятом пару известняковой мукой с содержанием CaCO₃ 98% в дозе по 1.0 H_г.

Почву на агрохимический анализ отбирали поделяночно, согласно ГОСТ 28168-89 “Почвы. Отбор проб” (с 2020 г. ГОСТ Р 58595-2019). Растительные образцы со всех делянок варианта опыта смешивали и выделяли средний образец для химического анализа. Анализы почвенных образцов проводили в лаборатории агрохимии факультета агрономии и лесного хозяйства, растительных – в аккредитованной лаборатории ГЦАС “Вологодский”. Учет урожайности культур проводили сплошным методом, поделяночно. Соотношение урожаев зерна и соломы определяли в пробных снопах.

Статистическую обработку данных урожайности и агрохимических показателей почвы проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа. Для определения взаимосвязи между балансом и изменением агрохимических парамет-

ров использовали линейный корреляционный анализ. Все статистические параметры рассчитывали на основании методик, указанных в [17], при помощи MS Office Excel.

Более подробно методика опыта изложена в работах [18, 19].

В среднем, за годы исследования (2015–2020 гг.), ГТК Селянинова вегетационного периода (1 мая–30 сентября) равнялся 1.9. Избыточно увлажненными были 2017, 2019 и 2020 гг., ГТК Селянинова составлял 2.3 и 2.1 и 2.5 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты стационарных опытов с удобрениями показывают, что изменения комплекса агрохимических показателей плодородия почвы под действием систем удобрения могут быть значительными [20–22].

Наше исследование показало, что известкование существенно изменило физико-химические свойства и калийный режим почвы и практически не оказало влияния (на статистически достоверном уровне) на фосфатный режим вследствие высокой обеспеченности фосфором почвы до закладки опыта [23].

Известкование снизило кислотность почвы в среднем в опыте по сравнению с первоначальным содержанием на 0.75 ед. рН_{KCl} или на 0.15 ед. в среднем за год (5-летняя ротация). Изученные системы удобрения, напротив, увеличили кислотность почвы, в среднем за севооборот на 0.2 ед. рН_{KCl}. Данный факт свидетельствовал о том, что применение минеральных удобрений даже совместно с навозом КРС на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве не способствовало сохранению первоначальной кислотности.

Таблица 2. Изменения агрохимических свойств пахотного слоя почвы при известковании и применении различных систем удобрения (окончание ротации 5-польного зернотравяного севооборота)

Фактор <i>Б</i> – система удобрения	Фактор <i>А</i> (известкование)											
	pH _{KCl}		P ₂ O ₅ _{NCl}		P ₂ O ₅ _{CaCl₂}		K ₂ O _{NCl}		K ₂ O _{CH₃COONH₄}		K ₂ O _{CaCl₂}	
	ед.		мг/кг		мг/л		мг/кг				мг/л	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1. Контроль без удобрений	5.1	5.9	249	272	0.25	0.23	103	86	116	107	10.5	11.4
2. Навоз 50 т/га	5.0	5.8	244	259	0.25	0.23	117	89	126	102	8.8	12.1
3. NPK	4.9	5.8	250	272	0.25	0.24	112	93	126	111	11.5	14.1
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	5.0	5.9	260	273	0.27	0.27	106	105	114	130	8.8	15.4
5. Навоз 50 т/га + NPK	5.0	5.9	282	288	0.39	0.33	117	106	139	121	10.8	15.7
<i>HCP</i> ₀₅ фактор <i>А</i>	0.1		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		10		13		2.9	
<i>HCP</i> ₀₅ факторы <i>Б</i> × <i>АБ</i>	0.1		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$	
<i>HCP</i> ₀₅ частных различий	0.2		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$	

Примечание. В графе 1 – без известкования, 2 – с известкованием.

Известкование, равно как и системы удобрения, не смогло существенно изменить количество подвижного фосфора в пахотном слое по сравнению с первоначальным – оно осталось на очень высоком уровне – 265 мг/кг (в среднем в опыте). Также статистически несущественно изменилась и степень подвижности фосфора (по Скофилду), несмотря на то что по сравнению с первоначальным показателем изменение в среднем в опыте составило 0.37 мг/л в сторону уменьшения.

Изменение содержания обменного калия (по Масловой), так же, как и подвижного (по Кирсанову) подчинялось следующей закономерности: на известкованном фоне уменьшение по сравнению с первоначальным уровнем было более заметным, чем на не известкованном. В то же время изменение степени подвижности K₂O (по Скофилду), напротив, увеличилось под действием известкования по сравнению с не известкованным фоном, в среднем в опыте на 3.7 мг/л, а по сравнению с первоначальным уровнем – на 2.5 мг/л. Данный факт скорее всего объясняется тем, что под действием антагонизма ионов Ca²⁺ и K⁺ последний переходит в менее стабильное состояние в ППК и вытесняется в почвенный раствор, где становится более доступным растениям, тем самым улучшая их калийное питание.

Изменение указанных в табл. 2 агрохимических показателей под действием систем удобрения было статистически недостоверным. Однако проявлялась тенденция к увеличению всех изученных показателей почвы при использовании

органо-минеральной системы удобрения в варианте 5 (навоз 50 т/га + NPK).

Влияние систем удобрения и известкования на урожайность культур севооборота представлено в табл. 3. Применение извести увеличило урожайность всех культур севооборота, прибавка от известкования составляла от 5 до 21%. Максимальную прибавку от известкования отмечали на 3-й год после внесения CaCO₃ для ячменя (21%), минимальную (8%) – на 5-й год для овса. В среднем за севооборот прибавка от снижения кислотности исходно слабокислой почвы составила 10%, при этом эффективность систем удобрения возросла на 15%. Во все годы исследования прибавка урожайности от известкования была статистически достоверной.

Применение систем удобрения на всех культурах севооборота обеспечило статистически достоверную прибавку урожайности. Максимальный ее уровень обеспечило применение органо-минеральной системы удобрения, при сочетании навоза и NPK в полных дозах. Величина прибавки урожайности в данном варианте опыта по отношению к контролю изменялась на фоне известкования от 29 до 90%, а на не известкованном фоне – от 28 до 178%. Наибольшая прибавка урожайности при применении всех изученных систем, за исключением органической, была получена для ячменя.

Стоит отметить, что на слабокислом фоне органическая и минеральная системы удобрения обеспечили получение равной продуктивности севооборота – 42.8 ц з.е./га. В то же время при из-

Таблица 3. Урожайность товарной части культур зернотравяного севооборота (среднее 2-х полей), ц/га

Фактор <i>Б</i> – система удобрения	Фактор <i>А</i> (известкование)							
	Викообразная смесь (зеленая масса)	Озимая пшеница (зерно)	Ячмень с подсевом клевера (зерно)	Клевер луговой (зеленая масса), в сумме за 2 укоса	Овес (зерно)	Среднее за севооборот (з.е.)	Прибавка к контролю (з.е.)	
							ц/га	%
Без известкования – A_1 (pH_{KCl} 5.1–5.2)								
1. Контроль без удобрений	223	25.5	10.4	434	32.3	34.2	–	–
2. Навоз 50 т/га	284	34.0	12.2	488	35.6	42.8	8.6	25
3. NPK	290	37.4	17.0	483	36.2	42.8	8.6	25
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	313	44.0	16.0	499	41.9	45.4	11.2	33
5. Навоз 50 т/га + NPK	381	48.5	21.8	555	42.9	51.6	17.4	51
Среднее фактора A_1	298	38.5	15.5	492	37.8	43.4	–	–
С известкованием – A_2 (pH_{KCl} 5.8–5.9)								
1. Контроль без удобрений	238	29.4	13.4	453	34.3	37.0	–	–
2. Навоз 50 т/га	303	40.8	15.7	530	39.1	45.1	8.1	22
3. NPK	318	46.7	20.0	536	39.2	47.8	10.8	29
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	342	49.6	18.9	571	41.5	50.5	13.5	36
5. Навоз 50 т/га + NPK	419	55.6	25.4	621	44.3	57.3	20.3	55
Среднее фактора A_2	324	44.4	18.7	542	39.7	47.5	–	–
HCP_{05} фактора <i>А</i>	13	1.6	0.8	21	1.0		2.1	
HCP_{05} факторов <i>Б</i> × <i>АБ</i>	21	2.5	1.3	33	1.6		3.3	
HCP_{05} частных различий	30	3.5	1.9	47	2.3		4.5	

вестковании преимущество имела минеральная система удобрения. Эти данные подтвердили известное положение о том, что известкование уменьшает физиологическую кислотность минеральных удобрений и повышает их эффективность.

Что же касается эффективности органо-минеральной системы, в которой навоз и NPK вносили в половинных дозах, то прибавка к контролю от ее применения в среднем за севооборот составила 33–36%, и по уровню продуктивности она заняла промежуточное положение между органо-минеральной, где навоз и минеральные удобрения вносили в полных дозах и минеральной системой удобрения.

Учитывая тот факт, что изменение агрохимических показателей под действием систем удобрения за 1-ю ротацию севооборота было статисти-

чески недостоверным, за исключением кислотности (табл. 2), стоит отметить, что вероятно одной 5-летней ротации зернотравяного севооборота недостаточно для прогнозирования изменения урожайности под действием агрохимических параметров плодородия. Впрочем, общеизвестно, что такие данные могут быть получены только в длительных стационарных полевых опытах. Однако в регионе, где был заложен представленный полевой опыт, подобные эксперименты в данном виде севооборота и на конкретной почве не проводили.

Баланс питательных веществ за ротацию зернотравяного севооборота представлен в табл. 4. Благодаря более высокой урожайности вынос питательных веществ на известкованном фоне был больше, чем на не известкованном. Например, вынос азота, фосфора и калия в среднем в вари-

Таблица 4. Баланс питательных веществ в зерноотравном севообороте

Фактор <i>Б</i> – система удобрения	Фактор <i>А</i> – известкование	Вынос*, кг/га	Возмещение выноса, %			Общее поступление, кг/га	Баланс, кг/га
			с удобрениями	с соломой	за счет азотфиксации		
Азот							
1. Контроль (без удобрения)	1	457	0	26	27	239	–218
	2	503	0	23	24	240	–263
2. Навоз 50 т/га	1	558	27	25	25	429	–129
	2	630	24	23	24	446	–183
3. NPK	1	599	25	26	23	444	–156
	2	696	22	23	23	472	–224
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	1	630	24	24	23	447	–184
	2	688	22	21	24	461	–227
5. Навоз 50 т га + NPK	1	754	40	23	28	688	–65.8
	2	835	36	20	26	688	–147
Фосфор							
1. Контроль (без удобрения)	1	138	0	38	0	52.4	–85.5
	2	155	0	32	0	49.4	–106
2. Навоз 50 т/га	1	168	71	38	0	185	+16.7
	2	198	61	32	0	184	–13.7
3. NPK	1	182	66	34	0	182	–0.7
	2	202	59	32	0	185	–17.4
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	1	187	64	37	0	189	+2.6
	2	212	57	33	0	190	–22.0
5. Навоз 50 т га + NPK	1	227	105	32	0	314	+86.3
	2	259	93	30	0	317	+58.6
Калий							
1. Контроль (без удобрения)	1	389	0	51	0	197	–192
	2	413	0	47	0	194	–218
2. Навоз 50 т/га	1	431	52	53	0	454	+23.5
	2	507	44	50	0	476	–30.4
3. NPK	1	470	48	51	0	468	–1.3
	2	520	43	52	0	496	–24.2
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	1	483	47	55	0	491	+7.6
	2	547	41	47	0	480	–67.0
5. Навоз 50 т га + NPK	1	623	72	54	0	789	+166
	2	655	69	49	0	770	+115

Примечание. В строке 1 – без известкования, 2 – с известкованием.

*Вынос зерном, зеленой массой викоовсяной смеси и клевера.

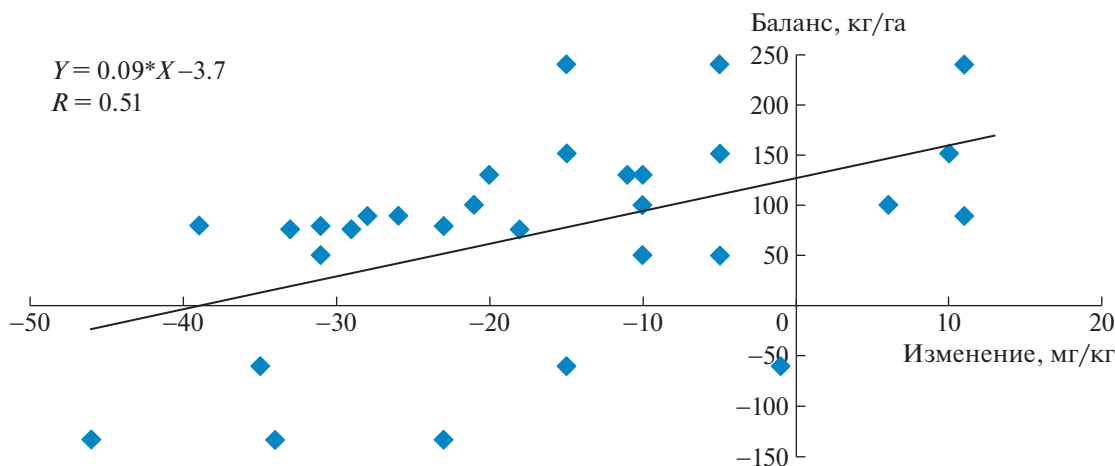


Рис. 1. Корреляция между содержанием в почве подвижного калия (по Кирсанову) и его балансом: *Y* – изменение содержания подвижного калия, *X* – баланс K_2O , $n = 30$.

антах опыта на известкованном фоне был больше на 12, 14 и 10% соответственно, чем на не известкованном.

В относительном выражении известкование не способствовало более высокому возврату питательных веществ с побочной продукцией и азотфиксацией. Поступление элементов питания с соломой и за счет азотфиксации на фоне известкования по отношению к их выносу составило: азота – 46, фосфора – 32, калия – 49%, на не известкованном фоне – 50, 36 и 53% соответственно. Однако следует отметить следующее: в структуре возврата азота с удобрениями, биологической азотфиксацией и соломой доля удобрения на фоне известкования в среднем в опыте составила 21%, доля азотфиксации – 24% от общего выноса, тогда как на фоне без применения извести данные показатели были соответственно равны 29 и 25%. Таким образом, положительное действие извести на накопление биологического азота подтвердилось и при известковании слабокислой почвы.

Применение всех изученных систем удобрения не обеспечило положительный баланс азота в севообороте как на фоне внесения извести, так и в вариантах без ее применения. Положительный баланс фосфора был достигнут только в варианте с органо-минеральной системой удобрения при внесении навоза и минеральных удобрений в полной дозе. Причем следует отметить, что без учета возврата калия и фосфора с соломой зерновых баланс в данном варианте сложился бы отрицательный. Также показано, что при применении полной органо-минеральной системы удобрения 50% поступления азота приходилось не на минеральные удобрения, а на азот, поступающий при

распашке клеверного пласта – 26–28% и с соломой – 20–23%.

Таким образом, баланс, близкий к бездефицитному, отмечен при действии сочетания минерального и биологического азота, который не во всех исследованиях берется в расчет, что искажает истинные результаты.

Также за счет возмещения питательных веществ с соломой был достигнут слабopоложительный баланс фосфора и калия на не известкованном фоне в вариантах с применением органической системы и органо-минеральной системы, представленной в варианте 4.

Нами была сделана попытка связать изменение содержания питательных элементов в почве с балансом питательных веществ с целью прогнозирования их изменения при том или ином балансе. На рис. 1 представлена зависимость между изменением содержания подвижного калия (по Кирсанову) в почве и балансом K_2O .

Коэффициент прямолинейной корреляции между показателями был равен 0.51, что позволило говорить о том, что существует умеренной силы связь между балансом калия и изменением его содержания в почве. При такой связи можно с достаточной условной степенью допущения делать прогноз изменения количества подвижного калия в пахотном слое дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Например, для повышения содержания элемента в почве на 10 мг/кг, баланс элемента должен составлять 152 кг/га, а уменьшение содержания на аналогичную величину появляется при балансе –70 кг/га.

Именно в связи с этим считаем, что исследования по обнаружению более тесной связи между

Таблица 5. Взаимосвязь изменения содержания фосфора и калия в почве, определенных разными методами (Y), с их балансом (X)

Элемент питания	Уравнение регрессии*	Коэффициент корреляции
Подвижный фосфор (по Кирсанову)	$Y = 0.08X - 9.0$	0.14
Степень подвижности фосфора (по Скофилду)	$Y = 0.0007X - 0.38$	0.36
Подвижный калий (по Кирсанову)	$Y = 0.09X - 3.7$	0.51
Степень подвижности калия (по Скофилду)	$Y = -0.003X + 0.95$	-0.08
Обменный калий (по Масловой)	$Y = 0.06X - 56.6$	0.35

Примечание. Число наблюдений – 30.

показателями плодородия почвы (в частности содержанием фосфора и калия) и балансом элементов питания требуют продолжения.

В табл. 5 приведены результаты регрессионного анализа взаимосвязи между изменением содержания элемента питания (Y), определенного различными методами и его балансом (X). Стоит отметить, что данные коэффициенты корреляции не могут считаться окончательными, ввиду достаточно малого времени действия стационарного опыта.

Как было отмечено выше, уравнения регрессии и коэффициенты корреляции изменяются при более длительном проведении полевого опыта. Также стоит отметить, что в большинстве представленных случаев уровень взаимосвязи менялся от незначительного (0.14) до среднего (0.51).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, известкование слабокислой дерново-подзолистой почвы с высоким содержанием подвижного фосфора и средним – калия (по Кирсанову) способствовало сдвигу реакции почвенной среды пахотного слоя на 0.75 ед. рН_{KCl} за 5-летнюю ротацию зерноотраважного севооборота. Это привело к изменениям в калийном режиме почвы, стабилизировало содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) и степени его подвижности (по Скофилду) в пахотном слое почвы. Эти изменения положительно отразились на урожайности культур севооборота, увеличив продуктивность севооборота на 10% по сравнению с не известкованным фоном.

Несмотря на то что влияние изученных систем удобрения на агрохимические показатели плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы не было статистически существенным, их применение увеличило продуктивность зерноотраважного севооборота в среднем на 35% по срав-

нению с неудобренным вариантом (контролем). Максимальную прибавку урожайности севооборота к контролю без удобрения (на 51–55%) отметили в варианте с органо-минеральной системой удобрения. Наименьшая прибавка отмечена при использовании органической системы (22–25%).

Вынос элементов питания с товарной частью урожая был больше на известкованном фоне и в вариантах с применением удобрений. Положительного баланса азота в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при использовании изученных систем удобрения в совокупности с учетом поступления биологического азота за счет азотфиксации и с соломой зерновых культур достичь не удалось. В то же время применение органо-минеральной системы удобрения позволило обеспечить возмещение выноса азота (с учетом всех источников) на 82–91% и получить наибольшую среднегодовую продуктивность севооборота – 51.6–57.3 ц з.е./га.

Величины содержания подвижного калия в почве (по Кирсанову) и его баланса были связаны средней силы положительной корреляцией – 0.51. Взаимосвязи балансов фосфора и калия с прочими их фракциями в почве показали, что прямолинейная корреляция между этими показателями отсутствовала или проявлялась как слабая (от -0.08 до 0.36).

Таким образом, прогнозирование изменения содержания элементов питания в почве на основе баланса питательных веществ для корректировки почвенного плодородия представляет проблему, требующую скорейшего решения с привлечением всей полученной информации в длительных полевых опытах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев В.Г., Шафран С.А. О балансе питательных веществ в земледелии России // Плодородие. 2017. № 1. С. 1–4. EDN: YHGQID

2. *Edmeades D.C.* The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2003. V. 66. P. 165–180. EDN: EQNQDF
<https://doi.org/10.1023/A:1023999816690>
3. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны // *Агрохимия.* 2016. № 8. С. 3–10. EDN: WHGKOZ
4. *Кудеяров В.Н.* Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // *Агрохимия.* 2018. № 10. С. 3–11. EDN: VKRYWH
<https://doi.org/10.1134/S0002188118100101>
5. *Шафран С.А., Ермаков А.А., Виноградова С.Б., Семенова А.И.* Изменение плодородия почв Нечерноземной зоны за 50-летний период // *Агрохим. вестн.* 2021. № 5. С. 3–7. EDN: TNWLAA
<https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-5-001>
6. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия.* 2020. № 6. С. 3–13. EDN: POXVQI.
<https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
7. *Дзюин А.Г., Дзюин Г.П.* Влияние длительного применения систем удобрений на баланс питательных веществ в почве // *Агрохим. вестн.* 2015. № 6. С. 14–17. EDN: UYCRVP
8. *Кузьменко Н.Н.* Баланс элементов питания дерново-подзолистой почвы в льянном севообороте // *Агрохимия.* 2021. № 6. С. 3–7.
<https://doi.org/10.31857/S0002188121060089>
9. *Кирпичников Н.А., Бижан С.П.* Влияние извести на физико-химические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность полевого севооборота при систематическом применении азотных и калийных удобрений в длительном опыте // *Агрохимия.* 2019. № 8. С. 14–17. EDN: EDQMKY
<https://doi.org/10.1134/S0002188119080064>
10. *Чеботарев Н.Т., Юдин А.А.* Влияние органических и минеральных удобрений на свойства и продуктивность дерново-подзолистой почвы в условиях республики Коми // *Аграрн. наука Евро-Северо-Востока.* 2015. № 6. С. 43–46. EDN: UPUMKR
<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2015.49.6.43-46>
11. *Золкина Е.И.* Влияние длительного применения систем удобрения на баланс элементов питания в зернопропашном севообороте // *Агрохим. вестн.* 2017. № 6. С. 67–70. EDN: YKHACW
12. *Мимонов Р.В., Белоус Н.М., Смольский Е.В., Антонова М.В., Пургина А.В.* Баланс элементов питания при возделывании озимой пшеницы на дерново-подзолистой супесчаной почве в зависимости от систем удобрения // *Вестн. Брянск. ГСХА.* 2021. № 1. С. 3–10. EDN: VZEQUG
13. *Иовик Л.Н., Дашкевич М.М.* Вынос ячменем элементов питания и их баланс при применении известковых мелиорантов на среднекислой дерново-подзолистой супесчаной почве // *Мелиорация.* 2022. № 1. С. 48–53. EDN: JNXVQU
14. *Чухина О.В., Обряева О.Д., Кулакова И.Е., Смирнов Д.Е.* Урожайность зерна озимой ржи, вынос культурой элементов питания при применении удобрений в Вологодской области // *Молочно-хоз. вестн.* 2019. № 2. С. 62–71. EDN: HPICJD
15. *Русакова И.В.* Баланс элементов питания и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы при использовании соломы на удобрение // *Международ. научн.-исслед. журн.* 2015. № 8. С. 53–55. EDN: ULEKDV
16. *Шафран С.А., Кирпичников Н.А.* Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // *Агрохимия.* 2019. № 4. С. 3–10. EDN: ZBGQMP
<https://doi.org/10.1134/S0002188119040112>
17. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропроиздат, 1985. 351 с. EDN: ZJQBUD
18. *Налиухин А.Н., Белозеров Д.А., Ерегин А.В.* Изменение агрохимических показателей дерново-средне-подзолистой легкосуглинистой почвы и продуктивности культур севооборота при применении различных систем удобрения // *Земледелие.* 2018. № 8. С. 3–7. EDN: YTZGRF
<https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-1080>
19. *Налиухин А.Н., Белозеров Д.А.* Влияние различных систем удобрения и известкования на урожайность, технологические и хлебопекарные качества зерна озимой пшеницы в условиях Северного Нечерноземья // *Агрохимия.* 2020. № 1. С. 33–42. EDN: HMZPDZ
<https://doi.org/10.31857/S000218812001010X>
20. *Шафран С.А., Ермаков А.А., Семенов А.И., Яковлева Т.А.* Динамика содержания питательных веществ в дерново-подзолистых почвах в длительных полевых опытах // *Плодородие.* 2020. № 4. С. 7–9. EDN: GIVBYO
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.115.02>
21. *Косолапова А.И., Завьялова Н.Е., Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р., Фомин Д.С., Тертерлев И.С.* Эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья // *Агрохимия.* 2018. № 2. С. 42–55. EDN: YTEATS
<https://doi.org/10.7868/S0002188118020047>
22. *Лапа В.В., Ивахненко Н.Н., Кулеш О.Г.* Продуктивность зернотравяных севооборотов и баланс элементов питания при возделывании сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых супесчаной и суглинистой почвах // *Почвовед. и агрохим.* 2015. № 1. С. 115–134. EDN: YMBNSP
23. *Налиухин А.Н.* Изменение агрохимических свойств и микробиоценоза дерново-подзолистой почвы при применении удобрений и известковании // *Плодородие.* 2021. № 5(122). С. 44–48. DOI: EDN: YPPZGW
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.11>

Changes in Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and Productivity of Grain-Grass Crop Rotation Depending on Nutrients Balance

A. N. Naliukhin^{a, b, #}, A. V. Eregina^{b, c}, D. V. Demidov^d,
Yu. E. Guseva^a, and A. A. Khrunov^a

^aRussian State Agrarian University—K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy
ul. Pryanishnikova 6, Moscow 127434, Russia

^bN.V. Vereshchagin Vologda State Dairy Farming Academy
ul. Shmidta 2, s. Molochnoe, Vologda 160555, Russia

^cState Center of Agrochemical Service “Vologda”
ul. Studencheskaya 11, s. Molochnoe, Vologda 160555, Russia

^dPhosAgro Group, Apatit JSC
Leninsky prosp. 55/1, build. 1, Moscow 119333, Russia

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

In a stationary field experiment on soddy-podzolic light loamy soil, the influence of fertilizer systems (organic, mineral, organo-mineral) and liming on the balance of nutrients, changes in the agrochemical parameters of the soil and the productivity of grain-grass crop rotation was studied. At the end of the 1st rotation of the five-field crop rotation, a medium-strength correlation (0.51) was revealed between the potassium balance and the change in its content in the soil, determined in an extract of 0.2 n. HCl (according to Kirsanov method). It was established that liming at 1.0 H_a of slightly acidic soil increased the productivity of crop rotation by 10%, which in turn led to an increase in the removal of nitrogen, phosphorus and potassium with crop yields by 10–14%. A positive balance of phosphorus was achieved only in the variant with an organo-mineral fertilizer system when applying manure and mineral fertilizers in full dose. It should be emphasized the need to take into account the return of nutrients with straw, in case of plowing in the field. It was revealed that in the organo-mineral fertilizer system, the share of biological nitrogen entering during the plowing of the clover layer is 26–28%, and about 20–23% more N is supplied during the plowing of straw. It was noted that when calculating the nitrogen balance, it is necessary to take into account its supply not only with mineral fertilizers, but also due to biological nitrogen fixation, when incorporating straw, etc. Failure to take into account these sources can lead to serious miscalculations. The organo-mineral system provided the highest productivity of the grain-grass crop rotation – 5.16 t of grain units/ha on an unlimed background and 5.73 t of grain units/ha with liming. On a slightly acidic background, the organic and mineral fertilizer systems ensured an equal crop rotation productivity of 4.28 t of grain units/ha, while liming had a slight advantage for the mineral system.

Key words: nutrient balance, soil agrochemical properties, crop rotation productivity, mineral nitrogen and biological nitrogen, long-term field experiment.

УДК 631.416.1:631.445.25:631.51(470.314)

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ АЗОТА В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ОПОЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЛАНДШАФТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АГРОТЕХНОЛОГИЙ

© 2023 г. В. В. Окорков^{1,*}, И. М. Шукин¹,
Л. А. Окоркова¹, В. И. Щукина¹, А. А. Козлов¹

¹Верхневолжский федеральный аграрный научный центр
601261 Владимирская обл., Суздальский р-н, п. Новый, Россия

*E-mail: okorkovvv@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 22.08.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В многолетнем стационарном опыте на серых лесных почвах Владимирского ополя изучены влияние агротехнологий возделывания полевых культур на содержание подвижных форм азота, их взаимосвязь с химическими и физико-химическими свойствами почвы, уровнями интенсификации. После длительного применения агротехнологий с повышением уровня применения удобрений выявлен рост запасов нитратного азота, степени перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу от содержания гумуса на уровне сильной взаимосвязи. Содержание N-NH₄ в почве снижало его величину. С ростом емкости катионного обмена величина этого параметра изменялась, проходя через максимум, рН_{KCl} – через минимум. Установлены изменения в содержании гумуса и физико-химических свойствах почвенных разностей серых лесных почв: серой лесной плакорной, серой лесной среднеоподзоленной, серой лесной среднеоподзоленной со вторым гумусовым горизонтом.

Ключевые слова: серые лесные почвы, Владимирское ополье, содержание гумуса, физико-химические свойства, запасы нитратного азота, степень перехода аммонийного азота в жидкую фазу, корреляционно-регрессионный анализ.

DOI: 10.31857/S0002188123010088, EDN: FDVLSI

ВВЕДЕНИЕ

На дерново-подзолистых [1–3] и серых лесных почвах Владимирского ополя [4] выявлена решающая роль азотных удобрений в повышении продуктивности возделываемых полевых культур в различных севооборотах. Однако в отдельные более благоприятные по увлажнению годы на легких дерново-подзолистых почвах при применении полного минерального удобрения отмечена более высокая урожайность полевых культур, чем на более плодородных серых лесных почвах Ополя. По развизаемым в работах [5, 6] представлениям это связано с различиями в питании растений подвижными формами азота, формирующимися в процессе трансформации органических и азотных минеральных удобрений в зависимости от физико-химических свойств почвы (емкости катионного обмена, минералогического и гранулометрического состава). Исследования проводили на почвах Владимирского ополя.

В исследованиях [4, 5] установлено, что на слабкокислых серых лесных почвах известкование слабо влияло на урожайность полевых культур и продуктивность севооборотов. Это объяснено отсутствием в контроле и во всех вариантах известкования в метровом слое этих почв обменного алюминия в токсичных для корневых систем возделываемых культур количествах. Известкование обеспечивало возможность распространения их в более глубокие влажные слои почвы при пересыхании верхних.

Средняя ежегодная продуктивность 8-польного зернотравяно-пропашного севооборота на 89.1–94.7% и 7-польного зернотравяного севооборота на 92–93% определялась применением азота минеральных удобрений и навоза крупного рогатого скота. Участие фосфорно-калийных удобрений повышало тесноту связи на 4.3–7.4%.

Поскольку решающее влияние на продуктивность севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья оказывало применение азота мине-

ральных удобрений и навоза, то в работах [4, 5] изучали трансформацию внесенных азотных удобрений и навоза КРС и связанную с ней среднюю ежегодную динамику содержания нитратного и аммонийного азота под культурами 7-польного севооборота.

К 1-му сроку наблюдений (отрастание озимых и многолетних трав, всходы яровых культур и однолетних трав) происходила трансформация внесенных азотных удобрений в нитраты, азота органического вещества почвы (гумуса, растительных остатков) и органических удобрений – в аммиачную и нитратную формы. Поэтому запасы последней в этот срок обычно были максимальными. К середине вегетации запасы $N-NO_3$ снижались за счет интенсивного поглощения растениями, к уборке культур несколько возрастали, в засушливые годы могли уменьшаться.

Установлено [4, 5], что при применении азотных минеральных удобрений (аммиачной селитры) запасы нитратного азота в 1-й срок наблюдений в слое 0–40 см почвы повышались с 42.2 (контроль) до 90–160 кг/га, в то время как запасы аммонийного азота изменялись в небольших пределах (с 98.1 до 96–136 кг/га). В удобренных азотом вариантах поглощение $N-NO_3$ (снижение его запасов во 2-й срок по сравнению с 1-м, кг/га) в ответственные фазы роста и развития культур было в 2.5–3.4 раза более высоким, чем $N-NH_4$. Очевидно, они играли определяющую роль в повышении продуктивности культур севооборота, т.к. полностью находились в жидкой фазе. Ионы аммония в почвах с высокой емкостью катионного обмена переходили в жидкую фазу в небольших количествах. Коэффициент использования запасов $N-NO_3$ за 1-ю половину вегетации культур в слое 0–40 см почвы варьировал от 54 до 70%, запасов $N-NH_4$ – от 7.5 до 26.1%.

Различия в размерах использования запасов $N-NO_3$ и $N-NH_4$ за указанный период были обусловлены полным нахождением нитратного азота в жидкой фазе почвы, аммонийного – частичным. За 1–4-ю ротации динамика запасов $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в течение вегетации культур была однотипной. Однако запасы $N-NH_4$ в слое 0–40 см почвы в 1-й срок наблюдений по сравнению с 1-й и 2-й ротациями снизились в 3-й ротации в 1.58–1.77 раза, в 4-й – в 3–4 раза, а степень перехода $N-NH_4$ почвы в жидкую фазу (соотношение почва : вода = 1 : 1) за те же годы в слое 0–20 см уменьшалась с 3.3–5.4 до 1.4–3.5% в 3-й ротации, до 0.6–2.4% – в 4-й ротации. Снижение как запасов $N-NH_4$ в почве (в 3–4 раза), так и доли их перехода в жидкую фазу в 4-й ротации по

сравнению с 1-й и 2-й подтвердило слабую роль аммонийного азота и определяющую роль $N-NO_3$ в питании возделываемых культур при применении научно обоснованных доз азотных удобрений.

Высокая прочность связи ионов аммония ППК (при высокой емкости катионного обмена, ЕКО) вела к решающей роли запасов $N-NO_3$ в почве на продуктивность возделываемых культур и севооборотов, к более высокой агрономической эффективности минеральной и органо-минеральной систем удобрения по сравнению с органической. Это было связано с более быстрой трансформацией азота внесенных минеральных удобрений в ранние периоды вегетации культур в нитратную форму, чем азота органических.

Установлено [5], что 1 кг азота внесенных органических удобрений в слое 0–40 см почвы в 1-й и 2-й ротациях в ранний период вегетации культур обеспечивал накопление 0.18 кг нитратного азота, а 1 кг азота минеральных – 1.26 кг. В 3-й и 4-й ротациях севооборота величина накопления нитратного азота от 1 кг азота навоза повысилась с 0.18 до 0.35 и 0.39 кг, 1 кг азота аммиачной селитры – с 1.26 до 1.27 и 1.30 кг, эффективность азота навоза на накопление нитратного азота в почве по сравнению с аммонийным азотом селитры составила $\frac{0.35}{0.64} \dots \frac{0.39}{0.65}$, или 0.55–0.60. В 1-й и 2-й ротациях накопленные в период активной химизации запасы аммонийного азота в почве замедляли трансформацию азота органических удобрений в нитратную форму в ранние сроки вегетации культур.

Для слоев 0–20 и 20–40 см почвы в образцах 2007 и 2020 гг. была установлена тесная линейная связь содержания $N-NH_4$ в почве ($6.92 > x > 0.77$, мг/100 г почвы) с размерами его перехода в водную вытяжку (W , %) [6]:

$$W = 0.28 + 0.743x, n = 68, t_{\text{сущ}} = 26.2, r^2 = 0.912, \text{доверительный интервал} = 0.98.$$

Очевидно, в этом случае на статистические параметры, определяющее влияние, оказали наиболее высокие величины вариант (x), при которых повышалась подвижность аммонийного азота почвы, при более низких могли проявиться и другие факторы, влияющие на степень перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу. Для серых лесных почв ополья, характеризующихся высоким варьированием физико-химических и химических свойств, это требует дальнейших исследований.

В дополнение к сказанному следует сослаться на последние исследования и на дерново-подзолистых почвах [7, 8]. Например, на дерново-сла-

Таблица 1. Схема севооборотов агроландшафтного стационарного опыта

Севооборот				
1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Овес подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–ячмень–чистый пар–озимая пшеница	Овес подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–яровая пшеница–занятый пар–озимая рожь	Ячмень с подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–озимая рожь–яровая пшеница–овес	Ячмень с подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–озимая пшеница–картофель–яровая пшеница	Картофель–ячмень с подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–озимая пшеница–зернобобовые–яровая пшеница

Примечание. Нумерация севооборотов та же в табл. 2–5.

боподзолистых легко- и среднесуглинистых почвах Ярославской обл., характеризующихся гидрослюдистым минералогическим составом ила и высокой емкостью катионного обмена 14–24 мг-экв/100 г почвы, по действию куриного помета (КП) содержание аммонийного азота в слое 0–40 см возросло до 4–6 мг/100 г почвы, а степень его перехода в жидкую фазу – до 8.0–22.5%. Но уже при последствии КП эти параметры снизились до 1.46–1.76 мг/100 г почвы и до 2.5–2.7%. При последствии КП урожайность возделываемых культур определялась запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы [8].

На легких дерново-подзолистых почвах Мещеры, в которых ЕКО и содержание физической глины варьировали соответственно от 2.0 до 14.6 мг-экв/100 г почвы и от 1.4 до 22.5%, степень перехода N-NH₄ почвы в жидкую фазу возросла с уменьшением обоих параметров ($r^2 = 0.907$), изменяясь от 7.0 до 22.4% [5, 7].

Цель работы – в многолетнем стационарном комплексном опыте (агроландшафты) оценить роль удобрений, физико-химических и химических свойств, почвенных разностей серых лесных почв на запасы нитратного азота и подвижность аммонийного азота в почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели на 1-1 культуре 5-й ротации 5-ти шестипольных севооборотов (табл. 1). Опыт заложен в 1996 г. [9]. Дозы удобрений рассчитывали балансовым методом для следующих уровней интенсивности:

1 – нулевой (экстенсивный) – на продуктивность 18–20 ц з.е./га;

2 – поддерживающий (нормальный) – на продуктивность 20–23 ц з.е./га;

3 – интенсивный – на продуктивность 27–35 ц з.е./га;

4 – высокоинтенсивный – на продуктивность 37–45 ц з.е./га или

о/о – без внесения минеральных удобрений, п/ом – поддерживающий органо-минеральный, и/м – интенсивный минеральный, в/м – высокоинтенсивный минеральный, и/ом – интенсивный органо-минеральный, в/ом – высокоинтенсивный органо-минеральный.

Удобрения вносили на фоне 4-х систем обработки: отвальной (вспашка на 20–22 см ежегодно), комбинированно-энергосберегающей (в 2021 г. плоскорезная обработка на 10–12 см), комбинированно-ярусной (в 2021 г. вспашка на 20–22 см), противозерозионной (в 2021 г. глубокое рыхление на 25–27 см). Исследования вели и в различных почвенных ареалах.

Опыт закладывали в четырехкратной повторности. Площадь делянки 20 м × 7 м = 140 м². Расположение делянок по блокам и ярусам систематическое.

В результате почвенного обследования в 1-й закладке опыта, проведенного сотрудниками МСХА им. К.А. Тимирязева под руководством В.И. Кирюшина, составлена почвенная карта в масштабе 1 : 200 с выделением 8-ми разностей серых лесных почв, формирующих элементарные почвенные ареалы (ЭПА) разнообразной площади и формы. Выделены следующие почвенные разности: типичные (плакорные) серые лесные, серые лесные слабоподзоленные, серые лесные среднеподзоленные, сильноподзоленные, остаточо-карбонатные, серые лесные среднеподзоленные со 2-м гумусовым горизонтом (ВГГ), сильноподзоленные со ВГГ, серые лесные грунтово-слабоглееватые почвы.

Дозы удобрений, внесенных под предшествующую культуру (конец 4-й ротации, 2020 г.) и 1-ю

Таблица 2. Схема применения удобрений под предшествующую (6-ю культуру) и 1-ю культуру севооборотов [9, 10]

Параметры использования	Севообороты									
	1. Овес + мн. травы		2. Овес + мн. травы		3. Ячмень + мн. травы		4. Ячмень + мн. травы		5. Картофель	
Уровни интенсивности	Нулевой, о/о	Поддерживающий, п/ом	Поддерживающий, и/ом	Интенсивный, и/м	Интенсивный, и/м	Интенсивный, и/м	Интенсивный, и/м	Высокоинтенсивный, в/ом	Интенсивный, и/ом	Высокоинтенсивный, в/ом
Дозы удобрений под предшествующий	Навоз 40 т/га	Навоз 40 т/га + N40	Навоз 40 т/га + N40	Навоз 40 т/га + N40	N60P60K60	N80P80K80	N60P60K60	N90P90K90	N60P60K60	N90P90K90
Дозы удобрений под 1-ю культуру	0	N30P30K30	N45P45K45	N45P45K45	N45P45K45	N45P45K45	N45P45K45	N45P45K45	N90P90K90	N120P120K120

Примечание. Уровни интенсивности: о/о – без внесения минеральных удобрений, п/ом – поддерживающий органико-минеральный, и/м – интенсивный органико-минеральный, в/ом – высокоинтенсивный органико-минеральный, в/ом – высокоинтенсивный органико-минеральный, в/ом – высокоинтенсивный органико-минеральный. То же в табл. 3–5.

культуру 5-й ротации севооборотов, представлены в табл. 2. Почвенные анализы по общепринятым методикам проведены для 3-х почвенных разностей: серые лесные типичные, серые лесные среднеподзоленные, серые лесные среднеподзоленные со ВГГ [10]. Содержание аммонийного азота в водной вытяжке (1 : 1) определяли с помощью ионоселективного электрода на ионы NH_4^+ [5, 7].

Условия использования севооборотов состояли в том, что с ростом уровня интенсивности севооборота повышались и дозы применения удобрений.

Статистическую обработку данных проводили методом корреляционно-регрессионного анализа с использованием компьютерных программ Microsoft Excel, STAT VIUA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия в 2021 г. характеризовались крайне неравномерным выпадением осадков в течение вегетационного периода, не совпадающим с оптимальной потребностью в них полевых культур, высокими перепадами температур. Весна 2021 г. была затяжной. За апрель выпала почти двойная норма осадков, за май – близкая к норме. Температура в 1-й декаде мая была на 1.1°C более низкой, чем среднемноголетняя норма. Средняя температура воздуха за июнь была на 4°C более высокой, чем среднемноголетняя, что ускоряло развитие растений. Количество осадков было близким к норме. Причем в 3-й декаде их было в 2.3–2.5 раза меньше, чем обычно. За период с 13.06 по 20.07.2021 г. (за 37 сут) выпало всего 12.2 мм. Из них 36% (4.3 мм) являлись малоэффективными. Таким образом, в фазах выхода в трубку и колошения растения испытывали острый дефицит во влаге, что резко снизило урожайность зерновых яровых культур. Выпавшие в 1-й и последующих декадах августа осадки уже заметно не могли повлиять на величину урожая яровых зерновых культур, но усложнили их уборку, заметно ускоряли трансформацию азота почвы и удобрений.

Исследования показали (табл. 3), что при отвальной вспашке на 20–22 см по сравнению с нулевым уровнем интенсификации (1. Овес + травы, о/о) с его повышением до “в/ом” (5. Картофель) в слое 0–60 см почвы запасы N-NO₃ в 1-й срок наблюдений в серой лесной почве возрастали с 10.0 до 85.2 кг/га, в серой лесной среднеподзоленной – с 14.9 до 196 кг/га. В уборку запасы N-NO₃ в вариантах последствия навоза

Таблица 3. Влияние уровней интенсификации на запасы нитратного азота в слое 0–60 см в серой лесной и серой лесной средне-оподзоленной почвах в фазе всходов на фоне отвальной вспашки на глубину 20–22 см, кг/га

Слой, см	Севообороты			
	1. Овес + травы	3. Ячмень + травы	4. Ячмень + травы	5. Картофель
	уровни интенсификации			
	о/о	и/м	и/м	в/ом
Серая лесная почва				
0–20	3.2	5.7	15.7	37.8
20–40	3.5	4.9	16.1	28.8
40–60	3.3	4.7	15.1	18.6
Сумма	10.0	15.3	46.9	85.2
Серая лесная средне-оподзоленная почва				
0–20	5.3	10.7	44.3	95.6
20–40	4.9	8.4	14.7	56.2
40–60	4.7	7.1	30.2	44.7
Сумма	14.9	26.2	89.2	196

Таблица 4. Влияние уровней интенсификации на запасы нитратного азота в слое 0–60 см серой лесной и серой лесной средне-оподзоленной почвах в фазе уборки на фоне отвальной вспашки на глубину 20–22 см, кг/га

Глубина слоя, см	Севообороты			
	1. Овес + травы	3. Ячмень + травы	4. Ячмень + травы	5. Картофель
	уровни интенсификации			
	о/о	и/м	и/м	в/ом
Серая лесная почва				
0–20	14.7	34.1	20.4	27.5
20–40	9.2	13.0	14.4	12.7
40–60	14.2	10.1	9.8	19.8
Сумма	38.1	57.2	44.6	60.0
Серая лесная средне-оподзоленная почва				
0–20	9.5	20.4	16.1	16.2
20–40	6.3	10.7	11.5	12.7
40–60	7.1	7.7	15.4	8.8
Сумма	22.9	38.8	43.0	37.8

40 (о/о) и N60P60K60 с действием N45P45K45 (и/м, севооборот 3 – ячмень + травы) в обеих почвенных разностях возросли: до 38.1 и 57.2 кг/га в серой лесной почве и до 22.9 и 38.8 кг/га – в серой лесной средне-оподзоленной (табл. 4), что было обусловлено более благоприятными условиями увлажнения и достаточно высокими температурами для процессов нитрификации. В вариантах дальнейшего повышения уровня интенсификации возрастание запасов N-NO₃ в почве в уборку не наблюдали. Полученные результаты в целом совпадали с результатами работ [4–6].

При комбинированно-энергосберегающей системе обработки почвы на серой лесной средне-оподзоленной со ВГГ почве при рыхлении на 10–12 см, когда основная часть внесенных органических удобрений располагалась в верхней части пахотного слоя, интенсивно проходили процессы нитрификации в вариантах последствия навоз 40 т/га и навоз 40 т/га + N60 с действием N45P45K45. Показано, что запасы нитратного азота резко возрастали в оба срока наблюдений (табл. 5). При применении только минеральных удобрений с повышением уровня их применения от уровня и/м (севооборот 3 – ячмень + много-

Таблица 5. Влияние уровней интенсификации на запасы нитратного азота в слое 0–60 см серой лесной среднеоподзоленной с ВГГ почвы в фазе всходов и в фазе уборки на фоне комбинированно-энергосберегающей обработки на глубину 10–12 см, кг/га

Глубина слоя, см	Севообороты			
	1. Овес + травы	2. Овес + травы	3. Ячмень + травы	4. Ячмень + травы
	уровни интенсификации			
	о/о	и/ом	в/м	в/м
Серая лесная среднеоподзоленная с ВГГ почва (фаза всходов)				
0–20	14.2	47.4	13.1	28.3
20–40	17.0	93.3	12.1	12.4
40–60	26.3	83.5	10.1	11.5
Сумма	57.5	224.2	35.3	52.2
Серая лесная средне-оподзоленная с ВГГ почва (фаза уборки)				
0–20	34.3	12.4	33.9	86.6
20–40	23.9	109.4	16.4	27.1
40–60	18.6	57.7	9.2	15.4
Сумма	76.8	179.5	59.5	129

Таблица 6. Взаимосвязь степени перехода N-NH₄ в жидкую фазу для серых лесных почв (W , %) Владимирского ополья ландшафтного стационара “Верхневолжский ФАНЦ” с содержанием аммонийного азота в почве (x_1 , мг/100 г почвы), содержанием гумуса (x_2 , %), емкостью катионного обмена (x_3 , мг-экв/100 г почвы) и рН_{KCl} (x_4)

Почва	Уравнение взаимосвязи ($n = 103$)	R^2	Доверительный интервал
Серая лесная среднесуглинистая	$W_1 = 0.96 - 0.153x_1$	0.100	0.82
	$W_2 = 0.20 + 0.181x_2$	0.343	0.70
	$W_3 = -0.33 + 0.0386x_3$	0.057	0.84
	$W_4 = 0.63 - 0.221x_1 + 0.210x_2$	0.540	0.59
	$W_5 = 6.36 - 0.248x_1 - 1.80x_4 + 0.0518x_2^2 - 0.010x_3^2 + 0.0766x_3x_4$	0.678	0.50

Примечание. $2.20 > W > 0.06$, $4.24 > x_1 > 0.85$, $5.58 > x_2 > 0.29$, $33 > x_3 > 15.5$, $7.20 > x_4 > 4.85$. Для всех моделей экспериментальная величина коэффициента Фишера больше теоретической.

летние травы) до уровня в/м (севооборот 4 – ячмень + многолетние травы) запасы N-NO₃ также возрастали с 35.3 до 52.2 в фазе всходов и с 59.5 до 129 кг/га в фазе уборки.

В целом запасы N-NO₃ в слое 0–60 см почвы увеличивались с повышением уровня интенсификации, наиболее высокими они были в серой лесной средне-оподзоленной с ВГГ почве и размещении органических удобрений в верхней части пахотного слоя, благоприятные условия увлажнения после уборки при высоких температурах способствовали более быстрому восстановлению плодородия почвы по величине запасов N-NO₃.

Так как в почве первым этапом трансформации органического вещества, растительных остатков, внесенных органических удобрений

является аммонификация, с ростом которой повышаются скорость нитрификации и размеры накопления в почве нитратного азота, то на примере почвенных разностей серых лесных почв в опыте была изучена взаимосвязь степени перехода аммонийного азота в жидкую фазу при соотношении почва : вода = 1 : 1 в зависимости от некоторых свойств почвы. Были использованы образцы почвы, отобранные до глубины 100 см на 3-х почвенных разностях (серые лесные, серые лесные средне-оподзоленные, серые лесные средне-оподзоленные с ВГГ), использованных при различных уровнях интенсификации и различавшихся содержанием аммонийного азота, гумуса, емкостью катионного обмена и величиной рН_{KCl} (табл. 6).

Степень перехода аммонийного азота в жидкую фазу (W) варьировала в узких пределах (от 0.06 до 2.20%), содержание аммонийного азота в почве – от 0.85 до 4.24 мг/100 г почвы, содержание гумуса – от 0.29 до 5.58%, емкость катионного обмена – от 15.5 до 33.0 мг-экв/100 г почвы, pH_{KCl} – от 4.85 до 7.20 ед.

Установлено, что с увеличением содержания $N-NH_4$ в почве доля его перехода в жидкую фазу снижалась, что в целом совпадало с законом действующих масс. На влияние этого фактора приходилось около 10.0% вариации степени перехода W . Доля влияния величины содержания гумуса составила 34.3%, т.е. было в 3.4 раза более высоким. Между этими параметрами наблюдали среднюю степень взаимосвязи. Известно, что соли аммония органических кислот хорошо растворимы в воде и, следовательно, их связь с кислотными группами органического вещества весьма слабая. Слабо влияла на параметр W и емкость катионного обмена (доля – $\approx 5.7\%$). Без учета взаимодействия факторов степень перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу слабо возрастала.

При учете влияния на показатель W 2-х изученных параметров (содержание аммонийного азота и гумуса в почве) величина R^2 достигала 54.0% (средняя степень взаимосвязи). При этом степень перехода W снижалась с увеличением содержания аммонийного азота, но увеличивалась с ростом содержания гумуса в почве.

При учете влияния на степень перехода W всех изученных факторов и их взаимодействий получена высокая степень взаимосвязи ($R^2 = 0.678$). При этом с ростом содержания $N-NH_4$, величины ЕКО отмечено уменьшение степени перехода аммонийного азота в жидкую фазу, что совпадало с результатами работ [5–7]. С ростом содержания гумуса степень перехода W особенно быстро повышалась (выявлена квадратичная зависимость). Этот параметр несколько снижался с ростом pH_{KCl} , но повышался от взаимодействия показателей ЕКО и pH_{KCl} .

В работах [4–6] было установлено, что определяющее влияние на продуктивность возделываемых культур оказывали запасы подвижных форм азота, формирующиеся в ранний период их вегетации в слое 0–40 см почвы. Но поглощение азота из почвы отмечено и из слоев глубже 40 см. Поэтому учет содержания подвижных форм азота и свойств почвы более глубоких слоев 0–60 см будет более корректно отражать взаимосвязи между ними. В связи с этим для слоев 0–10, 10–20, 20–40 и 40–60 см серых лесных, серых лесных сред-

не-оподзоленных и серых лесных средне-оподзоленных с ВГГ почв были усреднены данные степени перехода $N-NH_4$ почвы в жидкую фазу, содержания аммонийного азота, гумуса, ЕКО и величин pH_{KCl} (табл. 7).

Наиболее высокая доля перехода аммонийного азота в жидкую фазу W отмечена в серой лесной с ВГГ почве, наиболее низкая – в серой лесной средне-оподзоленной. Однако содержание $N-NH_4$ в почве было наиболее высоким в последней почвенной разности.

Содержание гумуса и ЕКО снижались от серой лесной средне-оподзоленной с ВГГ почвы к серой лесной и серой лесной средне-оподзоленной.

Наиболее высокие показатели pH_{KCl} в слое 0–20 см почвы выявлены в серой лесной почве (5.86–6.06 ед.), наиболее низкие (5.37–5.53) – в серой лесной средне-оподзоленной с ВГГ почве. В то же время в слоях 20–40 и 40–60 см почвы в серой лесной средне-оподзоленной почве наблюдали наиболее низкие величины pH_{KCl} (5.38–5.59 ед.), что было связано с генезисом серых лесных почв (повышенное увлажнение).

Корреляционно-регрессионный анализ взаимосвязи средней степени перехода $N-NH_4$ почвы в жидкую фазу со средними изученными параметрами (табл. 8) позволил выявить их тесную высокую связь ($0.877 > R^2 > 0.707$).

Коэффициент детерминации для взаимосвязи степени перехода W с содержанием гумуса составил 70.7% (модель 1). При учете ЕКО и содержания гумуса он повышался до 86.9% (модель 2). При этом с ростом ЕКО в начале наблюдали повышение параметра W , а затем – снижение. По модели 3 с увеличением содержания аммонийного азота в почве степень перехода W снижалась по квадратичной зависимости, но повышалась от действия его сочетания с содержанием гумуса. Несколько более тесная взаимосвязь установлена при учете содержания гумуса, величины pH_{KCl} и сочетания этих параметров (модель 4). При этом с ростом pH_{KCl} степень перехода W изменялась, проходя через минимум.

Очевидно, в серых лесных средне-оподзоленных почвах в слоях 20–40 см и 40–60 см почвы при более низких величинах pH_{KCl} повышался положительный заряд гидроксидов железа и алюминия. Это вело к гетерокоагуляции их с отрицательно заряженными органическими и органоминеральными коллоидами. При этом происходило внутриагрегатное поглощение ионов аммония, переход которых в жидкую фазу замедлялся. Основной же причиной снижения параметра W в

Таблица 7. Свойства почвенных разностей серых лесных почв в слоях в вариантах, различавшихся уровнем интенсификации и системами обработки почвы

Глубина слоя, см	Варианты с разным уровнем интенсификации и системами обработки почвы								Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Степень перехода N-NH ₄ почвы в жидкую фазу в серой лесной почве, %									
0–10	2.08	0.92	1.08	0.70	0.70	1.46	1.15	–	1.06
10–20	0.68	1.06	0.66	0.80	0.93	1.43	1.02	–	0.94
20–40	0.30	0.36	0.38	0.90	0.32	0.40	0.59	–	0.46
40–60	0.48	0.30	0.36	0.36	0.46	0.32	0.41	–	0.38
Степень перехода N-NH ₄ почвы в жидкую фазу в серой лесной средне-оподзоленной почве, %									
0–10	0.75	0.80	0.29	0.72	0.44	0.67	0.48	–	0.59
10–20	0.60	0.31	0.21	1.02	0.35	0.48	0.38	–	0.48
20–40	0.18	0.14	0.06	0.20	0.10	0.12	0.21	–	0.14
40–60	0.20	0.20	0.20	0.13	0.14	0.14	0.27	–	0.18
Степень перехода N-NH ₄ почвы в жидкую фазу в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, %									
0–10	0.52	1.13	1.76	1.33	0.85	2.20	0.78	0.41	1.12
10–20	0.43	0.79	1.68	0.90	0.99	1.65	0.70	0.61	0.97
20–40	0.19	–	0.69	0.70	0.74	0.84	0.51	0.43	0.59
40–60	0.14	0.99	0.68	0.17	–	0.84	0.62	0.79	0.60
Содержание N-NH ₄ в серой лесной почве, мг/100 г почвы									
0–10	1.54	1.99	2.25	3.18	2.90	2.19	1.55	–	2.23
10–20	1.78	1.79	2.44	2.46	3.07	1.62	1.60	–	2.11
20–40	1.40	1.33	1.95	1.70	2.96	1.38	1.13	–	1.69
40–60	1.37	1.32	1.46	1.60	1.44	0.99	1.52	–	1.38
Содержание N-NH ₄ в серой лесной средне-оподзоленной почве, мг/100 г почвы									
0–10	1.58	2.78	2.66	2.07	3.82	4.16	4.06	–	3.02
10–20	1.34	3.00	3.85	1.40	3.62	3.32	2.88	–	2.77
20–40	3.19	3.22	3.81	2.76	3.59	3.45	2.69	–	3.24
40–60	2.29	2.78	3.88	3.04	3.17	3.00	2.97	–	3.02
Содержание N-NH ₄ в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, мг/100 г почвы									
0–10	3.35	3.11	1.82	2.09	2.27	2.27	2.41	2.80	2.52
10–20	2.59	2.76	1.62	2.46	1.82	2.21	2.50	1.82	2.22
20–40	3.02	2.43	1.35	1.55	1.62	2.54	1.51	1.49	1.94
40–60	4.04	1.10	1.57	1.16	–	1.86	1.32	1.80	1.84
Содержание гумуса в серой лесной почве, %									
0–10	5.42	2.96	4.68	4.05	2.47	3.86	2.60	–	3.72
10–20	3.09	2.73	3.82	3.84	2.49	4.18	1.78	–	3.13
20–40	1.11	0.70	2.71	1.94	1.30	1.40	0.71	–	1.41
40–60	0.98	0.54	1.22	0.84	1.11	0.98	0.89	–	0.94
Содержание гумуса в серой лесной средне-оподзоленной почве, %									
0–10	2.79	3.94	2.98	3.05	3.03	2.87	3.14	–	3.11
10–20	1.19	3.76	2.68	3.10	3.10	2.65	3.14	–	2.80
20–40	0.83	1.49	1.09	1.98	1.64	1.43	1.42	–	1.41
40–60	0.57	0.80	1.10	1.12	1.16	0.97	1.08	–	0.97
Содержание гумуса в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, %									
0–10	3.82	3.89	3.00	3.18	4.70	5.58	3.99	3.82	4.00

Таблица 7. Окончание

Глубина слоя, см	Варианты с разными уровнем интенсификации и системами обработки почвы								Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	
10–20	4.00	4.13	3.25	3.43	3.61	4.80	3.88	3.94	3.88
20–40	4.94	4.35	3.69	2.82	4.08	3.99	2.41	3.20	3.68
40–60	2.66	2.35	1.25	1.17	–	1.91	1.35	2.11	1.83
ЕКО в серой лесной почве, мг-экв/100 г почвы									
0–10		20.5	26.8	15.5	22.6	27.6	24.0	–	23.1
10–20	26.2	24.8	27.2	27.9	25.1	27.7	22.5	–	25.9
20–40	27.1	26.6	25.8	24.6	25.6	22.4	23.0	–	25.0
40–60	26.0	25.6	27.7	27.4	25.0	22.8	20.9	–	25.1
ЕКО в серой лесной средне-оподзоленной почве, мг-экв/100 г почвы									
0–10	23.7	25.6	21.8	23.4	23.7	23.0	24.6	–	23.7
10–20	23.3	25.4	21.5	23.3	21.8	21.5	23.4	–	22.9
20–40	24.3	18.4	20.3	22.0	22.1	22.8	20.5	–	21.5
40–60	24.6	19.5	20.4	23.1	21.6	22.8	22.9	–	22.1
ЕКО в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, мг-экв/100 г почвы									
0–10	26.0	26.2	23.0	23.9	26.9	27.6	25.4	26.9	25.7
10–20	27.7	26.4	23.4	24.3	26.6	27.2	24.8	28.1	26.1
20–40	33.0	25.9	27.6	23.2	30.0	27.4	23.6	27.2	27.2
40–60	23.9	27.6	20.9	21.1	–	22.5	23.1	24.4	23.4
pH _{KCl} в серой лесной почве									
0–10	5.81	5.35	5.41	6.17	7.20	6.40	6.10	–	6.06
10–20	5.65	5.53	5.32	6.19	6.38	6.09	5.90	–	5.86
20–40	5.28	5.37	5.55	5.86	6.35	6.18	5.68	–	5.75
40–60	5.44	5.47	5.37	5.60	6.37	5.98	5.55	–	5.68
pH _{KCl} в серой лесной средне-оподзоленной почве									
0–10	5.87	5.91	5.67	5.35	5.19	5.86	5.69	–	5.65
10–20	5.97	5.90	5.61	5.49	5.12	5.93	5.49	–	5.64
20–40	5.48	5.70	5.19	5.30	5.78	6.13	5.56	–	5.59
40–60	5.53	5.24	4.92	5.18	5.62	5.83	5.38	–	5.38
pH _{KCl} в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ									
0–10	5.22	4.97	4.99	5.28	5.39	6.41	5.34	5.39	5.37
10–20	5.81	4.91	5.13	5.27	6.03	6.12	5.44	5.50	5.53
20–40	5.96	5.35	5.58	5.80	5.90	5.96	5.53	5.66	5.72
40–60	5.62	5.27	5.19	6.47	–	5.56	5.22	5.33	5.52

более глубоких слоях этой почвы являлось снижение микробиологической активности, особенно процессов нитрификации, из-за повышения кислотности. Это подтверждало наиболее высокое содержание аммонийного азота в слоях 20–40 и 40–60 см почвы (табл. 7).

В табл. 9 проведено сравнение экспериментально полученных средних величин перехода аммонийного азота в жидкую фазу (вытяжка почва : вода = 1 : 1) с рассчитанными по моделям 1–4

(табл. 8) величинами. Получено удовлетворительное соответствие между ними.

В острозасушливом 2021 г. погодные условия оказали определяющее отрицательное влияние на урожайность яровых зерновых культур [11]. Дефицит влаги в период колошения–формирование зерна снизил их урожайность (ц зерна/га), которая составила: овса – 21.9–25.6, ячменя – 13.2–15.0. Достоверных различий влияния удоб-

Таблица 8. Взаимосвязь степени перехода N-NH₄ в жидкую фазу для серых лесных почв (*W*, %) Владимирского ополья ландшафтного стационара “Верхневолжский ФАНЦ” с содержанием аммонийного азота в почве (*x*₁, мг/100 г почвы), содержанием гумуса (*x*₂, %), емкостью катионного обмена (*x*₃, мг-экв/100 г почвы) и рН_{KCl} (*x*₄)

Почва	Уравнение взаимосвязи (<i>n</i> = 12)	<i>R</i> ²	Доверительный интервал
Серая лесная средне-суглинистая	$W_1 = 0.0273 + 0.231x_2$	0.707	0.37
	$W_2 = -26.2 + 2.17x_3 + 0.0455x_2^2 - 0.0443x_3^2$	0.869	0.28
	$W_3 = 0.45 - 0.71x_1^2 + 0.096x_1x_2$	0.813	0.31
	$W_4 = 94.6 + 3.54x_2 - 35.3x_4 + 3.29x_4^2 - 0.60x_2x_4$	0.877	0.29

Примечание. $1.12 > W > 0.14$, $3.24 > x_1 > 1.38$, $4.0 > x_2 > 0.94$, $27.2 > x_3 > 21.5$, $6.06 > x_4 > 5.38$.

Таблица 9. Взаимосвязь средней степени перехода N-NH₄ почвы в жидкую фазу (*W*, %) с его средним содержанием в почве (*x*₁, мг/100 г), средним содержанием гумуса (*x*₂, %) и средними величинами ЕКО (*x*₃, мг-экв/100 г почвы) и рН_{KCl} (*x*₄)

Глубина слоя, см	<i>W</i>	N-NH ₄	Гумус	ЕКО	рН _{KCl}	<i>W</i> в зависимости от модели				Среднее
						<i>W</i> ₁	<i>W</i> ₂	<i>W</i> ₃	<i>W</i> ₄	
Серая лесная почва										
0–10	1.06	2.23	3.72	23.1	6.06	0.89	0.94	0.89	1.10	0.96
10–20	0.94	2.11	3.13	25.9	5.86	0.75	0.75	0.77	0.76	0.76
20–40	0.46	1.69	1.41	25.0	5.75	0.35	0.47	0.48	0.50	0.45
40–60	0.38	1.38	0.94	25.1	5.68	0.24	0.41	0.44	0.34	0.36
Серая лесная средне-оподзоленная почва										
0–10	0.59	3.20	3.11	23.7	5.65	0.75	0.80	0.70	0.62	0.72
10–20	0.48	2.77	2.81	22.9	5.64	0.67	0.64	0.65	0.57	0.63
20–40	0.14	3.24	1.41	21.5	5.59	0.35	0.09	0.15	0.32	0.23
40–60	0.18	3.02	0.97	22.1	5.38	0.25	0.18	0.09	0.20	0.18
Серая лесная средне-оподзоленная с ВГТ почва										
0–10	1.12	2.52	4.00	25.7	5.37	0.95	1.05	0.97	1.16	1.03
10–20	0.92	2.22	3.88	26.1	5.53	0.92	0.96	0.93	0.84	0.91
20–40	0.59	1.94	3.68	27.2	5.72	0.88	0.68	0.87	0.69	0.78
40–60	0.60	1.84	1.83	23.4	5.52	0.45	0.49	0.53	0.38	0.46
Доверительный интервал	–	–	–	–	–	0.37	0.28	0.31	0.29	0.31

рений и систем обработок на этот параметр не установлено.

Регулярно выпадающие по декадам августа осадки [11] позволили получить урожай клубней картофеля при интенсивном уровне применения удобрений в размере 259–281, при высокоинтенсивном – 264–284 ц/га. Очевидно, примененные дозы удобрений (табл. 2) повышали запасы нитратного азота (табл. 3) в слое 0–60 см почвы до

85.2–196 кг/га и обеспечивали получение высоких урожаев этой культуры. При этом нужно отметить, что увеличение дозы полного минерального удобрения с N90P90K90 до N120P120K120 не вело к достоверному росту урожайности картофеля. Для серых лесных почв Ополья это наблюдали и в других исследованиях [12].

В вариантах, где под картофель применяли зяблевую вспашку на 20–22 см (системы отваль-

ной и комбинированно-ярусной обработки) урожайность картофеля была достоверно больше (283 и 280 ц/га соответственно), чем при комбинированно-энергосберегающей (265 ц/га) и противоэрозионной (262 ц/га) системах обработки ($HCP_{05} = 13$ ц/га). По-видимому, при вспашке формировались более благоприятные агрофизические свойства пахотного слоя и его водно-воздушный режим.

ВЫВОДЫ

1. Обобщены литературные данные о влиянии подвижных форм азота на продуктивность культур севооборотов на серых лесных почвах Владимирского ополья и дерново-подзолистых почвах разного физико-химического состояния. На легко- и средне-суглинистых почвах, характеризующихся высокой емкостью катионного обмена, определяющая роль в повышении урожайности культур севооборота принадлежала запасам нитратного азота, в меньшей мере (в 2–3 раза) – запасам аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период их вегетации. Это было связано с полным нахождением нитратного азота в жидкой фазе, аммонийного – с частичным. С облегчением гранулометрического состава и уменьшением емкости катионного обмена переход $N-NH_4$ почвы в жидкую фазу значительно повышался, для диагностики минерального питания растений азотом можно использовать запасы его аммонийной и нитратной форм.

2. В многолетнем стационарном опыте “агрландшафты” подтверждено влияние внесенных минеральных азотных и органических удобрений, повышавшее запасы $N-NO_3$ в почве, выявлены различия в запасах нитратного азота в различных почвенных разностях серых лесных почв и в вариантах систем их обработки.

3. Для первого этапа трансформации удобрений (аммонификации), влияющего на дальнейшие процессы нитрификации, установлены факторы как повышения, так и снижения степени перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу (W). Этот параметр возрастал с увеличением содержания гумуса и уменьшался с ростом содержания в почве аммонийного азота. С повышением емкости катионного обмена в начале наблюдали рост параметра W , затем – его снижение. В начальной области увеличения pH_{KCl} происходило снижение степени перехода аммонийного азота в жидкую фазу, в дальнейшем – ее возрастание. Наиболее заметным влияние величины pH_{KCl} на изученный параметр было характерно для серой лесной средне-оподзоленной почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ненайденко Г.Н.* Рациональное применение удобрений в условиях рыночной экономики. Иваново, 2007. 350 с.
2. *Сычѳв В.Г., Шафран С.А.* Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений. М.: ВНИИА, 2013. 296 с.
3. *Лукин С.М.* Длительные стационарные полевые опыты с органическими удобрениями: значение, результаты и перспективы исследований на дерново-подзолистых почвах // Мат-лы Международ. науч. конф., посвящ. 90-летию ВНИИ агрохимии и 80-летию Географической сети опытов с удобрениями (1–2 декабря 2021 г.) / Под ред. Шкуркина С.И. М.: ВНИИА, 2022. С. 107–116.
4. *Окорков В.В., Фѳнова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности. Суздаль, 2017. 176 с.
5. *Окорков В.В., Фѳнова О.А., Окоркова Л.А.* Серые лесные почвы Владимирского ополья и эффективность использования их ресурсного потенциала. Иваново: ПресСто, 2021. 188 с.
6. *Окорков В.В.* К вопросу о равноценности питания растений нитратным и аммонийным азотом // Агрохимия. 2021. № 12. С. 3–14.
7. *Окорков В.В.* Различия в использовании растениями нитратного и аммонийного азота почвы // Проблемы и вопросы современной науки. Реценз. сб. науч. тр. 2019. № 2(3). Ч. 1. НИЦ МОАН, 2019. С. 66–76.
8. *Okorkov V.V., Okorkova L.A., Shchukin N.N.* Chicken droppings influence on sod-podzolic soil fertility change studying experience // In the scientific collection IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series “Advances in Science for Agriculture “Achievements of Science for the Agro-Industrial Complex”. 2021. P. 012062. Nemchinovka. <https://iop-science.iop.org/issue/1755-1315/843/1>
9. *Окорков В.В., Григорьев А.А., Фѳнова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы применения агрохимических средств на землях с неоднородным почвенным покровом во Владимирском ополье. Владимир: ВО-ОО ВОИ ПУ “Рост”, 2010. 188 с.
10. Практикум по агрохимии / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
11. *Корчагин А.А., Лебедева А.Г., Шукин И.М., Шаркевич В.В., Шукина В.И.* Особенности формирования урожайности яровых зерновых культур и картофеля в погодных условиях 2021 года // Владимир. земледелец. 2022. № 1(99). С. 15–20.
12. *Окорков В.В.* Эффективность систем удобрения под картофель на серых лесных почвах Владимирского ополья // Агрохимия. 2005. № 3. С. 36–43.

Changes in the Content of Mobile Forms of Nitrogen in Gray Forest Soils of Opole under the Influence of Landscape Features of Agricultural Technologies

V. V. Okorkov^{a,#}, I. M. Shchukin^a, L. A. Okorkova^a,
V. I. Shchukina^a, and A. A. Kozlov^a

^aUpper Volga Federal Agrarian Scientific Center
p. Novy, Suzdal district, Vladimir region 601261, Russia

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

In a long-term stationary experiment on gray forest soils of the Vladimir Opole, the influence of agricultural technologies of cultivation of field crops on the content of mobile forms of nitrogen, their relationship with chemical and physico-chemical properties of the soil, levels of intensification has been studied. After a long-term application of agricultural technologies with an increase in the level of fertilizer application, an increase in nitrate nitrogen reserves, the degree of transition of ammonium nitrogen of the soil to the liquid phase from the humus content at the level of a strong relationship was revealed. The content of N-NH₄ in the soil reduced its value. With an increase in the capacity of cation exchange, the value of this parameter changed, passing through the maximum, pH_{KCl} – through the minimum. Changes in the humus content and physico-chemical properties of soil differences of gray forest soils have been established: gray forest plakornaya, gray forest medium-saline, gray forest medium-saline with a second humus horizon.

Key words: gray forest soils, Vladimir opole, humus content, physico-chemical properties, nitrate nitrogen reserves, the degree of transition of ammonium nitrogen to the liquid phase, correlation and regression analysis.

УДК: 631.84:631.816.12

ПОВЫШЕНИЕ ОКУПАЕМОСТИ АЗОТНЫХ ПОДКОРМОК ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОРИГИНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ИХ ОПТИМАЛЬНЫХ ДОЗ

© 2023 г. Ю. Ф. Осипов¹, А. А. Новикова^{1,*}¹Национальный центр зерна им. П.П. Лукьяненко
350000 Краснодар, Центральная усадьба КНИИСХ, Россия

*E-mail: Ana.nov@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2022 г.

После доработки 01.09.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В центральной зоне Краснодарского края РФ, на черноземе предкавказском слабовыщелоченном сверхмощном на базе Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко в течение более 15 лет проводили исследование новых, более эффективных способов расчета оптимальных доз азотных подкормок озимой пшеницы, отличающихся высокой окупаемостью. Методологической основой исследования было предположение о том, что при расчете оптимальных доз азотных удобрений необходимо учитывать исходный уровень эффективного плодородия почвы, состояние агрофитоценоза и планируемую урожайность. Решение поставленной задачи возможно лишь с помощью системного анализа связи урожайности озимой пшеницы с вышеуказанными факторами, построения регрессионной множественной нелинейной математической модели и математического моделирования различных ситуаций при поиске оптимальных доз подкормок. В качестве исходной информации были использованы данные, полученные в многолетних многофакторных полевых опытах, которые завершились разработкой 2-х новых способов определения оптимальных доз азотных подкормок озимых колосовых культур (первой и второй), отвечающих вышеуказанным требованиям. Приведены результаты 3-х летних полевых опытов по изучению эффективности и окупаемости азотных подкормок озимой пшеницы в зависимости от способов их расчета. Агроклиматические условия в годы проведения исследований, хотя и были различными, но в целом оказались относительно благоприятными для получения хорошего урожая озимой пшеницы. В 2015 и 2016 гг. проводили сравнительные испытания эффективности и окупаемости 2-х новых способов расчета оптимальных доз 1-й и 2-й азотных подкормок озимой пшеницы. Для сравнения были выбраны 2 известных, широко применяемых на практике, “табличных” метода (прототипы 1 и 2). В 2015 г. исследование проводили с сортом Гром (предшественник – кукуруза на зерно), в 2016 г. – с сортом Юка (предшественник – озимая пшеница). Показано, что применение оригинальных методов расчета оптимальных доз 1-й и 2-й азотных подкормок озимой пшеницы существенно повышало их эффективность и окупаемость (как 1-й, так и 2-х в сумме) по сравнению с прототипами (на 35–200%), при этом, окупаемость азотных подкормок, дозы которых рассчитаны по прототипам, составляла ~12–14 кг/кг (в среднем за 2 года), а окупаемость подкормок, рассчитанных по оригинальным методикам, – 22–24 кг/кг. В 2021 г. (предшественник – соя, сорта Адель и Баграт) изучили эффективность и окупаемость азотных подкормок при расчете их доз только по оригинальным методикам. Было показано, что даже при высоком уровне урожайности озимой пшеницы в контроле (~60 ц/га в среднем для обоих сортов) применение 2-х азотных подкормок, дозы которых рассчитаны по оригинальным методикам, позволило достичь урожайность озимой пшеницы 80–90 ц/га при их окупаемости ~22 кг зерна/кг д.в. удобрений.

Ключевые слова: озимая пшеница, урожайность, системный анализ, математическое моделирование, определение оптимальных доз азотных подкормок, эффективность и окупаемость удобрений

DOI: 10.31857/S000218812301009X, **EDN:** FDXDNK

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное применение удобрений, их высокая окупаемость очень важны как для отдельного сельскохозяйственного предприятия, так и для всего сельского хозяйства РФ в целом. В то же

время, как указано в работе [1], по этим критериям Россия существенно уступает развитым странам. Усугубляет положение значительный дисбаланс азота, фосфора и калия в почве большинства регионов [2]. В связи с этим, разработка новых,

более точных способов расчета оптимальных доз удобрений, повышающих их эффективность и окупаемость, является весьма актуальной задачей. Под эффективностью подкормок понимаем прирост урожайности озимых колосовых культур в результате их применения.

Исследование эффективности азотных подкормок озимых колосовых культур проводили в течение длительного времени – с 2006 по 2021 г. На основании результатов многолетних и многофакторных полевых опытов было установлено, что существующие способы расчета доз азотных подкормок не достаточно эффективны, т.к. не учитывают влияние ряда существенных факторов и их взаимодействий на усвоение азота и продукционный процесс.

При этом с помощью программы “Множественный нелинейный регрессионный анализ” (программа создана в лаборатории биоматематических методов в КНИИСХ им. П.П. Лукьяненко (г. Краснодар) в 1996 г.) было установлено, что суммарная значимость учетных факторов, используемых при расчете дозы первой азотной подкормки озимой пшеницы по общепринятой методике [3, 4] невелика, и составляет всего 40–50%.

Исходя из этого, была поставлена задача разработать новые способы определения оптимальных доз азотных подкормок. Решение этой задачи было разбито на 2 этапа: первый – построение регрессионных нелинейных множественных моделей связи дисперсии урожайности озимой пшеницы с дисперсией наиболее существенных факторов, а именно: доз азотных подкормок, исходного эффективного плодородия почвы и состояния агрофитоценоза (АФЦ) озимой пшеницы после выхода из зимовки, уровня накопленной биомассы АФЦ и содержания в ней азота (в начале фазы стеблевания); второй этап – поиск оптимальной дозы азотных подкормок (дозы 1-й и 2-й подкормок рассчитывают отдельно) с помощью компьютерной программы “Поиск аргумента по заданной функции”, где аргумент – доза азота (в подкормке), а функция – планируемая урожайность.

Созданные математические модели имеют высокий уровень детерминации (суммарная значимость учтенных факторов составляет 80–90%) и “работают” в определенной агроклиматической зоне. Оптимальные дозы подкормки рассчитывают для каждого конкретного поля отдельно с учетом этапа развития растений, состояния АФЦ, содержания минерального азота, усвояемого фосфора, обменного калия, запасов продуктивной влаги в почве (в дальнейшем (при переходе на

другую модель) для учета влагообеспеченности АФЦ стали использовать такой фактор, как “сумма осенне-зимних осадков” в условиях конкретного года и зоны возделывания) и планируемой урожайности. При этом учитывают и фитоценологические особенности сорта, т.к. в расчет входят элементы структуры АФЦ озимой пшеницы, в которой отражаются особенности генотипа. Первоначально были использованы математические модели, где функцией была искомая доза азотной подкормки, а для ее определения применяли программу “Excel” [5, 6]. В дальнейшем, по ряду причин, стали использовать математические модели, где функцией является планируемая урожайность, а аргументами (в числе прочих) – искомые дозы азотных подкормок, которые вычисляют с помощью программы “Поиск аргумента по заданной функции”. Эти способы расчета уже применяли в ряде сельскохозяйственных предприятий Краснодарского края. В статье приведены результаты трехлетних исследований (2014/2015, 2015/2016, 2020/2021 гг.).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые опыты размещали на экспериментальных полях Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко в центральной зоне Краснодарского края. Климат зоны, где проводили опыты, умеренно-континентальный, с умеренным, но не устойчивым увлажнением, почва – чернозем предкавказский слабо выщелоченный сверхмощный [7].

Опыты проведены на делянках площадью в 15–20 м² (в разные годы) в пятикратной полевой повторности, делянки располагались систематически-рэндомизированно. В качестве предшественников использовали кукурузу на зерно (2015 г.), озимую пшеницу (2016 г.) и сою (2021 г.).

С целью исключения влияния сортоспецифичности (генотипической составляющей реакции сорта на уровень азотного питания) и в связи с сортосменной (при районировании) в опытах использовали несколько сортов озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.): в 2015 г. – Гром; в 2016 г. – Юка и в 2021 г. – Баграт и Адель. Все сорта озимой пшеницы, использованные в опытах, выведены в НЦЗ им. П.П. Лукьяненко, они были районированы в центральной зоне Краснодарского края, обладают высокой потенциальной урожайностью (до 100 ц/га) и средней устойчивостью к экстремальным условиям среды и фитопатогенам.

В 2015 и 2016 годах эффективность новых способов расчета оптимальных доз азотных подкормок

мок изучали в сравнении с 2-мя стандартами (St_1 и St_2), где St_1 – вариант опыта, в котором азотные подкормки не применяли, St_2 – вариант опыта, где использовали азотные подкормки, дозы которых были рассчитаны традиционными методами (прототипы) [3, 4]. В 2021 г. использовали только St_1 .

При изучении эффективности первой азотной подкормки, удобрения вносили в период начала весенней вегетации растений (конец февраля – начало марта) по следующей схеме, варианты: 1 (St_1) – подкормку не вносили, 2 (St_2) – подкормку вносили, ее дозу рассчитывали по прототипу 1, 3 – подкормку вносили, ее дозу рассчитывали по оригинальному методу 1.

При изучении эффективности 2-х азотных подкормок удобрения вносили по следующей схеме, варианты: 1 (St_1) – подкормки не вносили, 2 (St_2) – подкормки вносили (первую и вторую), расчет доз производили по прототипам 1 и 2, 3 – подкормки вносили (первую и вторую), расчет доз производили по оригинальным методам 1 и 2. При этом первую подкормку вносили как указано выше, а вторую – в фазе стеблевания (IV–V этапы органогенеза по Куперман [8]).

В качестве удобрений использовали N_{aa} (34%), АФ (12 и 50%), K_x (60%). В 2015 и 2016 гг. дозы подкормок рассчитывали как по прототипам 1 и 2, так и по оригинальным методам 1 и 2, в 2021 г. – только оригинальными методами. Остальная агротехника соответствовала рекомендациям, принятым для центральной зоны Краснодарского края.

Эффективное плодородие почвы определяли в 2-х слоях: 0–20 и 20–40 см. Нитратный азот ($N-NO_3$) определяли ионометрическим методом (ГОСТ-26951-86), азот аммония ($N-NH_4$) – по ГОСТ-26489-85, содержание усвояемых форм фосфора и обменного калия – по Мачигину (ГОСТ-26205-97).

Влагообеспеченность АФЦ озимой пшеницы перед расчетом дозы первой азотной подкормки определяли по сумме осенне-зимних осадков (за IX–XII и I–II месяцы), выпавших на конкретных полях института в конкретном сельскохозяйственном году (по данным метеопоста НЦЗ им. П.П. Лукьяненко).

Оценку состояния агрофитоценоза (АФЦ) озимой пшеницы проводили согласно методикам, разработанным ранее (Методики разработаны в отделе физиологии и биофизики растений КНИИСХ им. П.П. Лукьяненко, Заключительный отчет “Модель сорта озимой пшеницы”, 1986 г.). В частности, определение густоты АФЦ и удель-

ной биомассы АФЦ озимой пшеницы производили на 2-х учетных площадках (по 0.25 м²) на каждой из 3-х несмежных полевых повторностей. Определение густоты АФЦ (стеблей/м²) перед 1-й азотной подкормкой озимой пшеницы проводили в начале весеннего отрастания растений (III–IV этап органогенеза) путем их выкапывания и подсчета общего количества стеблей (длиной >1 см) и в среднем в варианте опыта для каждого из сортов.

Определение удельной биомассы АФЦ (г/м²) перед 2-й азотной подкормкой озимой пшеницы проводили в начале стеблевания растений (IV–V этап органогенеза) путем выкапывания растений с учетных площадок, отделением надземной биомассы от подземной (отделением надземной части каждого стебля от подземной проводили по границе между зеленой и белой частью стебля) и взвешиванием полученной биомассы с дальнейшим расчетом величины удельной биомассы АФЦ в среднем в варианте. Одновременно с этим проводили определение содержания общего азота в биомассе озимой пшеницы (по Кьельдалю, ГОСТ 13496.4-93). Биологическую урожайность озимой пшеницы определяли в период восковой спелости (XII этап органогенеза) путем скашивания растений на 2-х учетных площадках во всех повторностях каждого варианта, подсушивания снопов и обмолотом их на стационарной молотилке, взвешиванием зерна и расчетом средней урожайности в варианте и сорта с приведением ее к базисной влажности 14%.

В 2014/2015 сельскохозяйственном году погодные условия были благоприятными для роста и развития растений озимой пшеницы, но отличались рядом особенностей. В частности, осень выделялась ранним наступлением холодов, зима, напротив, была теплее обычного. Сумма осадков за осенне-зимний период 2014/2015 г. составила 297.8 мм, что было на 16% меньше среднемноголетней. Гидротермический режим в весенние месяцы был близок к среднемноголетним показателям, а лето (июнь) отличалось большим количеством осадков и теплой погодой. Агротехнический анализ пахотного слоя почвы перед закладкой опыта показал, что содержание нитратного азота в почве было очень низким (2.9 мг/кг), усвояемого фосфора – очень высоким (64 мг/кг), обменного калия – высоким (472 мг/кг); реакция почвенного раствора – слабокислой (рН_{KCl} 5.3).

В 2015/2016 г. погодные условия были также благоприятными для озимой пшеницы. Осень отличалась повышенным температурным режимом и большим количеством осадков. Зима была мяг-

Таблица 1. Эффективность 1-й азотной подкормки озимой пшеницы при различных способах расчета ее дозы

Год	Предшественник	Сорт	Вариант, №	Основное удобрение, кг д.в./га	Подкормка, кг N/га	Урожайность, ц/га	Прибавка урожайности**		Способ расчета доз подкормок
							ц/га	%	
2015	Кукуруза на зерно	Гром	1 (St ₁)	N0P0K0*	0	56.0	–	–	–
			2 (St ₂)		35	58.6	2.6	4.6	Прототип 1
			3***		50	67.6	11.6	20.7	Оригинальный способ 1
2016	Озимая пшеница	Юка	1 (St ₁)	N0P0K0*	0	33.7	–	–	–
			2 (St ₂)		90	52.9	19.2	57.0	Прототип 1
			3		72	59.4	25.7	76.3	Оригинальный способ 1
2021	Соя	Адель	1 (St ₁)	N20P50K100	0	63.1	–	–	–
			3		70	79.2	16.1	25.5	Оригинальный способ 1
			1 (St ₁)		0	57.0	–	–	–
		3	57		78.9	21.9	38.4	Оригинальный способ 1	
		Баграт	1 (St ₁)		0	57.0	–	–	–
			3		57	78.9	21.9	38.4	Оригинальный способ 1

*В эти годы основное удобрение не вносили в связи с высоким исходным содержанием в почве усвояемого фосфора и обменного калия.

**По сравнению с вариантом 1 (St₁).

***Вариант 3 – оригинальный метод 1.

2015 г. – 3.6

2015 г. – 4.7

P, % 2016 г. – 4.3

HCP₀₅, ц/га

2016 г. – 5.7

2021 г. – 4.5

2021 г. – 6.0

кой (теплее обычного). За осенне-зимний период 2015/2016 г. выпало 402 мм осадков, что на 14% больше среднесуточного показателя (353 мм). Начало весенней вегетации наступило раньше обычных сроков. Лето отличалось значительным количеством осадков в период налива зерна, что вызвало его “стекание”, ухудшение качества и некоторое снижение урожайности.

Агрохимический анализ пахотного слоя почвы перед посевом показал, что содержание нитратного азота в нем было очень низким (1.7 мг/кг); усвояемого фосфора – очень высоким (120 мг/кг), обменного калия – высоким (492 мг/кг). Реакция почвы – слабокислая (рН_{KCl} 5.1).

В 2020/2021 г. метеорологические условия в целом оказались благоприятными для формирования высокой урожайности озимой пшеницы. Осень характеризовалась повышенным температурным режимом (15.4°C при среднесуточной норме 11.7°C) и недостаточным количеством

осадков. Зима была теплой со среднесуточной температурой 2.2°C. Количество осадков за осенне-зимний период было ниже среднесуточного уровня на 15% и составило 298.3 мм. В весенне-летние месяцы гидротермический режим был близок к оптимальному и соответствовал биологическим потребностям озимой пшеницы.

Агрохимический анализ пахотного слоя почвы (0–20 см) перед посевом показал, что содержание нитратного азота в почве находилось на очень низком уровне (3.5 мг/кг), а содержание доступного фосфора и обменного калия – на повышенном (48 и 322 мг/кг соответственно).

Следует отметить, что погодные условия в годы исследований, несмотря на их большое варьирование, в целом были благоприятными для получения хорошей урожайности озимой пшеницы. При этом агрохимические условия проведения опытов отличались рядом особенностей; в частности, содержание нитратов в почве в годы иссле-

Таблица 2. Эффективность 2-х азотных подкормок озимой пшеницы при различных способах расчета их доз

Год	Предшественник	Сорт	Вариант, №	Основное удобрение, кг д.в./га	Подкормки, кг N/га			Урожайность, ц/га	Прибавка урожайности от 2-х подкормок*		Способ расчета доз подкормок
					1-я	2-я	Σ		ц/га	%	
2015	Кукуруза на зерно	Гром	1 (St ₁)	N0P0K0	0	0	0	56.0	–	–	–
			2 (St ₂)		35	38	73	62.6	6.6	11.8	Прототипы**
			3		50	50	100	72.4	16.4	29.3	Оригинальные способы***
2016	Озимая пшеница	Юка	1 (St ₁)	N0P0K0	0	0	0	33.7	–	–	–
			2 (St ₂)		90	35	125	53.6	19.9	59.0	Прототипы
			3		72	45	117	66.6	32.9	97.6	Оригинальные способы
2021	Соя	Адель	1 (St ₁)	N20P50K100	0	0	0	61.3	–	–	–
			3		70	56	120	90.3	27.2	43.1	Оригинальные способы
		Баграг	1 (St ₁)		0	0	0	57.0	–	–	–
			3		57	53	110	81.5	24.5	43.0	Оригинальные способы

*По сравнению с вариантом 1 (St₁).

**Прототип 1 и прототип 2.

***Оригинальный способ 1 и оригинальный способ 2.

дования под всеми предшественниками было очень низким, фосфора – очень высоким, обменного калия – повышенным, что свидетельствовало о несбалансированности исходного эффективного плодородия почвы.

Статистическую обработку опытных данных проводили по [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многие исследователи [10, 11] указывают на то, что эффективность азотных удобрений существенно зависит от исходного содержания минерального азота и подвижных форм фосфора в почве, однако, они не предлагают способов расчета оптимальных доз азотных удобрений, в которых количественно учитывались бы эти закономерности.

Методы, которые предложены в данной работе, включают взаимодействие факторов исходного эффективного плодородия почвы и содержания азота в подкормках озимой пшеницы, что приводит к повышению эффективности и окупаемости азотных удобрений. В частности, использование этих методов при расчете доз 1-й и 2-й азотных подкормок озимого ячменя (в опытах) позволило получить в 2019 г. после предшествен-

ника кукурузы на зерно очень высокий урожай (>110 ц/га) с окупаемостью ~24 кг зерна/кг д.в. удобрений.

Изучение влияния азотных подкормок на урожайность озимой пшеницы в 2015 и 2016 гг. (табл. 1, 2), когда для расчета доз подкормок применяли как табличные [3, 4], так и оригинальные [5, 6] способы, выявило явные преимущества последних. В 2015 г. (предшественник – кукуруза на зерно, сорт Гром) первая азотная подкормка, доза которой была рассчитана по прототипу 1 (“табличный метод”, вариант 2), привела к увеличению урожайности на 2.6 ц/га, что оказалось меньше HCP_{05} в опыте. Подкормка, которая была рассчитана оригинальным методом 1 (вариант 3), привела к достоверному увеличению урожайности на 11.6 ц/га, т.е. ее эффективность оказалась выше на 9 ц/га. В 2016 г. (предшественник – озимая пшеница, сорт Юка) применение первой азотной подкормки значительно увеличило урожайность озимой пшеницы (как при расчете ее дозы по прототипу, так и при расчете оригинальным методом), что, вероятно, было связано с большим дефицитом азота и высоким содержанием фосфора в почве весной на этом участке. Однако при использовании известного метода расчета (прототип 1, вариант 2), урожайность вы-

Таблица 3. Окупаемость азотных подкормок озимой пшеницы при использовании типовых (прототипов) и оригинальных методов расчета их доз, кг зерна/кг азота удобрений

Год	Предшественник	Сорт	Вариант	Методы расчета доз азотных подкормок*	Дозы подкормок, кг N/га			Прибавка урожайности после подкормок, ц/га		Окупаемость подкормок, кг/кг	
					1-я	2-я	Σ	1-й	2-х	1-й	2-х
2015	Кукуруза на зерно	Гром	1 (St ₁)	I	35	38	73	2.6	6.6	7.4	9.0
			2	II	50	50	100	11.6	16.4	23.2	16.4
2016	Озимая пшеница	Юка	1 (St ₁)	I	90	35	125	19.2	19.9	21.3	15.9
			2	II	72	45	117	25.7	32.9	35.7	28.1
Среднее			1 (St ₁)	I	—	—	—	—	—	14.4	12.4
			2	II	—	—	—	—	—	29.4	22.2

*Методы расчета: I – прототипы 1 и 2, II – оригинальные методы 1 и 2.

росла на 19.2 ц/га, а при использовании оригинального метода I (вариант 3) – на 25.7 ц/га, т.е. прибавка урожайности в этом случае была больше на 6.5 ц/га.

В 2021 г. после хорошего предшественника сои и при выращивании новых сортов озимой пшеницы (Адель и Баграт), еще раз была проверена эффективность разработанного оригинального метода I. Он оказался весьма эффективным, прирост урожайности после первой азотной подкормки составил 16.1 и 21.9 ц/га (для сортов Адель и Баграт соответственно).

Анализируя результаты опытов, где проводили 2 азотные подкормки озимой пшеницы (табл. 2), можно отметить их схожесть с результатами, описанными выше. В частности, когда расчет дозы подкормок проводили с помощью оригинальных методов 1 и 2, увеличение урожайности озимой пшеницы было больше, чем при расчете доз подкормок традиционными методами (прототипы 1 и 2). Например, в 2015 г. прибавка урожайности сорта Гром была равна 16.4 и 6.6 ц/га или в 2.5 раза больше. В 2016 г. прибавка урожайности сорта Юка составила 32.9 и 10.9 ц/га, то есть больше в 1.65 раза.

В 2021 г. (предшественник – соя, сорта Адель и Баграт) при изучении эффективности азотных подкормок применяли только оригинальные методы их расчета [5, 6] (табл. 2). При этом, в связи с существенным изменением климата (увеличением среднегодового количества осадков в зоне Северного Кавказа), была повышена планируемая урожайность в опыте. Показано, что применение оригинальных способов расчета доз азот-

ных подкормок позволило получить значительную прибавку урожайности: 27.2 и 24.5 ц/га для сортов Адель и Баграт соответственно и достичь высокой урожайности (~85 ц/га в среднем для обоих сортов). Таким образом, несмотря на то что в опытах использовали различные предшественники и сорта, полученные результаты четко указали на преимущество оригинальных методов расчета доз азотных подкормок.

Для того чтобы более корректно оценить результаты вышеописанных опытов, был проведен расчет окупаемости 1 кг д.в. азота удобрений прибавкой урожайности зерна озимой пшеницы (кг зерна/кг азота удобрений).

Показано (табл. 3), что окупаемость первой азотной подкормки, доза которой была рассчитана по прототипу 1 (за 2 года опыта) оказалась равной 14.4 кг/кг, а окупаемость подкормки, доза которой была рассчитана оригинальным методом 1, увеличилась до 29.4 кг/кг, т.е. фактически была в 2 раза больше.

Окупаемость 2-х азотных подкормок озимой пшеницы при расчете дозы по прототипам 1 и 2 составила 12.4 кг/кг, при использовании оригинальных методов 1 и 2 – 22.2 кг/кг, т.е. была прослежена та же закономерность. В 2021 г. после предшественника сои, при возделывании новых сортов озимой пшеницы и использовании только новых методов расчета доз подкормок расчет окупаемости азотных подкормок (табл. 4) показал ее высокий уровень: 30.6 кг/кг – после первой подкормки и 21.9 кг/кг – после 2-х азотных подкормок, что подтвердило результаты, полученные в 2015 и 2016 гг.

Таблица 4. Окупаемость азотных подкормок озимой пшеницы при использовании только оригинальных методов расчета их доз (1 и 2), кг зерна/кг азота удобрений (2021 г., предшественник соя)

Сорт	Дозы подкормки, кг N/га			Прибавка урожайности после подкормок, ц/га		Окупаемость подкормок, кг/кг	
	1-й	2-й	Σ	1-й	2-х	1-й	2-х
Адель	70	56	126	16.0	27.1	22.9	21.5
Багра́т	57	53	110	21.9	24.5	38.4	22.3
Среднее	—	—	—	—	—	30.6	21.9

Следует отметить, что, как правило, эффективность и окупаемость 2-й азотной подкормки (следовательно, и двух в сумме) бывает ниже, чем первой подкормки, по 3-м причинам: она стимулирует развитие менее весомого компонента структуры урожая, чем первая подкормка (соответственно – озерненность колоса и густоту продуктивного стеблестоя), ее воздействие проходит при более сложных гидротермических условиях и, наконец, доза 2-й азотной подкормки зависит от дозы первой, т.к. компоненты АФЦ, на которые влияют эти подкормки, биологически отрицательно связаны между собой (чем гуще стеблестой, тем меньше озерненность колоса).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что поставленные задачи по созданию более эффективных способов расчета оптимальных доз азотных подкормок озимых колосовых культур решены. Разработаны и запатентованы: “Способ определения оптимальной дозы первой азотной подкормки озимых колосовых культур” и “Способ определения оптимальной дозы второй азотной подкормки озимых колосовых культур”, которые существенно превышают по эффективности и окупаемости (в 1.5–2.0 раза) используемые в производстве в настоящее время методы расчета доз азотных подкормок.

Применение обоих оригинальных способов при расчете оптимальных доз первой и второй азотных подкормок озимой пшеницы повышает их суммарную эффективность, что выражается в значительном приросте ее урожайности (до 30 ц/га). При этом существенно (в 1.5–2.0 раза) повышается и окупаемость удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алейнов Д.П.* А готово ли наше сельское хозяйство использовать минеральные удобрения? // Эконом. сел.-хоз. и перерабат. предприятий. 2009. № 1. С. 6–11.
2. *Кудеяров В.Н.* Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // Агрохимия. 2018. № 10. С. 3–11.
3. Уход за посевами озимых колосовых культур зимой и ранней весной. Рекомендации. Краснодар, 2000. С. 17–21.
4. Системы удобрения основных полевых культур. Рекомендации. Краснодар, 2001. С. 7–9.
5. *Осипов Ю.Ф., Каленич В.И., Загородняя Т.М., Мариничева В.А., Кулик В.А., Неженец А.В.* Способ определения оптимальной дозы первой азотной подкормки озимых колосовых культур: Пат. 2609909, РФ // Б.И. 2017. № 2015115628. С. 4.
6. *Осипов Ю.Ф., Каленич В.И., Кузнецова Т.Е., Серкин Н.В., Васюков П.П., Новикова А.А., Алифференко Ю.С., Иваницкий Я.В.* Способ определения оптимальной дозы второй азотной подкормки озимых колосовых культур: Пат. 2728239, РФ // Б.И. 2020. № 2019143032. С. 4.
7. *Эйсерт Э.К., Ачканов А.Я., Дургарьян Н.Г., Мостовой О.М., Феоктистова А.Л., Хомутов Ю.В., Эйсерт Б.Э.* Справочник агрохимика Кубани. Краснодар. кн. изд-во, 1987. 718 с.
8. *Куперман Ф.М., Дворянкин Ф.А., Ржанова Е.И., Ростовцева Е.Л.* Этапы формирования органов плодоношения злаков. Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1995. 319 с.
9. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
10. *Шафран С.А., Козеичева Е.С.* Продуктивность озимого ячменя и окупаемость азотных удобрений в зависимости от содержания элементов минерального питания в основных типах почв России // Агрохимия. 2016. № 3. С. 11–22.
11. *Ерошенко Ф.В., Ерошенко А.А., Шестакова Е.О., Давидянц Э.С., Сторчак И.Г., Семенюк О.В.* Азотные подкормки растений озимой пшеницы в условиях Ставропольского края // Полеводство и луговодство. 2017. № 8. С. 18–20.
12. *Осипов Ю.Ф., Каленич В.И., Новикова А.А., Алифференко Ю.С., Шаповалова Е.В., Кузнецова Т.Е., Серкин Н.В.* Новые способы расчета доз азотных подкормок озимых колосовых культур // Плодородие. 2021. № 2. С. 21–25.

Increasing the Payback of Nitrogen Fertilizing of Winter Wheat with the Use of Original Methods for Calculating Their Optimal Doses

Yu. F. Osipov^a and A. A. Novikova^{a,#}

^a*P.P. Lukyanenko National Grain Center, Central estate of KNIISH
Krasnodar 350000, Russia*

[#]*E-mail: Ana.nov@mail.ru*

In the central zone of the Krasnodar Territory of the Russian Federation, on the pre-Caucasian low-leached heavy-duty chernozem on the basis of the P.P. Lukyanenko National Grain Center, for more than 15 years, new, more effective methods for calculating optimal doses of nitrogen fertilizing of winter wheat, characterized by high payback, have been studied. The methodological basis of the study was the assumption that when calculating optimal doses of nitrogen fertilizers, it is necessary to take into account the initial level of effective soil fertility, the state of agrophytocenosis and the planned yield. The solution of this problem is possible only with the help of a systematic analysis of the relationship of winter wheat yield with the above factors, the construction of a regression multiple nonlinear mathematical model and mathematical modeling of various situations in the search for optimal doses of top dressing. As initial information, the data obtained in long-term multifactorial field experiments were used, which resulted in the development of 2 new methods for determining the optimal doses of nitrogen fertilizing of winter crops (first and second) that meet the above requirements. The results of 3-year field experiments to study the effectiveness and payback of nitrogen fertilizing of winter wheat, depending on the methods of their calculation, are presented. The agro-climatic conditions at the time of the research, although they were different, but in general turned out to be relatively favorable for obtaining a good harvest of winter wheat. In 2015 and 2016, comparative tests of the effectiveness and payback of 2 new methods for calculating the optimal doses of the 1st and 2nd nitrogen fertilizing of winter wheat were carried out. For comparison, 2 well-known, widely used in practice, “tabular” methods were selected (prototypes 1 and 2). In 2015, the study was carried out with the Grom variety (predecessor – corn for grain), in 2016 – with the Yuca variety (predecessor – winter wheat). It is shown that the use of original methods for calculating optimal doses of 1st and 2nd nitrogen fertilizing of winter wheat significantly increased their efficiency and payback (both 1st and 2nd in total) compared with the prototypes (by 35–200%), at the same time, the payback of nitrogen top dressing, the doses of which were calculated from the prototypes, was ~12–14 kg/kg (on average for 2 years), and the payback of top dressing calculated according to the original methods was 22–24 kg/kg in 2021 (forerunner – soy, Adel and Bagrat varieties) studied the effectiveness and payback of nitrogen fertilizing when calculating their doses only by original methods. It was shown that even with a high level of yield of winter wheat in the control (~60 c/ha on average for both varieties), the use of 2 nitrogen fertilizing, the doses of which are calculated according to the original methods, allowed to achieve a yield of winter wheat of 80–90 c/ha with a payback of ~22 kg grains/kg of N fertilizers.

Key words: winter wheat, yield, system analysis, mathematical modeling, determination of optimal doses of nitrogen fertilizing, efficiency and payback of fertilizers.

УДК 633.15:631.8:631.559

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОТЗЫВЧИВОСТИ ГИБРИДОВ КУКУРУЗЫ НА АЗОТНОЕ УДОБРЕНИЕ

© 2023 г. И. Н. Ивашененко¹, В. Н. Багринцева^{1,*}¹Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы
357528 Пятигорск, ул. Ермолова, 14б, Россия

*E-mail: maize-techno@mail.ru

Поступила в редакцию 13.05.2022 г.

После доработки 26.05.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

Разработан способ оценки отзывчивости кукурузы на азотное удобрение. Во Всероссийском научно-исследовательском институте кукурузы в 2012–2015 гг. изучали гибриды кукурузы разных групп спелости по признаку отзывчивости на азотное удобрение. Гибриды кукурузы выращивали в полевом опыте на 2-х фонах: 1 – контроль без удобрения и 2 – N60. В качестве количественных признаков отзывчивости на удобрение использовали высоту растений в фазе цветения, урожайность зеленой массы в фазе молочно-восковой спелости и зерна в фазе полной спелости. Показатель реакции кукурузы на азотное удобрение рассчитывали по формуле:

$$Pr = \frac{(vr_2 - vr_1)}{vr_1} \times 100 + \frac{(zm_2 - zm_1)}{zm_1} \times 100 + \frac{(uz_2 - uz_1)}{uz_1} \times 100,$$

где Pr – показатель реакции на азотное удобрение; vr_1 , vr_2 – высота растений кукурузы соответственно в контроле и на удобренном фоне; zm_1 , zm_2 – урожайность зеленой массы в молочно-восковой спелости кукурузы в контроле и на удобренном фоне; uz_1 , uz_2 – урожай зерна образцов кукурузы в контроле и на удобренном фоне. По показателям реакции на азотное удобрение выявлены высокоотзывчивые формы кукурузы: гибриды Машук 355 МВ и Машук 390 МВ. Способ оценки отзывчивости кукурузы на азотное удобрение защищен патентом № 2744730 от 15 марта 2021 г.

Ключевые слова: азотное удобрение, кукуруза, гибрид, отзывчивость, метод оценки.

DOI: 10.31857/S0002188122110072, EDN: FEAQEQ

ВВЕДЕНИЕ

Применение минеральных удобрений под кукурузу является эффективным приемом увеличения не только урожайности, но и их окупаемости зерном [1–3]. Среди минеральных удобрений азотные играют главную роль в питании кукурузы [4–6]. В свою очередь, исследования показывают, что удобрения оказывают неодинаковое действие на урожайность разных гибридов кукурузы. Это обусловлено прежде всего заложенным в гибриде агрохимическим эффективным потенциалом. В ходе проведенных исследований выявлена генотипическая специфика сортов и гибридов кукурузы в отношении отзывчивости на азотные удобрения [7].

В связи с этим стоит задача разработки и использования метода оценки кукурузы, который позволил бы повысить эффективность селекции при создании гибридов кукурузы, хорошо использующих минеральные вещества удобрений.

Научных исследований по методике отбора ценного в данном направлении исходного селекционного материала кукурузы в России нет. Известен способ отбора высокопродуктивных растений ячменя на ранних этапах онтогенеза [8]. Оценка отзывчивости образцов ячменя проводили в лабораторных условиях по величине прироста корней между 12-ми и 7-ми сут при выращивании проростков на среде Кнопа, обогащенной азотом. Другая методика ранней диагностики отзывчивости зерновых злаков на дозы минеральных удобрений, основанная на использовании рулонного метода, предложена в работе [9]. В работе [10] в лабораторных условиях был разработан способ отбора генотипов кукурузы, отзывчивых на азотное удобрение, по скорости реакции фотофосфорилирования в хлоропластах, выделенных из 2-го яруса листьев растений кукурузы 2-недельного возраста.

Недостатком названных способов является то, что отбор производили на начальных этапах онтогенеза растений и в контролируемых условиях.

Наиболее точным и упрощенным техническим решением в проведении отбора образцов и их оценки является способ, предложенный в работе [11]. Данный метод основан на учете изменчивости количественных признаков, определяющих продукционную способность растений. У зерновых культур для определения реакции сорта на высокий фон питания авторы брали такие количественные признаки как число продуктивных побегов на единице площади, зерен в колосе или метелке и массу 1000 зерен. К недостаткам описанного способа оценки реакции растений на удобрения относится невозможность его применения на кукурузе. Цель работы – разработать способ оценки отзывчивости кукурузы на азотное удобрение, который должен быть основан на количественной оценке степени влияния удобрения на хозяйственно ценные признаки кукурузы, являющиеся ключевыми для создания новых высокопродуктивных гибридов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на опытном поле Всероссийского научно-исследовательского института кукурузы в Ставропольском крае. В 2012–2015 гг. изучили гибриды кукурузы разных групп спелости по признаку отзывчивости на азотное удобрение.

В полевом опыте гибриды кукурузы выращивали на 2-х фонах: 1 – контроль без удобрения и 2 – N60. Азотное удобрение в форме аммиачной селитры вносили весной под первую культивацию. Почва опытного участка – чернозем обыкновенный карбонатный мощный тяжелосуглинистый. Объемная масса 1-метрового слоя почвы в среднем составляла 1.25 г/см³. Реакция почвенного раствора гумусового горизонта – щелочная (рН_{Н₂О} 7.5). Содержание гумуса в слое 0–20 см почвы было равно ≈4.7%.

Содержание элементов питания в почве определяли, когда кукуруза была в фазе 5-ти листьев. В среднем за 2012–2015 гг. в слое 0–20 см почвы содержание нитратного азота по Грандваль–Ляжу в варианте без удобрения (контроле) было равно 21.2, подвижного фосфора по Мачигину – 14, обменного калия по Мачигину – 259 мг/кг почвы, в варианте с удобрением (N60) – соответственно 33.7, 14 и 279 мг/кг.

Предшественником кукурузы была озимая пшеница, высеванная после сои. Кукурузу сеяли в

2012–2015 гг. 25–29 апреля. На всех делянках опыта в фазе 2–3-х листьев формировали оптимальную для каждого гибрида густоту стояния растений – 60–80 тыс. шт./га. Для защиты от сорных растений применяли гербициды Мерлин 0.150 кг/га или Аденго 0.5 л/га.

В течение вегетации проводили измерение высоты растений (в фазе цветения), учет урожая зеленой массы (в фазе молочно-восковой спелости) и зерна (в фазе полной спелости). Полученные данные количественных признаков использовали в расчете показателя реакции на азотное удобрение, на основе чего давали оценку отзывчивости гибридов кукурузы на азотное удобрение.

Учеты и наблюдения выполняли в соответствии с методикой ВНИИ кукурузы [12]. Статистическая обработка данных осуществлена по методике [13].

В зоне проведения опыта среднее многолетнее количество осадков за период вегетации кукурузы (май–сентябрь) составляет 343 мм, в том числе: в мае – 79, июне – 87, июле – 70, августе – 59, сентябре – 48 мм. Сумма осадков за период вегетации в 2012 г. составила 378 мм, в 2013 г. – 507 мм, в 2014 г. – 367 мм, в 2015 г. – 286 мм. Решающее значение для кукурузы имеют осадки, выпадающие в июле (критический период развития). По годам исследования условия увлажнения в этом месяце самыми благоприятными для кукурузы были в 2013 г. (201 мм), благоприятными – в 2012 г. (157 мм), относительно благоприятными – в 2014 г. (35 мм) и неблагоприятными – в 2015 г. (3 мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Увеличение высоты растений от внесения азотного удобрения к фазе цветения наблюдали у всех гибридов кукурузы (табл. 1). В 2012 г. высота растений в среднем для гибридов кукурузы на фоне без удобрения составила 235, в 2013 г. – 218, в 2014 г. – 224 и в 2015 г. – 248 см. Под влиянием внесения N60 она существенно увеличилась до 242, 226, 230 и 258 см соответственно. Наибольший прирост наблюдали в 2015 г., за счет обилия осадков в период активного роста растений (май–июнь). В среднем за 4 года, как и по годам исследования, гибриды по-разному реагировали на азот. Наибольшее увеличение высоты отмечено у среднеранних гибридов Ньютон и Машук 250 СВ – на 9 см и среднепозднего Бештау – на 11 см, наименьшее – раннеспелого Машук 170 МВ – на 6 см и среднеспелого Машук 390 МВ – на 5 см.

Применение азотного удобрения оказывало существенное влияние на увеличение урожайно-

Таблица 1. Влияние азотного удобрения на высоту растений гибридов кукурузы

Гибрид	Высота растений, см					Прибавки (среднее)	
	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	среднее	см	%
Без удобрения (контроль) – фактор A_1							
Машук 170 МВ	225	202	218	259	226	–	–
Машук 175 МВ	223	199	215	247	221	–	–
Ньютон	205	194	204	237	210	–	–
Машук 250 СВ	236	214	224	251	231	–	–
Машук 350 МВ	255	232	224	241	238	–	–
Машук 355 МВ	259	243	246	268	254	–	–
Машук 360 МВ	224	210	219	227	220	–	–
Машук 390 МВ	225	214	222	238	225	–	–
Бештау	266	250	245	263	256	–	–
N60 – фактор A_2							
Машук 170 МВ	226	209	224	267	232	6	3
Машук 175 МВ	236	204	217	257	229	8	4
Ньютон	216	202	207	250	219	9	4
Машук 250 СВ	240	231	229	260	240	9	4
Машук 350 МВ	259	241	229	252	245	7	3
Машук 355 МВ	264	248	255	280	262	8	3
Машук 360 МВ	230	222	224	231	227	7	3
Машук 390 МВ	228	220	226	247	230	5	2
Бештау	275	256	263	274	267	11	4
HCP_{05} фактора A , см	5	4	3	3	6		
HCP_{05} фактора B , см	11	9	6	7	13		
HCP_{05} факторов $A \times B$, см	16	13	9	10	19		

сти зеленой (вегетативной) массы кукурузы за исключением гибридов: Машук 170 МВ (в 2012–2014 гг.), Машук 250 СВ (в 2013–2014 гг.), Машук 360 МВ (в 2012–2013 гг.), Машук 175 МВ (в 2012 г.), Машук 350 МВ (в 2015 г.) и Бештау (в 2015 г.) (табл. 2).

В 2012 г. прибавка урожайности зеленой массы гибридов варьировала от 4.8 (Ньютон) до 11.5 т/га (Машук 250 СВ), в 2013 г. – от 3.7 (Машук 390 МВ) до 9.3 т/га (Машук 355 МВ), в 2014 г. – от 4.3 (Машук 350 МВ) до 7.8 т/га (Ньютон), в 2015 г. – от 0.2 (Машук 350 МВ) до 9.8 т/га (Машук 250 СВ). В среднем за 4 года за счет удобрения наибольшее существенное увеличение зеленой массы наблюдали у среднеспелых форм кукурузы Машук 355 МВ и Машук 390 МВ (на 17%), среднеранних – Ньютон (на 16%), Машук 250 СВ (на 14%). Несущественной была прибавка у гибридов Машук 170 МВ и Машук 360 МВ.

Одним из лимитирующих факторов, оказывающих влияние на урожайность зеленой массы кукурузы, является количество осадков, выпавших

в июле: чем меньше осадков выпадало за этот месяц, тем меньше была урожайность, что подтверждено ранее проведенным исследованием [14]. В среднем в зависимости от фона удобренности в 2012 г. вегетативная масса гибридов кукурузы составила 47.9, в 2013 г. – 46.5, в 2014 г. – 43.9, в 2015 г. – 39.5 т/га.

В среднем для всех гибридов прибавка урожая зерна от удобрения в 2012 г. составила 0.37 (4%), в 2013 г. – 0.41 (4%), в 2014 г. – 0.40 (6%), в 2015 г. – 0.30 т/га (5%). В 2012 г., несмотря на несущественное влияние удобрения, наибольшую достоверную прибавку урожая зерна дали гибриды Машук 175 МВ и Ньютон – 9%. Наибольшее увеличение урожайности зерна от азотного удобрения в 2012 г. наблюдали у раннеспелого гибрида Машук 175 МВ и среднераннего гибрида Ньютон (на 9%) в 2013 г. – среднераннего гибрида Машук 250 СВ (на 8%) и среднепозднего гибрида Бештау (на 7%), в 2014 г. – среднеспелых гибридов Машук 355 МВ и Машук 360 МВ (на 8%) и среднепозднего гибрида Бештау (на 12%), в 2015 г. – среднеран-

Таблица 2. Влияние азотного удобрения на урожайность зеленой массы в фазе молочно-восковой спелости гибридов кукурузы

Гибрид	Урожайность, т/га					Прибавки в среднем	
	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	в среднем	т/га	%
Без удобрения (контроль) – фактор A_1							
Машук 170 МВ	49.0	45.8	40.5	29.1	41.1	–	–
Машук 175 МВ	48.3	43.4	43.8	29.4	41.2	–	–
Ньютон	38.3	39.3	37.7	32.2	36.9	–	–
Машук 250 СВ	47.5	55.6	48.5	39.7	47.8	–	–
Машук 350 МВ	41.0	42.1	45.8	39.9	42.2	–	–
Машук 355 МВ	37.6	42.0	37.3	36.9	38.5	–	–
Машук 360 МВ	44.9	47.4	39.2	32.5	41.0	–	–
Машук 390 МВ	46.3	39.9	31.9	44.0	40.5	–	–
Бештау	51.6	40.7	48.7	50.9	48.0	–	–
N60 – фактор A_2							
Машук 170 МВ	51.7	47.3	41.0	35.8	44.0	2.9	7
Машук 175 МВ	51.5	49.4	49.7	32.6	45.8	4.6	11
Ньютон	43.1	45.9	45.5	36.8	42.8	5.9	16
Машук 250 СВ	59.0	58.2	52.1	49.5	54.7	6.9	14
Машук 350 МВ	47.5	47.4	50.1	40.1	46.3	4.1	10
Машук 355 МВ	46.2	51.3	41.8	41.1	45.1	6.6	17
Машук 360 МВ	48.1	49.2	45.1	36.4	44.7	3.7	9
Машук 390 МВ	54.4	43.6	38.1	53.4	47.4	6.9	17
Бештау	56.8	48.7	53.5	50.7	52.4	4.4	9
HCP_{05} фактора A , т/га	3.7	2.6	4.2	2.5	3.6		
HCP_{05} фактора B , т/га	7.9	5.6	8.9	6.2	7.6		
HCP_5 факторов $A \times B$, т/га	11	7.9	13	8.8	11		

него гибрида Ньютон (на 7%) и среднеспелых гибридов Машук 355 МВ и Машук 390 МВ (на 8%).

В среднем за 4 года исследования максимальная прибавка урожайности зерна (0.64 т/га или 6%) отмечена у гибрида Бештау. Можно также отметить, что за счет внесения азотного удобрения прибавка урожайности зерна в пределах 0.40–0.47 т/га (5–6%) выявлена у гибридов среднеранней группы (Ньютон, Машук 250 СВ) и среднеспелой – Машук 355 МВ и Машук 390 МВ (табл. 3).

В ходе исследования установлено, что гибриды кукурузы различались между собой по приросту высоты растений, а также прибавкам урожая зеленой массы в фазе молочно-восковой спелости и урожая зерна в фазе полной спелости от удобрения [15]. Выявлены образцы, восприимчивые и невосприимчивые к внесению азотного удобрения.

На основании полученных данных для каждого гибрида рассчитаны показатели реакции на азотное удобрение. В качестве количественных

признаков отзывчивости на удобрение использовали высоту растений в фазе цветения, урожай зеленой массы в фазе молочно-восковой спелости и зерна в фазе полной спелости. Показатель реакции кукурузы на азотное удобрение рассчитывали по формуле:

$$\text{Пр} = \frac{(вр_2 - вр_1)}{вр_1} \times 100 + \frac{(зМ_2 - зМ_1)}{зМ_1} \times 100 + \frac{(у_3 - у_1)}{у_1} \times 100,$$

где Пр – показатель реакции на азотное удобрение; $вр_1$, $вр_2$ – высота растений кукурузы соответственно в контроле и на удобренном фоне; $зМ_1$, $зМ_2$ – урожай зеленой массы в молочно-восковой спелости кукурузы соответственно в контроле и на удобренном фоне; $у_1$, $у_3$ – урожай зерна гибридов кукурузы соответственно в контроле и на удобренном фоне. Чем выше был показатель реакции на азотное удобрение, тем больше отзывчивость гибрида и соответственно его агрохимическая эффективность [16]. Сравнительная оцен-

Таблица 3. Влияние азотного удобрения на урожайность зерна гибридов кукурузы

Гибрид	Урожайность, т/га					Прибавки (среднее)	
	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	среднее	т/га	%
Без удобрения (контроль) – фактор A_1							
Машук 170 МВ	6.25	7.03	6.38	6.19	6.46	–	–
Машук 175 МВ	6.85	8.89	6.86	6.28	7.22	–	–
Ньютон	7.62	9.06	7.54	7.02	7.81	–	–
Машук 250 СВ	9.34	9.01	6.82	6.32	7.87	–	–
Машук 350 МВ	8.66	8.56	5.86	5.70	7.20	–	–
Машук 355 МВ	8.50	9.39	7.89	6.45	8.06	–	–
Машук 360 МВ	9.21	9.21	7.53	6.07	8.01	–	–
Машук 390 МВ	9.95	9.56	7.60	7.06	8.54	–	–
Бештау	12.0	11.4	8.76	7.47	9.90	–	–
N60 – фактор A_2							
Машук 170 МВ	6.42	7.34	6.61	6.38	6.69	0.23	4
Машук 175 МВ	7.45	9.04	6.90	6.62	7.50	0.28	4
Ньютон	8.33	9.36	7.66	7.49	8.21	0.40	5
Машук 250 СВ	9.51	9.73	7.21	6.71	8.29	0.42	5
Машук 350 МВ	8.87	8.84	5.99	5.67	7.34	0.14	2
Машук 355 МВ	8.85	9.77	8.50	6.98	8.53	0.47	6
Машук 360 МВ	9.36	9.65	8.10	6.07	8.30	0.29	4
Машук 390 МВ	10.4	9.93	8.03	7.61	9.00	0.46	5
Бештау	12.5	12.1	9.83	7.79	10.5	0.64	6
HCP_{05} фактора A , т/га	0.57	0.36	0.27	0.18	0.52		
HCP_{05} фактора B , т/га	1.2	0.76	0.57	0.44	1.1		
HCP_{05} факторов $A \times B$, т/га	1.7	1.1	0.81	0.62	1.6		

Таблица 4. Показатель реакции гибридов кукурузы на азотное удобрение (среднее за 2012–2015 гг.)

Гибрид	Элементы показателя реакции, ед.			Показатель реакции, ед.
	по высоте растений	по урожаю зеленой массы	по урожаю зерна	
Машук 170 МВ	2.65	7.06	3.56	13.27
Машук 175 МВ	3.62	11.17	3.88	18.67
Ньютон	4.29	15.99	5.12	21.11
Машук 250 СВ	3.90	14.44	5.34	23.68
Машук 350 МВ	2.94	9.72	1.94	14.60
Машук 355 МВ	3.15	17.14	5.83	26.12
Машук 360 МВ	3.18	9.02	3.62	15.82
Машук 390 МВ	2.22	17.04	5.39	24.65
Бештау	4.30	9.17	6.46	19.93

ка отзывчивости гибридов кукурузы приведена в табл. 4. Судя по показателям реакции на азотное удобрение, самым высокоотзывчивым гибридом кукурузы является Машук 355 МВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование данного способа оценки отзывчивости гибридов кукурузы на азотное удобрение при достаточно простой тех-

нологии проведения позволяет получить сведения о потребности каждого гибрида в азотном питании. Новый метод можно использовать также для оценки исходного материала и отбора отзывчивых форм при создании агрохимически эффективных гибридов кукурузы. Способ оценки отзывчивости кукурузы на азотное удобрение защищен патентом № 2744730 от 15 марта 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобренко И.А., Столыпина П.А., Красницкий В.М. Эффективность применения минеральных удобрений при возделывании гибридов кукурузы в условиях Северного Казахстана // Плодородие. 2014. № 5. С. 16–17.
2. Волынкина О.В., Копылова А.Н., Кириллова Е.В. Влияние агрохимических свойств почвы и удобрений на урожайность культур в зернопропашном севообороте // Агрохим. вестн. 2020. № 5. С. 17–22.
3. Стулин А.Ф. Удобрение бессменных посевов кукурузы в условиях Центрального Черноземья // Плодородие. 2021. № 4. С. 30–32.
4. Агафонов Е.В., Батаков А.А. Система удобрения гибридов кукурузы разного срока созревания на темно-каштановой почве Ростовской области // Агрохимия. 2000. № 11. С. 41–50.
5. Belay A., Claassens A., Wehner F. Effect of direct nitrogen and potassium and residual phosphorus fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation // Biol. Fertil. Soils. 2002. № 6. P. 420–427.
6. Tremblay N., Bouroubi Y.M., Bélec C., Mullen R.W., Kitchen N.R., Thomason W.E., Ebelhar S., Mengel D.B., Raun W.R., Francis D.D., Vories E.D., and Ortiz-Monasterio I. Corn response to nitrogen is influenced by soil texture and weather // Soil Fertil. Crop Nutr. 2012. V. 104. P. 1658–1671.
7. Климашевский Э.Л. Генетический аспект минерального питания растений. М.: Агропромиздат, 1991. 415 с.
8. Шевелуха В.С., Прыгун М.А., Гриб С.И. Способы отбора высокопродуктивных растений ячменя на первом этапе органогенеза. М.: Агропромиздат, 1985. 32 с.
9. Селекция агрохимически эффективных сортов. Эдафическая селекция (электр. ресурс <http://portal.eco.ru/ekologicheskaja-selekcija-rastenij>).
10. Романова Е.Ю. Способ отбора генотипов кукурузы, отзывчивых на азотное удобрение // Описание изобретения к авторскому свид-ву SU 1628985 А1, опубл. 23.02.1991.
11. Ляховкин А.Г., Удовенко Г.В., Берлянд-Кожевников В.Н. К методике изучения наследуемости реакции растений на условия среды // Докл. ВАСХНИЛ. 1979. № 3. С. 15.
12. Методические рекомендации по проведению полевых опытов с кукурузой. Днепропетровск: ВНИИ кукурузы ВАСХНИЛ, 1980. 54 с.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.
14. Багринцева В.Н., Ивашенко И.Н. Особенности развития самоопыленных линий кукурузы при внесении азотного удобрения // Кукуруза и сорго. 2015. № 2. С. 22–30.
15. Багринцева В.Н., Ивашенко И.Н. Отзывчивость на азотное удобрение современных гибридов кукурузы в условиях Ставропольского края // Агрохимия. 2015. № 11. С. 45–50.
16. Способ оценки отзывчивости кукурузы на азотное удобрение: пат. №2744730 РФ: МПК А01G 7/00, А01С 21/00 / Ивашенко И.Н., Багринцева В.Н.; заявитель и патентообладатель – Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы. №2020126495, заявл. 07.08.2020, опубл. 15.03.2021. Бюл. № 8. 2 с.

Methodology for Estimating Corn Response to Nitrogen Fertilizer

I. N. Ivashenenko^a and V. N. Bagrintseva^{a, #}

^aAll-Russian Research Scientific Institute of Corn, ul. Ermolova 14-B, Pyatigorsk 357528, Russia

[#]E-mail: maize-techno@mail.ru

A method for assessing the responsiveness of corn to nitrogen fertilizer has been developed. In 2012–2015, the All-Russian Corn Research Institute studied corn hybrids of different ripeness groups on the basis of responsiveness to nitrogen fertilizer. Corn hybrids were grown in a field experiment on 2 backgrounds: 1 – control without fertilizer and 2 – N60. As quantitative signs of responsiveness to fertilizer, the height of plants in the flowering phase, the yield of green mass in the phase of milk-wax ripeness and grains in the phase of full ripeness were used. The indicator of the reaction of corn to nitrogen fertilizer was calculated by the formula:

$$Pr = \frac{(vp_2 - vp_1)}{vp_1} \times 100 + \frac{(zm_2 - zm_1)}{zm_1} \times 100 + \frac{(y_3_2 - y_3_1)}{y_3_1} \times 100,$$

where Pr is an indicator of the reaction to nitrogen fertilizer; vp_1 , vp_2 – the height of corn plants, respectively, in the control and on a fertilized background; zm_1 , zm_2 – the yield of green mass in the milky-waxy ripeness of corn in the control and on a fertilized background; y_3_1 , y_3_2 – the grain yield of corn samples in the control and on a fertilized background. According to the parameters of the reaction to nitrogen fertilizer, highly responsive forms of corn were identified: Mashuk 355 MV and Mashuk 390 MV hybrids. The method for assessing the responsiveness of corn to nitrogen fertilizer is protected by Patent No. 2744730 dated March 15, 2021.

Key words: nitrogen fertilizer, corn, hybrid, responsiveness, evaluation method.

УДК 631.811.98:581.132:581.14:632.112:633.11

ВЛИЯНИЕ САЛИЦИЛОВОЙ И ЯНТАРНОЙ КИСЛОТ НА ПОКАЗАТЕЛИ РОСТА И ФОТОСИНТЕЗА И СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ, ВЫРАЩЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ВОДНОГО ДЕФИЦИТА

© 2023 г. А. В. Якунина^{1,*}, Ю. В. Сеницына¹¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского 603022 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, Россия

*E-mail: yakunina.anastasia@gmail.com

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 13.08.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В условиях потепления климата увеличились частота и интенсивность засух, поэтому разработка методов, повышающих устойчивость сельскохозяйственных культур к дефициту воды, приобретает большое значение. Цель работы — изучение влияния салициловой и янтарной кислот на ростовые показатели, показатели фотосинтетической активности и на содержание пигментов в листьях растений, выращенных в условиях полива и водного дефицита. Растения пшеницы выращивали в лабораторных условиях. Семена предварительно замачивали в дистиллированной воде (контроль), в растворе 0.05 мМ салициловой кислоты или в растворе 0.05 мМ янтарной кислоты. После появления первых корней на 3-и сут проросшие семена переносили в вегетационные сосуды объемом 200 мл, заполненные грунтом, и выращивали при 22–24°C при естественном освещении и ежедневном поливе. На 5-е сут растения делили на группы “полив” и “дефицит воды”. Группу “дефицит воды” прекращали поливать до окончания эксперимента. На 11-е сут определяли показатели максимального и эффективного квантового выхода фотосистемы II, фотохимического и нефотохимического тушения и плотности электронного потока с помощью РАМ-флуориметра. На 16-е сут выращивания растений определяли количественное содержание хлорофилла *a* и *b* и каротиноидов, рассчитывали относительное содержание воды в побегах и корнях. Относительное содержание воды в растениях почти не менялось при обработке кислотами в условиях полива, но при водном дефиците обработка янтарной кислотой снижала содержание воды в корне на 6%. В условиях недостатка влаги обработка кислотами повышала эффективный квантовый выход фотосистемы II, коэффициент фотохимического тушения хлорофилла и плотность электронного потока в среднем на 17–20%. В условиях полива обработка салициловой и янтарной кислотами вызывала снижение содержания хлорофилла *a* (на 11 и 32% соответственно), каротиноидов (на 57 и 32%) и увеличение содержания хлорофилла *b* (на 49 и 23%). При обработке янтарной кислотой суммарное содержание хлорофилла *a* + *b* снижалось на 14%. В условиях водного дефицита обработка салициловой кислотой повышала относительное содержание хлорофиллов и каротиноидов в среднем в 2.6 и 3.3 раза, при обработке янтарной — в 3.5 и 2.0 раза соответственно по сравнению с контролем в пересчете на сырую массу. Применение исследованных кислот можно рекомендовать для потенциального использования в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: салициловая кислота, янтарная кислота, рост, хлорофилл, водный дефицит, пшеница.

DOI: 10.31857/S000218812301012X, **EDN:** FEBRYH

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата влияет на зерновые площади в различных частях мира. Наибольший вред сельскому хозяйству в период вегетации культур приносит засуха — неблагоприятное сочетание метеорологических условий, при которых растения испытывают водный дефицит. Недостаток воды в период вегетации — это один из основных

лимитирующих факторов получения высоких и стабильных урожаев. В сельском хозяйстве весьма велико значение атмосферных осадков, поскольку они служат основным источником накопления запасов почвенной влаги, а последние составляют единственный источник водообеспечения сельскохозяйственных культур. Отсутствие или недобор осадков влечет за собой пересыхание

пахотного горизонта почвы, создает неблагоприятные условия влагообеспеченности культур, ухудшает их состояние, снижает урожай. Глубокое нарушение водного баланса приводит к увяданию растений, клетки теряют тургор, ткани утрачивают напряженность, а листья и молодые верхушки стеблей повисают. Такое нарушение водного баланса растений наступает в результате длительного процесса постепенного израсходования влаги в почве, предопределяемого той или иной продолжительностью бездождевого периода [1]. Иногда даже слабые стрессы, вызванные нарушением водообеспеченности возделываемых культур, приводят к весьма серьезным негативным последствиям в плане снижения их урожайности и ухудшения качества получаемой продукции. Поэтому повышению устойчивости растений к водному дефициту стоит уделять больше внимания. Значительную роль в повышении устойчивости растений могут играть регуляторы роста растений, действующие через их гормональную систему [2]. В этом случае раннее включение адаптационных программ вызывает сохранение ассимиляционной способности, а, следовательно, можно прогнозировать сохранение урожайности. В этих условиях весьма перспективными является применение защитных соединений, которые бы увеличили период устойчивости растений до появления морфологических признаков увядания. В качестве таких перспективных защитных соединений можно рассматривать салициловую (СК) и янтарную кислоты (ЯК).

Салициловая кислота – фитогормон, является многообещающим соединением, которое может снизить чувствительность растений к стрессам окружающей среды за счет регуляции системы антиоксидантной защиты, скорости транспирации, движения устьиц и скорости фотосинтеза. СК является стресс-сигнальной молекулой, которая активирует экспрессию гена, отвечающего за абiotический стресс, и индуцирует экспрессию биосинтетических ферментов и белков в растениях в условиях экологических стрессов. Например, сообщали об усилении синтеза дегидриноподобных белков, шаперонов и белков теплового шока, а также наблюдали изменения активности протеинкиназ, содержания хлорофилла и рибулозобисфосфаткарбоксилазы (**РубисКо**). Считается, что экспрессия этих генов должна приводить к снижению продукции активных форм кислорода (**АФК**) в фотосинтетически активных тканях. Несколько исследований показали, что применение СК дает положительный эффект, защищая растения от окислительного повреждения, вызванного засухой [3].

Янтарную кислоту рассматривают в качестве миметика салициловой кислоты. ЯК обладает биостимулирующими свойствами роста и развития растений и применяется в растениеводстве в виде водных растворов с концентрацией 10^{-3} – $10^{-2}\%$ для предпосевной обработки семян и опрыскивания растений [4]. Для янтарной кислоты предпочтительно использование для замачивания семян, чем опрыскивание, т.к. иммунизация на ранних стадиях онтогенеза позволяет с самого начала развития индуцировать в растениях достаточно высокий уровень неспецифической устойчивости. В результате у растений повышается иммунитет к патогенам, выносливость к засухе, холоду, перепадам температуры, ускоряется заживление ран. Янтарная кислота легко всасывается при замачивании семян. Предпосевная обработка семян янтарной кислотой в концентрации 10^{-3} М стабильно повышает урожай различных культур на 20–30%. Таким образом, применение иммунокорректоров основано не на подавлении фитопатогенов, а на повышении общего адаптивного иммунного потенциала растений [5]. Кроме того, технологически более удобным является предпосевная обработка семян, которая обеспечивает формирование растений с повышенной устойчивостью к водному дефициту. Цель работы – оценка физиологического состояния растений пшеницы, выращенных из семян, обработанных салициловой и янтарной кислотами в концентрации 0.05 мМ.

В связи с этим определяли влияние салициловой и янтарной кислот на относительное содержание воды в побегах и корнях растений, содержание хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов в листьях растений пшеницы, а также на фотосинтетические показатели: максимального и эффективного квантового выхода фотосистемы II, фотохимического и нефотохимического тушения и плотности электронного потока в растениях пшеницы, выращенных в условиях полива и водного дефицита.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Растения пшеницы твердой (*Triticum durum* L.) сорта Харьковская 46 выращивали в лабораторных условиях. Семена предварительно промывали водой с мылом и обрабатывали 3%-ным раствором пероксида водорода. Семена растений разделили на 3 группы: первую группу семян замачивали в дистиллированной воде (контроль), вторую – в растворе 0.05 мМ салициловой кислоты, третью – в растворе 0.05 мМ янтарной кислоты. Время замачивания семян составляло 16 ч. Затем семена промывали дистиллированной водой

и переносили в чашки Петри для проращивания. После появления первых корней на 3-и сут проросшие семена переносили в вегетационный сосуд на 200 мл. В каждый сосуд сажали по 5 семян пшеницы. Вегетационные сосуды предварительно заполняли грунтом, имеющим в своем составе смесь торфов различной степени разложения, комплексное минеральное удобрение, песок речной термически обработанный, муку известняковую (доломитовую). Массовая доля питательных веществ грунта для азота (N) – 250, фосфора (P_2O_5) – 275, калия (K_2O) – 275 мг/л. pH_{KCl} 8.25. Растения выращивали при естественном освещении и при температуре 22–24°C и ежедневном поливе. На 5-е сут растения из каждой группы поделили на подгруппы “полив” и “дефицит воды”. Растения подгруппы “дефицит воды” прекращали поливать до окончания эксперимента. На 11-е сут определяли показатели максимального и эффективного квантового выхода фотосистемы II, фотохимического и нефотохимического тушения и плотность электронного потока с помощью прибора РАМ-флуориметра. Рассчитывали время полуактивации для периода действия включенного действующего света (AL). На 16-е сут выращивания растений рассчитывали относительное содержание воды в побеге и корне. Определяли содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в ацетоновой вытяжке [6]. Для каждой экспериментальной группы рассчитывали средние показатели и ошибку среднего. Статистическую значимость различий определяли по *t*-коэффициенту Стьюдента. Минимальное количество измерений каждого показателя для каждой группы – 5 [7]. Влияние 2-х факторов (наличие стресса, вызванного водным дефицитом, и вид обработки семян) на физиологическое состояние растений изучали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа ANOVA с повторностями.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растения на момент уборки по внешнему виду не отличались от контроля. Относительное содержание воды в почве у растений группы “полив” составило 50%, у группы “водный дефицит” этот показатель снижался до 40%. Относительное содержание воды (ОСВ) в растениях почти не изменилось (табл. 1), но отметили тенденцию к снижению ОСВ в побегах. Обработка салициловой кислотой не изменяла относительное содержание воды в побеге и корне в условиях полива, но можно отметить, что в условиях водного дефицита у обработанных растений эти показатели были немного больше по сравнению с контролем.

Таблица 1. Влияние салициловой (СК) и янтарной (ЯК) кислот на относительное содержание воды (ОСВ) в побегах и корнях растений пшеницы, выращенных в условиях полива и водного дефицита

Вариант	ОСВ побега	ОСВ корня
	%	
Полив		
Контроль	93.1 ± 0.7	86.4 ± 5.4
Обработка 0.05 мМ СК	92.8 ± 0.2	91.2 ± 3.6
Обработка 0.05 мМ ЯК	92.9 ± 0.6	91.4 ± 1.7
Водный дефицит		
Контроль	89.9 ± 1.4	91.1 ± 1.2
Обработка 0.05 мМ СК	90.6 ± 0.1	92.8 ± 0.8
Обработка 0.05 мМ ЯК	87.4 ± 1.9	85.4 ± 0.7*

*Различия с контролем своей группы статистически значимы, $p < 0.05$.

Янтарная кислота в условиях полива не изменяла содержание воды в побеге и корне, но в условиях дефицита воды снижала содержание воды в корне на 6%. Несмотря на недостаток влаги, растения не показали явного снижения относительного содержания воды в растении и не проявляли признаков увядания.

В исследованиях с использованием более высоких концентраций салициловой и янтарной кислот было показано увеличение содержания воды в растениях. Например, в условиях умеренного водного стресса опрыскивание растений пшеницы раствором СК более высокой концентрации 1 мМ приводило к увеличению площади листа, накоплению биомассы, повышению относительного содержания воды [8]. У растений ячменя, семена которых были предварительно обработаны 1 мМ янтарной кислотой, в условиях засухи отмечено более высокое содержание воды по сравнению с растениями, выращенными из необработанных семян [9]. СК и ЯК в использованных нами низких концентрациях на величину ОСВ почти не влияли. При действии ЯК в условиях водного дефицита наблюдали небольшое увеличение сухой массы побегов и корней. При действии СК показатели водного обмена не изменялись при водном дефиците.

Несмотря на то, что результаты, полученные в ходе данного эксперимента, не показали значительного влияния салициловой кислоты на накопление биомассы пшеницы при выращивании растений в течение 16 сут, однако имеются данные о стимулирующем влиянии данного фитогормона в работах других исследователей в более длительном эксперименте. Например, в работе

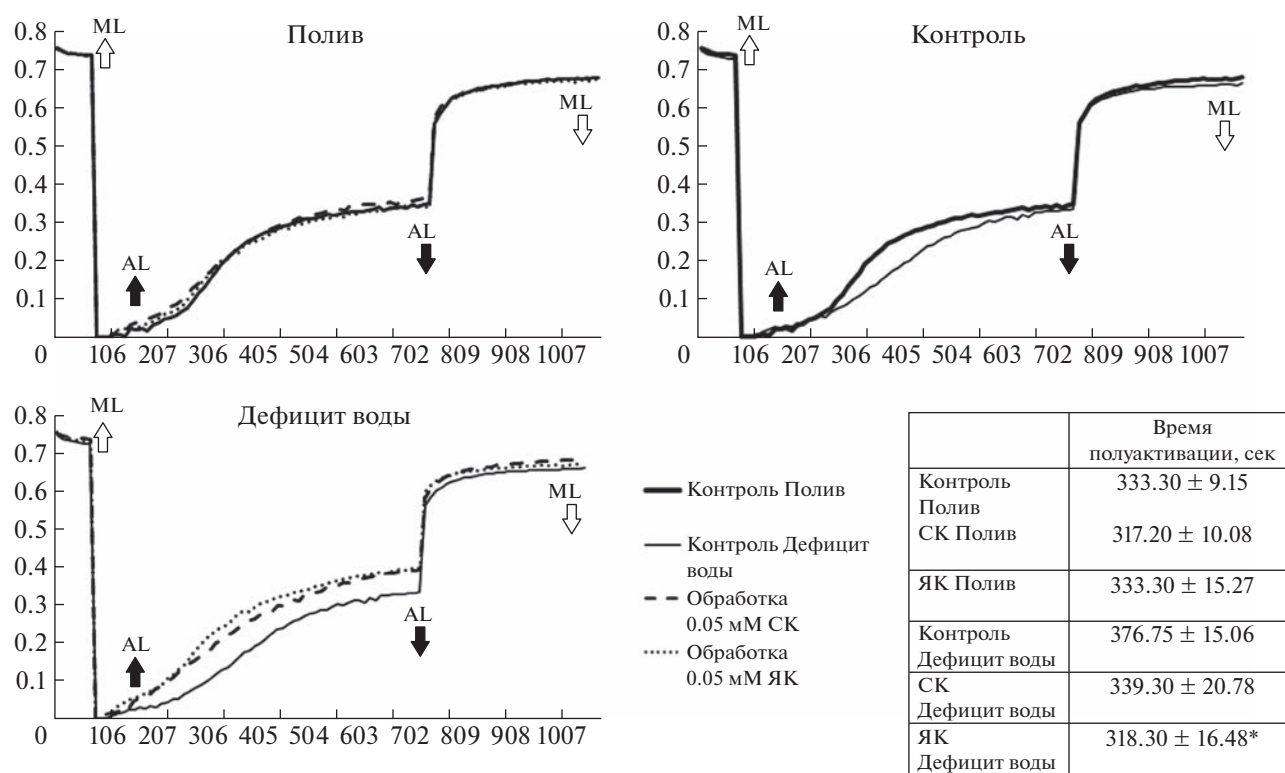


Рис. 1. Влияние салициловой и янтарной кислот на показатели эффективного ($Y(II)$) квантового выхода фотосистемы II у растений пшеницы, выращенных в условиях дефицита воды. Графики представляют собой средние 10 измерений, ошибка среднего не превышала 5% и на графике не показана, ось абсцисс – время, сек. Стрелками обозначено включение (\uparrow) и выключение (\downarrow) измерительного (ML) и действующего (AL) света. *Различия с контролем своей группы статистически значимы, $p < 0.05$. То же на рис. 2–4.

[10] показано, что предварительное замачивание семян пшеницы в 0.05 мМ СК приводило к увеличению числа листьев, увеличению сырой и сухой массы через 30 и 40 сут после посева. В исследовании [11] предпосевная обработка семян пшеницы раствором 0.05 мМ салициловой кислоты увеличивала массу надземных и подземных органов растений. Аналогичный эффект наблюдали и в другом исследовании на пшенице при использовании фитогормона в той же концентрации, причем в наибольшей степени этот эффект был выражен в корневой системе [12]. В условиях умеренного водного стресса опрыскивание растений пшеницы в более высокой концентрации 1 мМ СК приводило к увеличению площади листа, накоплению биомассы [8]. В целом можно отметить, что полученные нами данные показателей сырой и сухой массы обработанной СК пшеницы были больше по сравнению с необработанным контролем, что не противоречило данным других исследователей.

В условиях полива обработка салициловой и янтарной кислотами не повлияла на показатели фотосинтеза. Показатели максимального кванто-

вого выхода фотосистемы II (F_v/F_m) у обработанных растений (0.754) оставались в пределах контроля (0.753). Эффективный квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$) не менялся в условиях полива при обработке кислотами, но в условиях водного дефицита у обработанных растений этот показатель был больше на 17–19% по сравнению с контролем (рис. 1).

Коэффициент фотохимического тушения хлорофилла (qP) в условиях водного дефицита повышался при обработке салициловой и янтарной кислотами в среднем на 14–18% (рис. 2). В условиях недостатка влаги время полуактивации при обработке янтарной кислотой было на 18% меньше по сравнению с контролем, т.е. растения пшеницы быстрее реагировали на стресс, вызванный дефицитом воды.

При поливе обработка салициловой и янтарной кислотами показала разные эффекты кислот на начальной стадии регистрации нефотохимического тушения (NPQ): салициловая кислота повышала, а янтарная понижала этот показатель, но к концу регистрации показатели NPQ опытных растений возвращались к показателям контроля.

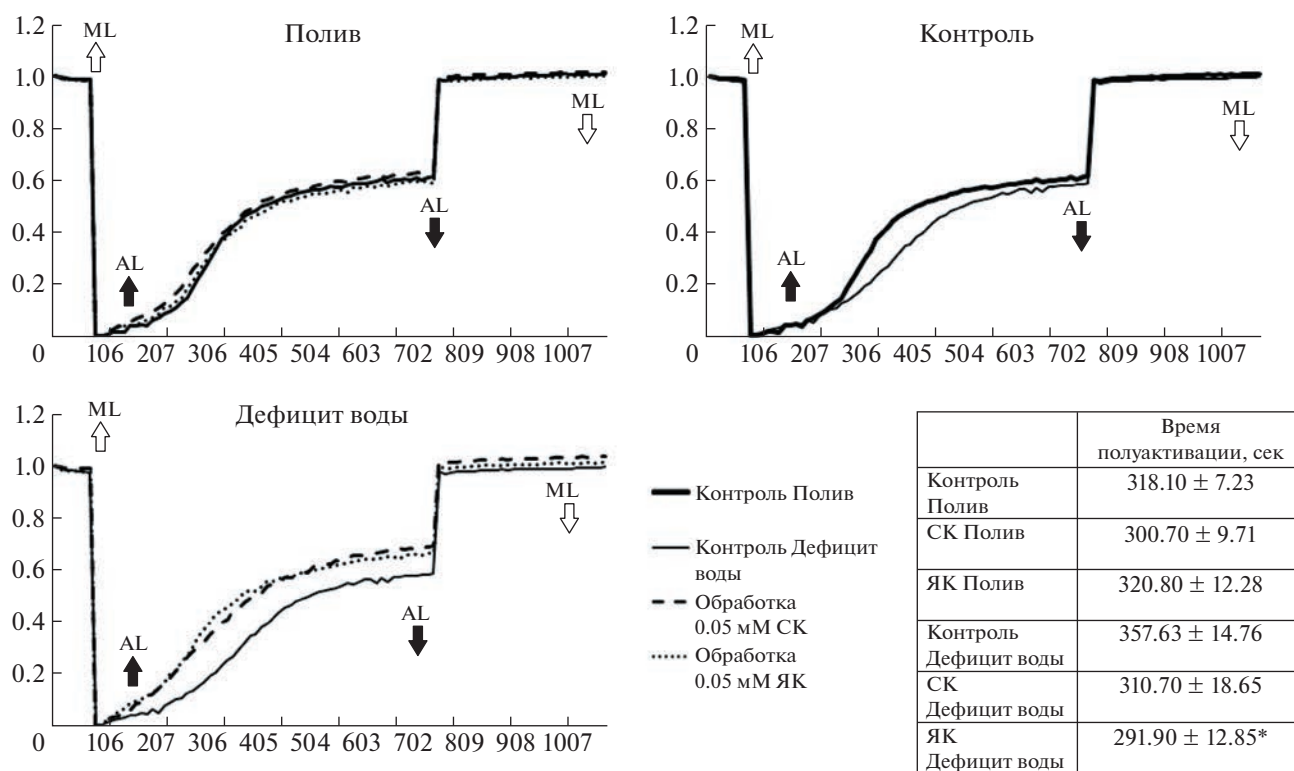


Рис. 2. Влияние салициловой и янтарной кислот на показатели фотохимического тушения хлорофилла (qP) у растений пшеницы, выращенных в условиях дефицита воды.

В условиях недостатка влаги салициловая кислота немного повышала коэффициент NPQ , но значимых изменений не наблюдали. При этом янтарная кислота достоверно снижала коэффициент нефотохимического тушения на 12% к концу регистрации (рис. 3).

Плотность электронного потока (ETR) не менялась при обработке кислотами в условиях ежедневного водоснабжения, но в условиях водного дефицита применение салициловой и янтарной кислот повышало плотность электронного потока на 17–20% (рис. 4). Кроме того, применение янтарной кислоты в условиях стресса снижало время полуактивации на 15%, что свидетельствовало о более быстрой реакции растений на изменение условий среды.

Продemonстрированное положительное влияние янтарной кислоты в условиях водного дефицита отмечено также в некоторых работах отечественных исследователей. Например, в исследовании [4] показано, что обработка семян яровой мягкой пшеницы янтарной кислотой в концентрации 1 мМ увеличивала массу сухого вещества на 33, фотосинтетический потенциал – на 17–20% в сравнении с вариантом без предпосевной обработки. В исследовании на растениях салата-

латука (*Lactuca sativa* L.) предпосевная обработка семян 2.5 мМ янтарной кислотой увеличивала фотосинтетический потенциал на 68% к 40-м сут выращивания [13]. Обработка семян растений пшеницы сорта Палпич янтарной кислотой в концентрации 250 г/т приводила к увеличению засухоустойчивости в 1.13 раза и жароустойчивости в 1.27 раза по сравнению с контролем [14].

Стресс от водного дефицита снижал содержание хлорофилла в листьях растений пшеницы, скорость фотосинтеза, устьичную проводимость, эффективность карбоксилирования и скорость транспирации, однако предпосевная обработка салициловой кислотой ослабляла негативное воздействие засухи за счет улучшения фотосинтетических характеристик, сохранения проницаемости мембран, индукции стрессовых белков и повышения активности антиоксидантных ферментов [3].

В условиях полива обработка как салициловой (СК), так и янтарной (ЯК) кислотами приводила к снижению содержания хлорофилла a и каротиноидов и увеличению содержания хлорофилла b (табл. 2). Салициловая кислота снижала содержание хлорофилла a на 11, каротиноидов – на 57, но повышала содержание хлорофилла b на 49%. Суммарное содержание хлорофилла $a + b$ при

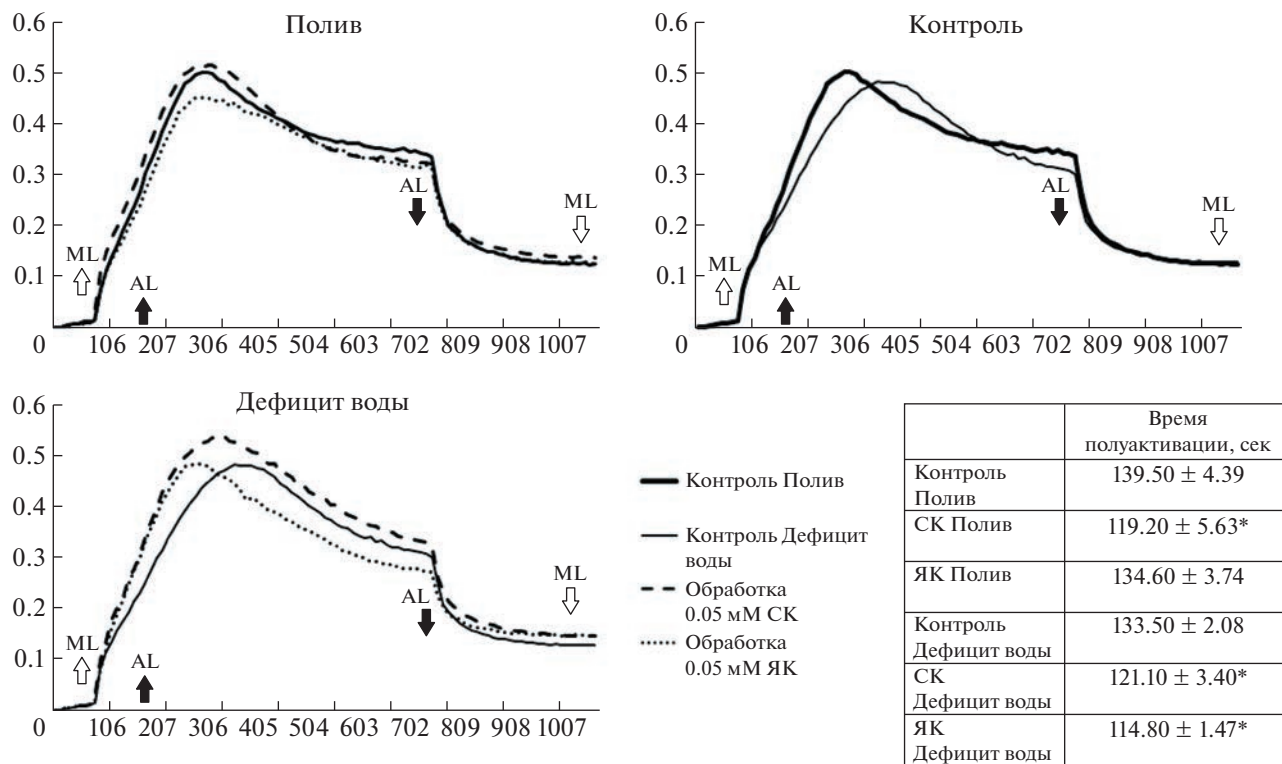


Рис. 3. Влияние салициловой и янтарной кислот на показатели нефотохимического (NPQ) тушения у растений пшеницы, выращенных в условиях дефицита воды.

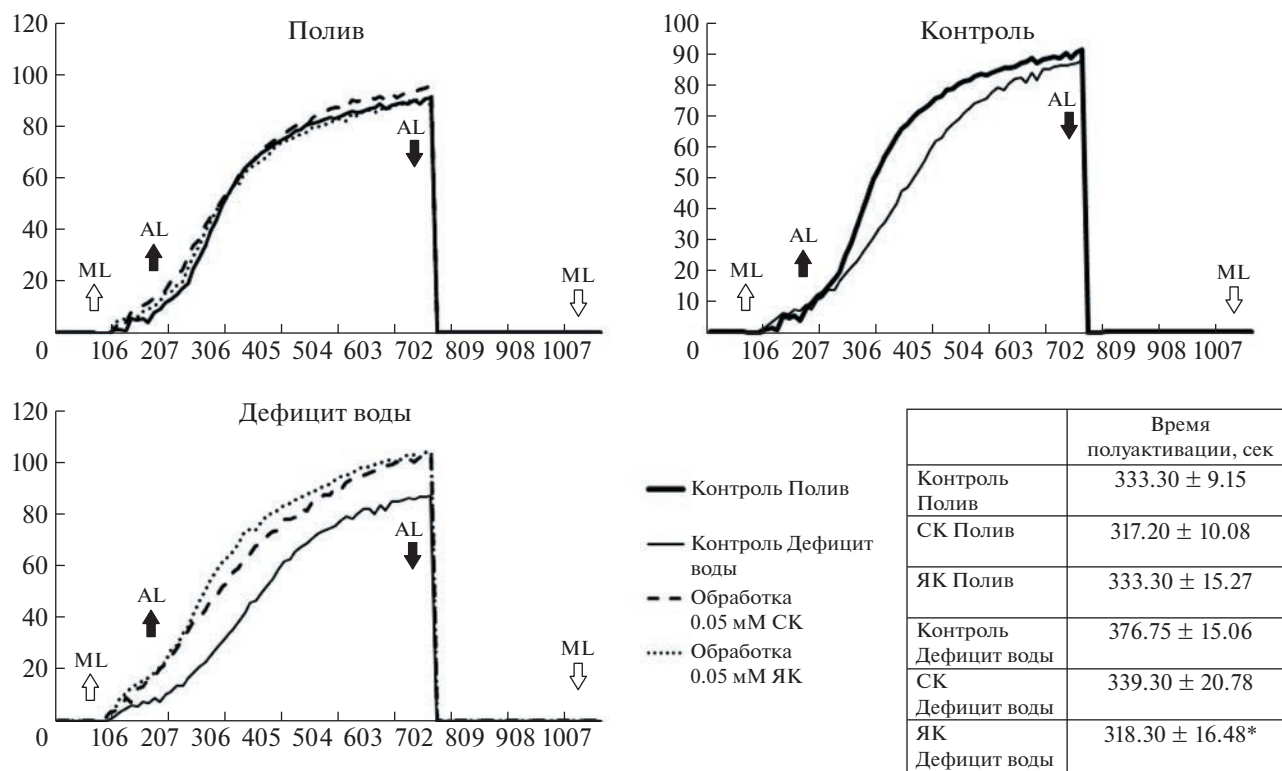


Рис. 4. Влияние салициловой и янтарной кислот на плотность электронного потока (ETR) у растений пшеницы, выращенных в условиях дефицита воды.

Таблица 2. Влияние салициловой (СК) и янтарной кислот (ЯК) на содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях растений пшеницы, выращенных в условиях полива и водного дефицита

Вариант	Содержание хлорофилла <i>a</i>	Содержание хлорофилла <i>b</i>	Содержание хлорофиллов <i>a + b</i>	Содержание каротиноидов
	мг/г сырой массы			
Полив				
Контроль	0.151 ± 0.002 ^a	0.069 ± 0.002 ^a	0.219 ± 0.003 ^a	0.028 ± 0.001 ^a
Обработка 0.05 мМ СК	0.133 ± 0.008 ^c	0.103 ± 0.005 ^b	0.236 ± 0.012 ^c	0.012 ± 0.001 ^b
Обработка 0.05 мМ ЯК	0.102 ± 0.002 ^e	0.085 ± 0.002 ^d	0.187 ± 0.004 ^e	0.019 ± 0.001 ^c
Водный дефицит				
Контроль	0.070 ± 0.005 ^b	0.065 ± 0.004 ^a	0.134 ± 0.008 ^b	0.011 ± 0.001 ^b
Обработка 0.05 мМ СК	0.177 ± 0.010 ^d	0.180 ± 0.012 ^c	0.356 ± 0.023 ^d	0.037 ± 0.002 ^d
Обработка 0.05 мМ ЯК	0.238 ± 0.003 ^f	0.239 ± 0.003 ^e	0.478 ± 0.006 ^f	0.022 ± 0.002 ^c

Примечание. Разные буквы обозначают статистически значимые различия ($p < 0.05$).

этом не менялось. Янтарная кислота снижала содержание хлорофилла *a* на 32, каротиноидов – на 32 и повышала содержание хлорофилла *b* на 23%. При этом суммарное содержание хлорофилла *a + b* снижалось на 14%.

В условиях недостаточного водообеспечения обработка салициловой и янтарной кислотами оказала схожий эффект на содержание хлорофиллов. Обработка салициловой кислотой повышала содержание хлорофиллов *a*, *b* и их сумму в среднем в 2.6 раза, эффект обработки янтарной кислотой был сильнее, содержание хлорофиллов увеличивалось в среднем в 3.5 раза. Содержание каротиноидов также увеличивалось, но сильнее всего этот эффект был выражен при действии салициловой кислоты, увеличение было в 3.3 раза, в то время как янтарная кислота повышала этот показатель в 2 раза. Пересчет содержания пигментов на сухую массу сохранял все отмеченные динамики изменения. Действие СК и ЯК на пигментный аппарат было схожим с действием водного дефицита.

Водный дефицит снижал содержание хлорофилла *a* на 53, хлорофилла *b* – на 5, их суммы – на 38 и содержание каротиноидов – на 60%. Эффект кислот оказался неоднозначным. При обработке салициловой и янтарной кислот содержание хлорофилла *a* снизилось на 11 и 32%, а содержание хлорофилла *b* увеличивалось на 49 и на 23% соответственно. В условиях водного дефицита содержание пигментов оказалось сравнимым или больше соответствующим содержанию при обработке кислотами в условиях полива. Обработка кислотами в условиях полива вызывала нежелательную перестройку фотосинтетического аппарата, но при дефиците воды содержание пигмен-

тов было больше по сравнению с контролем. Вероятно, кислоты вызывали перестройки в синтезе хлорофиллов, в условиях полива это было неблагоприятным, но в дальнейшем в условиях недостатка влаги удалось избежать уменьшения содержания пигментов. Суммарное содержание хлорофиллов в обработанных растениях было больше по сравнению с контролем и сравнимо с показателями у растений в условиях полива. Содержание каротиноидов в условиях полива при обработке кислотами снижалось примерно в 2 раза, но если такие обработанные растения в дальнейшем находились в условиях дефицита воды, то содержание каротиноидов в случае обработки СК было очень высоким и даже сравнимо с контрольными растениями группы “полив”. Обработка семян СК и ЯК имитировала водный дефицит, и защитное действие реализовалось при наступлении водного дефицита.

Похожие результаты получены другими исследователями при использовании более высоких концентраций салициловой кислоты. Например, опрыскивание растений пшеницы 1 мМ СК в условиях умеренного водного стресса приводило к повышению содержания хлорофиллов и каротиноидов [8]. Засуха привела к снижению содержания хлорофилла *a* и *b* на 26.2 и 18.7% соответственно по сравнению с необработанными растениями. Однако применение салициловой кислоты в большей концентрации 0.5 мМ увеличило содержание хлорофилла *a* на 7 и хлорофилла *b* – на 4% по сравнению с контрольными растениями [3]. Однако в другой работе в условиях нормального увлажнения с увеличением концентрации внесенной салициловой кислоты (0, 5, 10, 50, 100, 200 мг/кг) содержание хлорофилла значи-

тельно снижалось в проростках пшеницы, уменьшалось соотношение хлорофиллов $a : b$. При этом обнаружено повышение общего содержания каротиноидов, в том числе ксантофиллов [15]. Замачивание семян пшеницы в растворах СК низких концентраций (0.01–0.05 мМ) было эффективным в смягчении негативного воздействия засухи [16].

О влиянии янтарной кислоты на содержание пигментов в растениях известно меньше. В исследовании на растениях салата-латука (*Lactuca sativa* L.) показано, что предпосевная обработка семян 2.5 мМ янтарной кислотой увеличивала накопление хлорофиллов a и b на 41.2 и 42.9% соответственно, а каротиноидов – на 33.3% к 40-м сут выращивания [13]. Однако в работе [17] показано, что разные сорта пшеницы по-разному реагируют на обработку янтарной кислотой. Например, предпосевная обработка семян пшеницы сортов Звонница, Остистое Белогорье и Московская 39 препаратом янтарной кислоты (сукцинат-иона 5.75%) в разведении 1 : 5 приводила к снижению общего содержания хлорофиллов ($a + b$) (на 30, 12 и 41% соответственно). Сорта пшеницы Сурава, Чураевка и Азано напротив, после обработки демонстрировали увеличение общего содержания хлорофиллов в среднем на 30–40%.

В нашем эксперименте в условиях полива обработка салициловой и янтарной кислотами мало влияла как на содержание хлорофилла, так и на фотосинтетическую активность растений пшеницы. Однако в условиях водного дефицита применение салициловой и янтарной кислот показало положительное влияние как на содержание хлорофилла, которое у обработанных растений достигало показателей контроля при поливе, так и на фотосинтетическую активность, что выражалось в снижении времени полуактивации нефотохимического тушения NPQ , т.е. более быстрой реакции на стрессор. Причем более выраженный эффект в смягчении негативного действия водного дефицита наблюдали при предварительной обработке янтарной, а не салициловой кислотой.

Янтарная кислота косвенно влияет на процесс фотосинтеза, т.к. активная ее форма – сукцинил-S-КоА и гликокол, являясь непосредственными предшественниками хлорофилла a (протопорфирина), способствуют биосинтезу хлорофилла и цитохромов. За счет собственных превращений ЯК позволяет утилизировать запасные жиры, при распаде которых образуются молекулы ацетил-КоА. Из них восстанавливается НАДН, энергия которой может быть использована на синтез АТФ и другие процессы. Положительное действие ЯК может быть объяснено не только активацией цик-

ла Кребса и энергетических процессов, но и стимулированием синтеза восстановленных форм аминокислот [18].

В молодых проростках кислоты не меняли оводненность тканей, но сохраняли ее оптимальной при водном дефиците. Обработка кислотами вызывала существенную перестройку метаболизма, связанную с изменением содержания пигментов, которое при дальнейшем дефиците воды не снижалось. Обработка кислотами позволяла вырастить более устойчивые к засухе растения.

На основании полученных результатов можно сделать заключение, что обработка семян пшеницы салициловой и янтарной кислотами способствовала повышению устойчивости растений к дефициту воды. По сравнению с салициловой янтарная кислота имела более выраженный защитный эффект на растения пшеницы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях водного дефицита обработка салициловой и янтарной кислотами повышала эффективный квантовый выход фотосистемы II, коэффициент фотохимического тушения хлорофилла и плотность электронного потока. Предварительная обработка семян пшеницы 0.05 мМ салициловой и 0.05 мМ янтарной кислотами приводила к увеличению содержания хлорофиллов a и b наряду со снижением содержания каротиноидов как в условиях полива, так и водного дефицита. Защитное действие салициловой и янтарной кислот вероятнее всего реализуется не столько через регуляцию транспирации, о чем свидетельствовало малое изменение относительного содержания воды, а через коррекцию пигментного аппарата, что позволило поддерживать высокую активность фотосинтеза. Обе исследованные кислоты можно рекомендовать для использования в практике сельского хозяйства для повышения устойчивости растений пшеницы к водному дефициту, однако лучшим эффектом обладает янтарная кислота по сравнению с салициловой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венцкевич Г.З. Сельскохозяйственная метеорология / Под ред. В.В. Синельщикова. Л.: Гидрометеоиздат, 1952. 324 с.
2. Шаповал О.А., Вакуленко В.В., Можарова И.П. Как повысить устойчивость растений к засухе // Защита и карантин раст. 2011. № 3. С. 61–62.
3. Khalvandi M., Siosemardeh A., Roohi E., Keramati S. Salicylic acid alleviated the effect of drought stress on photosynthetic characteristics and leaf protein pattern

- in winter wheat // *Heliyon*. 2021. V. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05908>
4. Цыганова Н.А., Воронкова Н.А., Дороненко В.Д., Ба-
 лабанова Н.Ф. Влияние янтарной кислоты на фото-
 синтетическую активность яровой мягкой пше-
 ницы // *Вестн. Омск. ГАУ*. 2019. № 3(35). С. 8.
 5. Змушко А.А., Красинская Т.А. Применение янтар-
 ной кислоты в растениеводстве // *Плодоводство*.
 2019. Т. 31. С. 288–292.
 6. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Большой практи-
 кум по фотосинтезу. М.: Академия, 2003. С. 54–57.
 7. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.:
 Практика, 1998. 459 с.
 8. Agarwal S., Sairam R.K., Srivastava G.C., Meena R.C.
 Changes in antioxidant enzymes activity and oxidative
 stress by abscisic acid and salicylic acid in wheat geno-
 types // *Biol. plantarum*. 2005. V. 49(4). P. 541–550.
 9. Луговая А.А., Карпец Ю.В., Обозный А.И., Колупаев
 Ю.Е. Стресспротекторное действие жасмоновой и
 янтарной кислот на растения ячменя в условиях
 почвенной засухи // *Агрохимия*. 2014. № 4. С. 48–
 55.
 10. Hayat S., Fariduddin Q., Ali B., Ahmad A. Effect of sal-
 icylic acid on growth and enzyme activities of wheat
 seedlings // *Acta Agron. Hungarica*. 2005. V. 53(4).
 P. 433–437.
 11. Рахматуллина С.Р. Участие дыхательных путей в
 регуляции антиоксидантных систем у растений
 пшеницы: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа,
 2007. 23 с.
 12. Рахманкулова З.Ф., Рахматуллина С.Р., Федяев В.В.
 Влияние салициловой кислоты на про/антиокси-
 дантный статус и энергетический баланс пророст-
 ков пшеницы // *Вестн. Башкир. ун-та*. 2006. № 4.
 С. 41–43.
 13. Knyazeva I.V., Vershinina O.V., Gudimo V.V.,
 Grishin A.A., Dorokhov A.S. The effect of succinic acid
 on the productivity of *Lactuca sativa* L. in artificial
 agroecosystems // *Agron. Res*. 2021. V. 19(2). P. 496–
 506.
<https://doi.org/10.15159/ar.21.092>
 14. Иващенко И.Н. Влияние регуляторов роста на
 устойчивость к стрессовым факторам, урожай-
 ность и качество зерна озимой пшеницы на черно-
 земе выщелоченном: Автореф. дис. ... канд. с.-х.
 наук. Ставрополь, 2010. 27 с.
 15. Moharekar S.T., Lokhande (Moharekar) S.D., Hara T.,
 Tanaka R., Tanaka A., Chavan P.D. Effect of salicylic
 acid on chlorophyll and carotenoid contents of wheat
 and moong seedlings // *Photosynthetica*. 2003.
 V. 41(2). P. 315–317.
 16. Hayat S., Ahmad A., Alyemeni M.N. Salicylic acid: Plant
 growth and development. The Netherlands, Dordrecht:
 Springer, 2013. 389 p.
 17. Кононенко Л.А., Скотников П.В., Скотникова Л.П.,
 Мельников В.И., Числова Л.С. Сортовые особен-
 ности накопления хлорофилла у озимой пшеницы
 при воздействии производных янтарной кисло-
 ты // *Оборонный комплекс – научно-техническо-*
му прогрессу России. 2010. № 4. С. 62–65.
 18. Грабовская Н.И., Бабенко О.Н., Сафронова Н.М.,
 Хусаинова Р.К. Особенности применения янтар-
 ной кислоты в качестве биостимулятора и адапто-
 гена растений. *Совр. наука: актуал. пробл. теории*
и практики. 2020. № 1. С. 28–32.

Influence of Salicylic and Succinic Acids on the Indicators of Growth and Photosynthesis and the Content of Chlorophyll in Wheat Plants Grown under Water Deficiency

A. V. Yakunina^{a,#} and Yu. V. Sinitsyna^a

^aNational Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
 prosp. Gagarina 23, Nizhni Novgorod 603022, Russia

[#]E-mail: yakunina.anastasia@gmail.com

In the conditions of climate warming, the frequency and intensity of droughts have increased, therefore, the development of methods that increase the resistance of crops to water scarcity is of great importance. The aim of the work is to study the effect of salicylic and succinic acids on growth indicators, photosynthetic activity indicators and on the content of pigments in the leaves of plants grown under conditions of irrigation and water scarcity. Wheat plants were grown under laboratory conditions. The seeds were pre-soaked in distilled water (control), in a solution of 0.05 mM salicylic acid or in a solution of 0.05 mM succinic acid. After the appearance of the first roots on the 3rd day, the germinated seeds were transferred to 200 ml vegetative vessels filled with soil and grown at 22–24°C in natural light and daily watering. On day 5, the plants were divided into groups “watering” and “water shortage”. The “water shortage” group was stopped watering until the end of the experiment. On day 11, the indicators of the maximum and effective quantum yield of photosystem II, photochemical and non-photochemical quenching and electron flux density were determined using a FRAME-fluorimeter. On the 16th day of growing plants, the quantitative content of chlorophyll a and b and carotenoids was determined, the relative water content in shoots and roots was calculated. The relative water content in plants hardly changed when treated with acids under irrigation conditions, but in case of water deficiency, treatment with succinic acid reduced the water content in the root by 6%. In conditions of lack of moisture, acid treatment increased the effective quantum yield of photosystem II, the photochemical

quenching coefficient of chlorophyll and the electron flux density by an average of 17–20%. Under irrigation conditions, treatment with salicylic and succinic acids caused a decrease in the content of chlorophyll *a* (by 11 and 32%, respectively), carotenoids (by 57 and 32%) and an increase in the content of chlorophyll *b* (by 49 and 23%). When treated with succinic acid, the total content of chlorophyll *a* + *b* decreased by 14%. In conditions of water deficiency, treatment with salicylic acid increased the relative content of chlorophylls and carotenoids by an average of 2.6 and 3.3 times, when treated with amber – by 3.5 and 2.0 times, respectively, compared with the control in terms of raw weight. The use of the studied acids can be recommended for potential use in agriculture.

Key words: salicylic acid, succinic acid, growth, chlorophyll, water deficiency, wheat.

УДК 631.811.982:581.14:581.11:633.11

ДЕЙСТВИЕ ШТАММОВ БАКТЕРИЙ С РАЗНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ К СИНТЕЗУ АУКСИНОВ И ЦИТОКИНИНОВ НА РОСТ И ВОДНЫЙ ОБМЕН РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ¹

© 2023 г. Е. В. Мартыненко^{1,*}, Т. Н. Архипова¹, З. А. Ахтямова¹, Л. Ю. Кузьмина¹

¹Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

*E-mail: evmart08@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2022 г.

После доработки 26.07.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

Оценили содержание цитокининов, ауксинов, хлорофилла, транспирацию, содержание и относительное содержание воды, водный и осмотический потенциалы, гидравлическую проводимость, морфологические параметры растений твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) после введения в их ризосферу штаммов цитокининпродуцирующих (*Bacillus subtilis* IB-22) или ауксинпродуцирующих (*Pseudomonas mandelii* IB-Ki14) бактерий. Эксперименты проводили в лабораторных условиях в сосудах с агрочерноземом при оптимальном уровне освещенности. Показано, что цитокининпродуцирующий штамм в большей степени стимулировал рост растений, накопление хлорофилла, увеличение транспирации по сравнению с растениями, обработанными ауксинпродуцирующим штаммом. Растения под влиянием штамма *B. subtilis* IB-22 теряли больше воды при транспирации, при этом снижения уровня оводненности и тургора не происходило. Сделан вывод о том, что “бактериальные цитокинины” влияют на водный обмен растений пшеницы за счет увеличения гидравлической проводимости, а “бактериальные ауксины” – в большей степени за счет осмотической регуляции. Более выраженную стимуляцию роста растений бактериями штамма *B. subtilis* IB-22 можно объяснить также способностью цитокининов в большей степени влиять на содержание хлорофилла по сравнению с ауксинами.

Ключевые слова: ростстимулирующие ризосферные бактерии, твердая пшеница *Triticum durum* Desf., рост, водный обмен, цитокинины, ауксины.

DOI: 10.31857/S0002188123010064, **EDN:** GOFTGP

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главнейших отраслей мирового сельского хозяйства остается производство зерна. Пшеница является важнейшей сельскохозяйственной культурой, требовательной к условиям выращивания. Повышение ее урожайности всегда является актуальной задачей. В последнее время для активации роста растений и увеличения урожайности стали использовать ростстимулирующие бактерии. Механизм их положительного влияния на растения до конца не известен, однако часто ростстимулирующее действие некоторых микроорганизмов на растения связывают с их способностью синтезировать фитогормоны [1–3]. Присутствие в ризосфере микроорганизмов, продуцирующих гормоны, способно влиять на содержание гормонов и в почве, и в растениях.

В свою очередь это может иметь значение для роста растений [4, 5].

Активация роста растений под влиянием ризосферных бактерий сопровождается увеличением площади листьев, с которой испаряется вода, способствуя возрастанию транспирации, что может привести к снижению оводненности листьев. Тем не менее, этого не происходит, и во многих публикациях сообщается о том, что присутствие в ризосфере ростстимулирующих бактерий не снижает содержание воды в растениях [1, 6, 7]. Эти результаты свидетельствуют о том, что бактерии влияют не только на рост растений, но и на водный обмен. Однако сведений о сравнении влияния на растения разных продуцируемых бактериями гормонов, участвующих в регуляции водного обмена, недостаточно. В своих экспериментах ранее мы использовали либо ауксин-, либо цитокининпродуцирующие бактерии, которые оказыва-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-14-00070).

ли ростстимулирующее действие на растения пшеницы. Поэтому представляло интерес выяснить, как проявят себя бактерии, синтезирующие разные фитогормоны (цитокинины или ауксины), в одном эксперименте.

Цель работы – изучение влияния на рост и водный обмен растений пшеницы ризосферных микроорганизмов в зависимости от их способности продуцировать ауксины либо цитокинины.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта для сравнения влияния ростстимулирующих бактерий с разной способностью к синтезу ауксинов и цитокининов на рост и водный обмен растений использовали твердую яровую пшеницу *Triticum durum* Desf. сорта Башкирская 27.

Для инокуляции растений использовали грамположительные аэробные спорообразующие цитокининпродуцирующие бактерии *Bacillus subtilis* IB-22 (GenBank MT590663) [8] и грамотрицательные ауксинпродуцирующие бактерии *Pseudomonas mandelii* IB-Ki14 (VKM В-3250) [9] из коллекции микроорганизмов Уфимского института биологии УФИЦ РАН. Бактериальные препараты получали культивированием штаммов на средах: *B. subtilis* IB-22 – на среде K1G [10], *P. mandelii* IB-Ki14 – на среде Кинг Б [11]. Штаммы микроорганизмов культивировали в колбах Эрленмейера с соответствующей питательной средой на шейкере (160 об./мин): бациллы – в течение 72 ч при температуре 37°C, грамотрицательные бактерии – 48 ч при 28°C.

Исследования проводили в лабораторных условиях. Для обеспечения дренажа слой гравия помещали на дно сосудов объемом 500 см³. После установки стеклянной трубки для газообмена сосуды заполняли 0.45 кг сухой почвы (агрочернозем, характеризующийся средней гумусированностью (6.3%), слабокислой реакцией среды), содержащей 10% песка [12]. За 3-е сут до начала эксперимента почву в сосудах поливали водой до 100% ППВ. Семена пшеницы стерилизовали, замачивая их в растворе 96%-ного этанола и 3%-ного H₂O₂ (1 : 1, v/v) в течение 5 мин и затем многократно промывали дистиллированной водой. В каждый сосуд помещали 12 семян, одновременно внося по 1 мл бактериальной суспензии на семя (10⁷ КОЕ/мл). Растения выращивали на светоплощадке с освещенностью 420 ммоль/м²/с PAR, 14-часовым фотопериодом при 24°C. В качестве контроля использовали сосуды с растениями, выращенными в почве без внесения бактерий.

Влажность почвы поддерживали на уровне 70% ППВ, поливая растения дистиллированной водой. Количество необходимой для полива воды рассчитывали, ежедневно взвешивая сосуды с растениями. Через 14 сут с момента инокуляции растений оценивали сырую и сухую массу корней и побегов, площадь листьев. Показатели водного обмена – транспирацию, содержание воды в корнях и листьях, относительное содержание воды (ОСВ) в зрелом первом листе, осмоляльность листьев, водный потенциал почвы и побега, гидравлическую проводимость оценивали на 13-е сут с начала эксперимента.

Транспирацию измеряли весовым методом на 13-е сут с начала эксперимента в течение 4 ч, предварительно закрывая почву для предотвращения испарения воды. Интенсивность транспирации рассчитывали по уменьшению массы сосудов с растениями, поделенной на время между измерениями и на количество растений в сосуде (для измерения транспирации использовали 4 сосуда в варианте).

Оводненность листьев рассчитывали по формуле: ((сырая масса – сухая масса) / сырая масса) × 100%. Для определения относительного содержания воды сформированный первый лист нескольких растений взвешивали и погружали основанием в дистиллированную воду, налитую в стеклянный сосуд, который затем закрывали для насыщения воздуха влагой и помещали в темноту при комнатной температуре. Через 24 ч листья взвешивали для определения тургорной массы, высушивали и рассчитывали показатель ОСВ по формуле: ОСВ = ((сырая масса – сухая масса) / (тургорная масса – сухая масса)) × 100%.

Образцы для измерения осмотического потенциала были получены путем замораживания и оттаивания тканей побегов и последующего центрифугирования. Осмотический потенциал полученного клеточного сока измеряли с помощью цифрового микроосмометра (CAMLAB Limited, UK).

Водный потенциал побега (зрелого листа) и почвы оценивали с помощью психрометра (PSYPRO, “Wescor”, США).

Гидравлическую проводимость при транспорте воды из корней в листья (*L*) рассчитывали по формуле: $L = T / [(\Psi_s - \Psi_l) \cdot P]$, где *T* – транспирация, *P* – масса корней, Ψ_s и Ψ_l – водный потенциал почвы и листа соответственно (модифицировано по [13]).

Содержание хлорофилла в листьях оценивали с помощью прибора DUALEX SCIENTIFIC+ (FORCE-A, France) на 14-е сут эксперимента.

Таблица 1. Морфологические параметры роста 14-суточных растений твердой яровой пшеницы *Triticum durum* Desf. (сырая масса корней ($n = 10$), побегов ($n = 40$) и площадь листьев ($n = 40$)) при интродукции в ризосферу гормонпродуцирующих бактерий

Вариант	Сырая масса корней	Сырая масса побегов	Площадь листьев, см ² /растение
	мг/растение		
Контроль без обработки	96 ± 11 ^б	305 ± 8 ^а	15.2 ± 0.7 ^а
<i>P. mandelii</i> IB-Ki14	90 ± 8 ^б	357 ± 13 ^б	19.3 ± 0.6 ^б
<i>B. subtilis</i> IB-22	77 ± 6 ^а	395 ± 10 ^б	21.1 ± 0.8 ^б

Примечание. Указаны средние и их ошибки. Значимые различия между средними в столбцах обозначены различными буквами ($p \leq 0.05$, t -test). То же в табл. 2.

Для анализа гормонов отбирали образцы побегов и корней 5-ти растений из разных сосудов ($n = 6$). Гормоны экстрагировали в течение 16 ч 80%-ным этанолом в соотношении 1 : 10. Затем отделенный фильтрацией спиртовой экстракт упаривали до водного остатка. Ауксины (ИУК) экстрагировали диэтиловым эфиром, как описано в [14] из половины водного остатка. Определение содержания цитокининов (суммы зеатина, его рибозида и нуклеотида) проводили после очистки и концентрирования другой половины водного остатка на картридже C18 (Waters Corporation, USA) и хроматографического разделения форм цитокининов [15]. Количественное определение гормонов проводили с помощью твердофазного иммуноферментного анализа с использованием специфических антител, как описано в [16].

Статистическую обработку данных проводили по стандартным программам MS Excel. На рисунках и в таблицах представлены средние и ошибки средних. Достоверность различий оценивали по t -критерию Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Введение бактерий в ризосферу растений пшеницы увеличивало массу побегов и площадь листьев по сравнению с соответствующим контролем, что свидетельствовало о стимуляции роста растений (табл. 1). Отмечено увеличение сырой массы побегов: на 30% по сравнению с контрольными растениями под влиянием цитокининпродуцирующих бактерий. В варианте с псевдомонадами прибавка массы побега была меньше (17% по отношению к контрольным растениям). При этом сырая масса корней была меньше всего у растений, обработанных бактериями (на 19% меньше, чем в контроле), что соответствует данным о способности цитокининов (в том числе продуцируемых бактериями этого штамма) подавлять рост корней [17].

В присутствии цитокининпродуцирующей бактерии *B. subtilis* IB-22 наблюдали большее увеличение площади листьев растений пшеницы по сравнению с растениями, инокулированными *P. mandelii* IB-Ki14: под влиянием псевдомонад площадь листьев увеличивалась на 27, а под влиянием бактерий — на 40% соответственно.

Интродукция бактерий в ризосферу повышала содержание ауксинов в корнях растений, обработанных псевдомонадами (рис. 1), в то время как по содержанию ауксинов в побегах не было достоверных различий между вариантами.

Введение в ризосферу растений цитокининпродуцирующей бактерии *B. subtilis* IB-22 приводило к наибольшему увеличению содержания цитокининов в побегах и корнях растений пшеницы (рис. 2). Накопление происходило в основном за счет зеатина, в меньшей степени — за счет зеатинрибозида. Под воздействием псевдомонад было отмечено небольшое увеличение содержания цитокининов в побегах растений по сравнению с контролем за счет накопления зеатиннуклеотида.

Такое накопление ауксинов и цитокининов в растениях могло быть обусловлено поглощением гормонов, продуцируемых бактериями. Хотя не во всех случаях повышение уровня гормонов под влиянием бактерий можно было объяснить способностью бактерий продуцировать эти гормоны [18], действие *P. mandelii* IB-Ki14 и *B. subtilis* IB-22 на содержание ауксинов и цитокининов в растениях соответствовало их способности синтезировать данные гормоны. Как цитокинины, так и ауксины относятся к гормонам стимулирующего типа действия по отношению к побегам растений. Тем не менее, повышение концентрации цитокининов в растениях под влиянием бактерий оказывало более заметное стимулирующее действие на рост побега, чем повышение содержания ауксинов.

Бактеризация приводила к увеличению транспирации растений в расчете на целый лист (табл. 2),

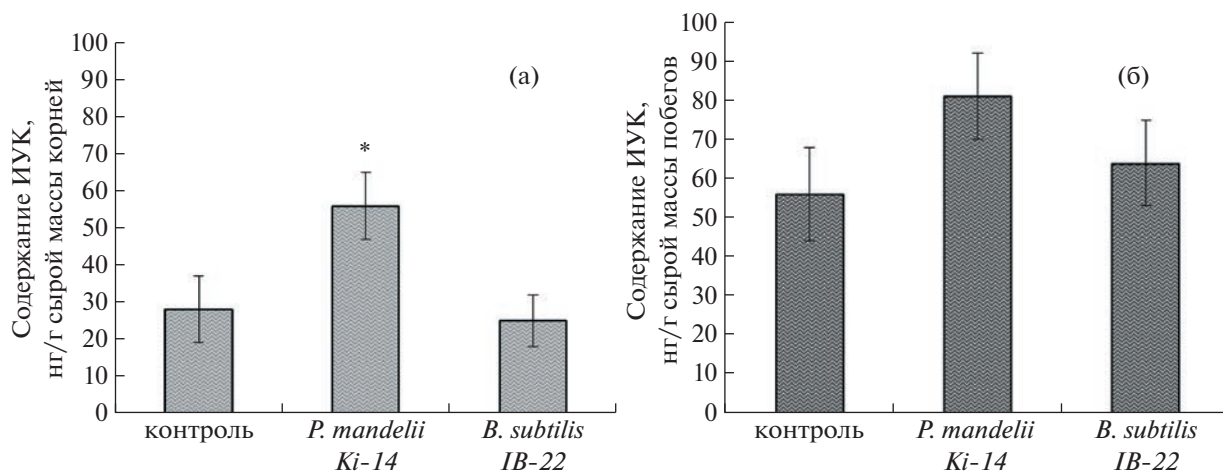


Рис. 1. Содержание ауксинов (ИУК) в корнях (а) и побегах (б) растений пшеницы на 6-е сут после воздействия *P. mandelii* IB-Ki14 и *B. subtilis* IB-22. Звездочками обозначены средние, достоверно отличающиеся от контроля ($n = 6$, $p \leq 0.05$, t -test).

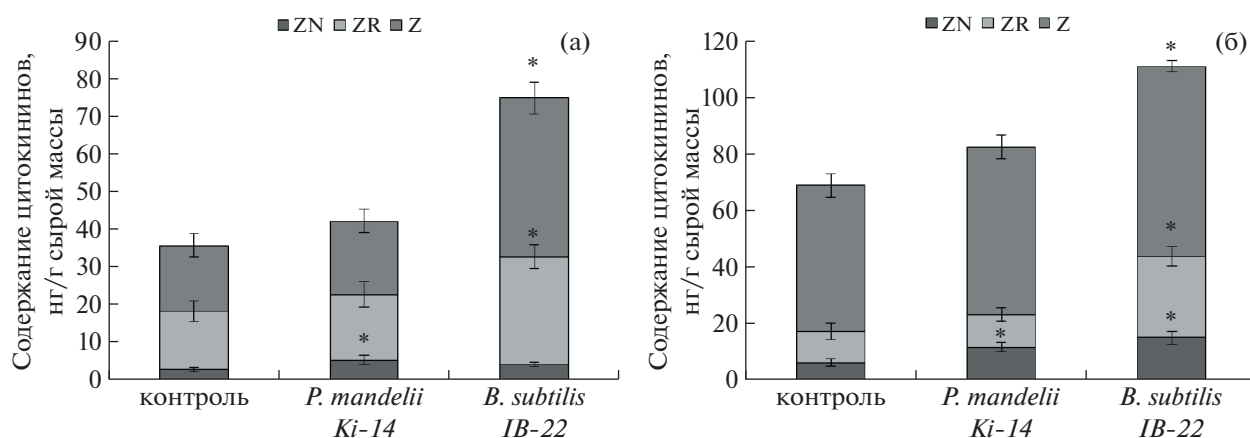


Рис. 2. Содержание цитокининов (Z – зеатин, ZN – зеатиннуклеотид, ZR – зеатинрибозид) в корнях (а) и побегах (б) растений пшеницы на 6-е сут после воздействия *P. mandelii* IB-Ki14 и *B. subtilis* IB-22. Звездочками обозначены средние, достоверно отличающиеся от контроля ($n = 6$, $p \leq 0.05$, t -test).

что могло быть следствием как увеличения площади листьев, так и открытия устьиц. При расчете на единицу площади в варианте с обработкой псевдомонадами этот показатель оставался на уровне контрольных растений (10.9 мг/см²/ч в варианте обработки *P. mandelii* IB-Ki14 по сравнению с 11.3 мг/см²/ч в контроле). А в случае обработки *B. subtilis* IB-22 потери воды на единицу площади были на 30% больше, чем в контроле (14.6 мг/см²/ч по сравнению с 11.3 мг/см²/ч). Транспирация при воздействии бацилл возрастала в меньшей степени при расчете на единицу площади, чем на целый лист.

Очевидно, при обработке псевдомонадами более высокий уровень транспирации у инокулированных растений был обусловлен большей пло-

щадью листьев, с которой испарялась вода, в то время как по скорости потерь воды в расчете на единицу площади обработанные растения были на уровне контроля. Для варианта обработки бациллами отмечено увеличение транспирации и в расчете на целое растение, и на единицу площади (30% по сравнению с контролем). Это означает, что с единицы площади испарялось большее количество воды, чем у контрольных растений. Эти результаты свидетельствовали о возрастании устьичной проводимости под влиянием бацилл, что соответствовало сведениям о способности цитокининов, продуцируемых бактериями данного штамма, поддерживать устьица в открытом состоянии [19].

Таблица 2. Транспирация и гидравлическая проводимость растений пшеницы на 13-е сут при интродукции в ризосферу гормонпродуцирующих бактерий

Вариант	Транспирация		Гидравлическая проводимость, мг H ₂ O/ч/МПа/мг корней
	мг/растение/ч	мг/см ² /ч	
Контроль	171 ± 6 ^a	11.3 ± 0.9 ^a	11.9 ± 2.0 ^a
<i>P. mandelii</i> IB-Ki14	211 ± 3 ^b	10.9 ± 0.5 ^a	9.2 ± 1.5 ^a
<i>B. subtilis</i> IB-22	308 ± 12 ^b	14.6 ± 1.1 ^b	17.3 ± 2.7 ^b

Примечание. Для транспирации $n = 4$ (4 стакана по 12 растений в каждом), для гидравлической проводимости $n = 6$.

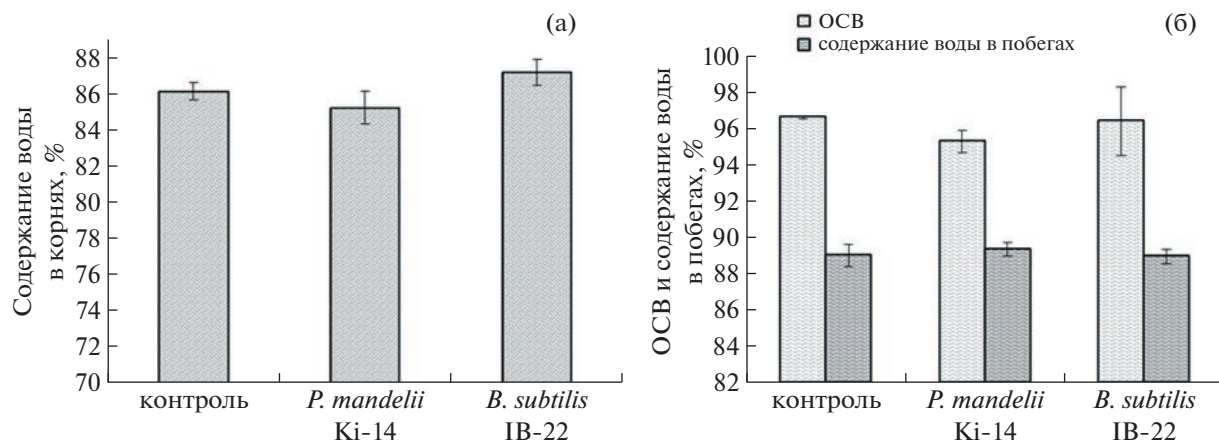
По содержанию воды в побегах и корнях и ОСВ в листьях не было обнаружено достоверных различий между растениями разных вариантов обработки (рис. 3). При воздействии бациллами величина водного потенциала листьев достоверно не отличалась от контроля. Важно было понять, каким образом растения смогли поддерживать оводненность своих тканей, несмотря на повышение скорости потери воды с транспирацией под влиянием бактерий.

Отмечено снижение водного потенциала в варианте с обработкой псевдомонадами, что способствовало увеличению движущей силы для подъема воды из корней (рис. 4). При этом наблюдали достоверное снижение осмотического потенциала листьев растений, обработанных ауксинпродуцентами по сравнению с контрольными растениями, что обеспечивало поддержание тургора.

Но насколько эти небольшие изменения функционально значимы для растений, неизвестно. Можно предположить, что они играют роль в стабилизации водного баланса растений в данном варианте обработки.

Уже давно было замечено, что гидравлическая проводимость меняется в соответствие с транспирационным запросом: возрастает у транспирирующих растений и снижается в отсутствии транспирации [20–22]. Это соответствует полученным нами данным, когда при обработке *B. subtilis* IB-22 отмечали большее испарение, сопровождавшееся увеличением гидравлической проводимости. Возрастание этого показателя с увеличением транспирационного потока обеспечивало поддержание баланса между поглощением и испарением воды. Изменение гидравлической проводимости корней могло быть обусловлено модуляцией активности аквапоринов. В литературе была показана способность бактерий повышать экспрессию генов, кодирующих аквапорины растений кукурузы [23], но требуются дальнейшие исследования для того, чтобы проверить, каким образом влияли бациллы на активность аквапоринов.

Транспирация растений пшеницы при обработке *P. mandelii* IB-Ki14 была больше, чем в контроле (табл. 2). Бактерии стимулировали рост, что свидетельствовало о том, что растения справлялись с возросшими потерями воды. У растений

**Рис. 3.** Содержание воды в корнях (а), ОСВ и содержание воды в побегах (б) растений пшеницы ($n = 7$) на 13-е сут после воздействия *P. mandelii* IB-Ki14 и *B. subtilis* IB-22.

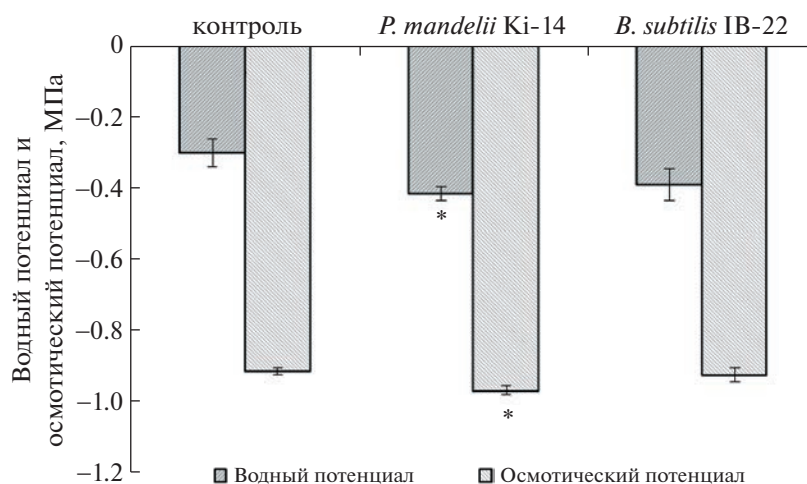


Рис. 4. Водный и осмотический потенциал листьев пшеницы на 13-е сут после воздействия *P. mandelii* IB-Ki14 и *B. subtilis* IB-22. Звездочками обозначены средние, достоверно отличающиеся от контроля ($n = 5, p \leq 0.05, t$ -test).

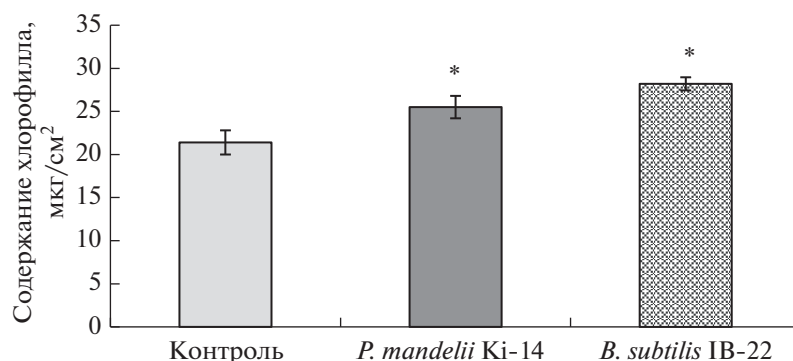


Рис. 5. Содержание хлорофилла во 2-м листе растений пшеницы после воздействия *P. mandelii* IB-Ki14 и *B. subtilis* IB-22. Звездочками обозначены средние, достоверно отличающиеся от контроля ($n = 25, p \leq 0.05, t$ -test).

пшеницы под воздействием бактерий транспирация была еще выше, чем у растений, обработанных псевдомонадами. Несмотря на это, снижения оводненности растений не происходило, вероятно, за счет того, что “бактериальные гормоны” – цитокинины, синтезируемые *B. subtilis* IB-22, в большей степени способствовали поддержанию оводненности на уровне контроля за счет увеличения гидравлической проводимости. В то же время ауксины, продуцируемые *P. mandelii* IB-Ki14, могли влиять на водный обмен за счет осморегуляции.

В ходе эксперимента зарегистрировали повышение содержания хлорофилла в обработанных бактериями растениях, при этом больший эффект проявлялся при обработке *B. subtilis* IB-22 (рис. 5). Это могло быть обусловлено продукцией цитокининов данным штаммом, поскольку физиологическая роль этого фитогормона в клетках растений многообразна и включает регуляцию

многих процессов, лежащих в основе жизнедеятельности растений на протяжении всего онтогенеза, в том числе и фотосинтеза [24]. Повышение уровня хлорофилла должно вносить существенный вклад в процесс накопления биомассы растений, и этим можно объяснять большую ростстимулирующую способность *B. subtilis* IB-22.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительное изучение влияния воздействия штаммов бактерий, продуцирующих либо цитокинины (*B. subtilis* IB-22), либо ауксины (*P. mandelii* IB-Ki14), выявило их способность повышать содержание в растениях пшеницы тех гормонов, которые синтезировали данные бактерии. Оба штамма бактерий стимулировали рост растений. Тем не менее, можно отметить наиболее выраженное положительное влияние цитокининпродуцентов на рост и водный обмен растений пше-

ницы, что предположительно можно связать с продукцией цитокининов бактериями. Большую эффективность штамма бацилл можно объяснить тем, что под их влиянием возрастал уровень устьичной проводимости и газообмена (о чем свидетельствовал более высокий уровень транспирации в расчете на единицу площади), а также содержание хлорофилла, что способствовало активации фотосинтеза. Оба эти показателя контролируют цитокинины, и увеличение уровня этих гормонов под влиянием бацилл очевидно было тем фактором, который способствовал большей стимуляции роста растений по сравнению с псевдомонадами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dodd I.C., Zinovkina N.Y., Safronova V.I., Belimov A.A.* Rhizobacterial mediation of plant hormone status // *Ann. Appl. Biol.* 2010. V. 157. P. 361–379. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00439.x>
2. *Spaepen S., Vanderleyden J.* Auxin and plant-microbe interactions. // *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* 2011. V. 3(4). <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001438>
3. *Shi T.-Q., Peng H., Zeng S.-Y., Ji R.-Y., Shi K., Huang H., Ji X.-J.* Microbial production of plant. V. Hormones: opportunities and challenges // *Bioengineered.* 2017. V. 157. P. 124–128. <https://doi.org/10.1080/21655979.2016.1212138>
4. *Siyar S., Inayat N., Hussain F.* Plant growth promoting rhizobacteria and plants' improvement: a mini-review // *PSM Biol. Res.* 2019. V. 41. P. 1–5.
5. *Kudoyarova G., Arkhipova T., Korshunova T., Bakaeva M., Loginov O., Dodd I.* Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. P. 1368. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01368>
6. *Grover M., Madhubala R., Ali S.Z., Yadav S.K., Venkateswarlu B.* Influence of *Bacillus* spp. strains on seedling growth and physiological parameters of sorghum under moisture stress conditions // *J. Basic Microbiol.* 2014. V. 54. P. 951–961. <https://doi.org/10.1002/jobm.201300250>
7. *Mohanty P., Singh P., Chakraborty D., Mishra. S., Pattnaik R.* Insight into the role of PGPR in sustainable agriculture and environment // *Front. Sustain. Food Syst.* 2021. V. 5. P. 667150. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.667150>
8. *Архипова Т.Н., Веселов С.Ю., Мелентьев А.И., Мартыненко Е.В., Кудоярова Г.П.* Сравнение действия штаммов бактерий, различающихся по способности синтезировать цитокинины, на рост и содержание цитокининов в растениях пшеницы // *Физиология растений.* 2006. Т. 53. № 4. С. 567–573.
9. *Кузьмина Л.Ю., Высоцкая Л.Б., Галимзянова Н.Ф., Гильванова Е.В., Рябова А.С., Мелентьев А.И.* Новые штаммы фосфатмобилизирующих бактерий, продуцирующих ауксин, перспективные для сельскохозяйственной биотехнологии // *Изв. УНЦ РАН.* 2015. № 1. С. 40–46.
10. *Кузьмина Л.Ю., Архипова Т.Н., Актуганов Г.Э., Галимзянова Н.Ф., Четвериков С.П., Мелентьев А.И.* Бактерии родов *Advenella, Bacillus* и *Pseudomonas* – перспективная основа биопрепаратов для растениеводства // *Биомика.* 2018. Т. 10. № 1. С. 16–19. <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2018-47>
11. *King E.O., Ward M.K., Raney D.E.* Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein // *J. Lab. Clin. Med.* 1954. V. 44. P. 301–307.
12. *Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Галимзянова Н.Ф., Сулейманов Р.Р., Комиссаров М.А., Сидорова Л.В., Гималетдинова Г.А.* Использование удобрения на основе славинны для повышения плодородия эродированного чернозема типичного // *Агрехимия.* 2014. № 6. С. 35–42.
13. *Bunce J.A., Ziska L.H.* Decreased hydraulic conductance in plants at elevated carbon dioxide. // *Plant Cell Environ.* 1998. V. 21. P. 121–126.
14. *Veselov S.Yu., Kudoyarova G.R., Egutkin N.L., Gyulizade V.G., Mustafina A.R., Kof E.K.* Modified solvent partitioning scheme providing increased specificity and rapidity of immunoassay for indole 3-acetic acid // *Physiol. Plantarum.* 1992. V. 86. P. 93–96.
15. *Arkhipova T.N., Evseeva N.V., Tkachenko O.V., Burygin G.L., Vysotskaya L.B., Akhtyamova Z.A., Kudoyarova G.R.* Effect of rhizobacteria on phytohormone status of potato microclones under osmotic stress *in vitro* // *Biomolecules.* 2020. V. 10. P. 1231.
16. *Веселов С.Ю.* Использование антител для количественного определения, очистки и локализации регуляторов роста растений // *Уфа: Изд-во БГУ,* 1998. 138 с.
17. *Werner T., Motyka V., Laucou V., Smets R., Oneckelen H.V., Schmülling T.H.* Cytokinin-deficient transgenic *Arabidopsis* plants show multiple developmental alterations indicating opposite functions of cytokinins in the regulation of shoot and meristem activity // *Plant Cell.* 2003. V. 15. P. 2532–2550.
18. *Contesto C., Milesi S., Mantelin S., Zancarini A., Desbrosses G., Varoquaux F., Bellini C., Kowalczyk M., Touraine B.* The auxin-signaling pathway is required for the lateral root response of *Arabidopsis* to the rhizobacterium *Phyllobacterium brassicacearum* // *Planta.* 2010. V. 232. P. 1455–1470.
19. *Davies W.J., Kudoyarova G., Hartung W.* Long-distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediation of the plant's response to drought // *J. Plant Growth Regul.* 2005. V. 24. № 4. P. 285–295
20. *Brouwer R.* The regulating influence of transpiration and suction tension on the water and salt uptake by the roots of intact *Vicia faba* plants // *Acta Bot. Neerl.* 1954. V. 3. P. 264–312.
21. *Steudle E.* Water uptake by roots: effects of water deficit // *J. Exp. Bot.* 2000. V. 51. P. 1531–1542. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1531>
22. *Kudoyarova G., Veselova S., Hartung W., Farhutdinov R., Veselov D., Sharipova G.* Involvement of root ABA and hydraulic conductivity in the control of water relations in wheat plants exposed to increased evaporative de-

- mand // *Planta*. 2011. V. 233(1). P. 87–94.
<https://doi.org/10.1007/s00425-010-1286-7>
23. Marulanda A., Azcón R., Chaumont F., Ruiz-Lozano J. M., Aroca R. Regulation of plasma membrane aquaporins by inoculation with a *Bacillus megaterium* strain in maize (*Zea mays* L.) plants under unstressed and salt-stressed conditions // *Planta*. 2010. V. 232. P. 533–543.
<https://doi.org/10.1007/s00425-010-1196-8>
24. Cortleven A., Schmölling T. Regulation of chloroplast development and function by cytokinin // *J. Exp. Bot.* 2015. V. 66(16). P. 4999–5013.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erv132>

Effect of Bacterial Strains with Different Ability to Synthesize Auxins and Cytokinins on the Growth and Water Relations of Wheat Plants

E. V. Martynenko^{a, #}, T. N. Arkhipova^a, Z. A. Akhtyamova^a, and L. Y. Kuz'mina^a

^aUfa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre of the RAS
 prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

[#]E-mail: evmart08@mail.ru

The content of cytokinins, auxins, chlorophyll, transpiration, content and relative content of water, water and osmotic potentials, hydraulic conductivity, morphological parameters of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) plants after the introduction into their rhizosphere of cytokinin-producing strains (*Bacillus subtilis* IB-22) or auxin-producing (*Pseudomonas mandelii* IB-Ki14) bacteria was evaluated. The experiments were carried out in laboratory conditions in vessels with agrochernozem at an optimal level of illumination. It was shown that the cytokinin-producing strain stimulated plant growth, accumulation of chlorophyll, and increased transpiration to a greater extent compared to plants treated with the auxin-producing strain. Plants under the influence of the *B. subtilis* IB-22 strain lost more water during transpiration, while there was no decrease in the level of water content and turgor. It is concluded that “bacterial cytokinins” affect the water metabolism of wheat plants by increasing hydraulic conductivity, and “bacterial auxins” – to a greater extent due to osmotic regulation. A more significant stimulation of plant growth by bacteria of the *B. subtilis* IB-22 strain is also explained by the ability of cytokinins to influence the chlorophyll content to a greater extent than auxins.

Key words: growth-stimulating rhizospheric bacteria, *Triticum durum* Desf., growth, water metabolism, cytokinins, auxins.

УДК 633.71:631.811.98

РОЛЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕТАРДАНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ ТАБАКА

© 2023 г. Т. В. Плотникова^{1,*}, С. В. Гвоздецкая¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт табака, махорки и табачных изделий
ул. Московская 42, Краснодар 350072, Россия

*E-mail: agrotobacco@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2022 г.

После доработки 25.05.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

Изучено влияние ретардантов на растения табака в рассадный и полевой периоды. Установлено, что двукратная обработка рассады ретардантом Атлет в фазах “ушки” и “годная к высадке рассада” в дозе 3.0 мл/м² и однократная обработка в дозе 3.5 мл/м² в фазе “годная к высадке рассада”, способствовала приостановке роста растений. Отмечено снижение длины табачных растений на 3–17, утолщение диаметра стебля на 14–19, увеличение массы стеблей на 4–11 и массы корней на 44–50%. Выход стандартной рассады в обработанных ретардантом вариантах увеличился на 5–6%. Степень развития корневой системы растений, установленная по способности удерживать питательную смесь, возросла на 61–100%. Однократное применение удобрения с ретардантными свойствами Cultifort Raiz в дозе 3.0 мл/м² в фазе “годная к высадке рассада” способствовало сокращению длины табачных растений на 2–8, увеличению диаметра стебля на 5, массы стеблей на 8, корней на 68%. Способность корневой системы удерживать парниковую смесь увеличивалась на 118%. Отмечено повышение выхода стандартной рассады на 2%. В полевой период ретардантный эффект от примененных агрохимикатов сохранялся в течение 45 сут после высадки. Лучший результат по получению дополнительного урожая в размере 6.2 ц/га (на 21%) отмечен на фоне применения препарата Атлет в дозе 3.0 мл/м² при двукратной обработке. При применении ретарданта Атлет в дозе 3.5 мл/м² при однократной обработке дополнительный урожай составил 5.4 ц/га (на 18%). Использование удобрения Cultifort Raiz в дозе 3.0 мл/м² (однократно), способствовало повышению урожайности сырья на 3.9 ц/га (на 13%). В варианте применения эталона получена самая высокая прибавка урожайности – 9.0 ц/га (на 30%). Накопление сухого вещества (материальность) в табачном сырье повышалось при увеличении доз агрохимикатов. Применение ретардантов способствовало улучшению химического состава табачного сырья, а именно увеличению числа Шмука (углеводно-белкового соотношения).

Ключевые слова: табак, рассада, ретарданты, препараты Атлет, Cultifort Raiz, урожайность, качество табачного сырья.

DOI: 10.31857/S0002188123010106, **EDN:** FENVWA

ВВЕДЕНИЕ

Серьезной проблемой, которая может возникнуть в период высадки рассады табака в поле, является ухудшение погодных условий, препятствующих проведению мероприятия в оптимальные сроки, в результате чего происходит вытягивание растений. Приостановка роста табака важна и для поэтапной высадки рассады в поле. Конечно, можно проводить посев табака в разные сроки для высадки в разные сроки, однако установлено, что поздние посевы часто совпадают с высокими температурами воздуха, которые способствуют пересыханию парникового грунта, что губительно влияет на нежные всходы табака. Поэтому целесообразнее высевать табак раньше и при необ-

ходимости сдерживать его рост. В целях предотвращения перерастания рассады рекомендовано применять ретарданты. Данные препараты являются регуляторами роста химического происхождения, действие которых проявляется в ингибировании линейного роста стеблей, уменьшении вытягивания междоузлий. Данный механизм является противоположным влиянию фитогормонов гиббереллинов. На фоне замедления роста растения, укорачивания и утолщения, т.е. повышения прочности стебля, отмечено увеличение количества придаточных корней, что повышает устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды, особенно это важно для

пересадочной культуры в период приживания в поле, к которой и принадлежит табак.

Ретардантными свойствами обладает около тысячи химических соединений, большинство из которых относят к 4-м группам веществ. Четвертичные ониеые соединения, среди которых наиболее популярен хлормекватхлорид или хлорхлинхлорид (**ТУР** или **ССС**) и морфол, ретардантный эффект которых обусловлен способностью прерывать биосинтез гиббереллинов у зерновых культур. Механизм действия производных гидразина не связан с влиянием на синтез гиббереллинов, а обусловлен подавлением гормональной активности. Препараты группы производных триазола блокируют биосинтез гиббереллинов. Этиленпродуцирующие препараты не прерывают биосинтез гиббереллина, но их действие связано с антигиббереллиновым эффектом [1].

Одно из распространенных направлений использования ретардантов как в нашей стране, так и за рубежом – это предотвращение полегания зерновых культур. Применяют ретарданты ЦеЦе-Це 750, Моддус, Spermine и Paclobutrazol до фазы появления колоса [2, 3]. Обработки ретардантом, например препаратом Фоликур, применяют для повышения урожайности и перезимовки растений озимого рапса [4]. Целенаправленно, для повышения качества сырья лекарственных растений (ромашки аптечной, змееголовника молдавского, пажитника сенного) применяют ретардант нового поколения Харди на основе эпибрасинолидов и α -дифенолов, являющихся естественными для растений соединениями. При этом в сырье не накапливаются несвойственные данному виду растений химические соединения, отмечено увеличение урожайности семян и повышение выхода эфирного масла [5–7]. Также распространено применение ретардантов на рассадных культурах. Например, опрыскивание растений томатов препаратом ТУР уменьшает высоту растений на 15–22%, усиливает рост корневой системы. При этом отмечено повышение содержания хлорофилла в листьях, что положительно сказывается при адаптации томатов к пониженной интенсивности света в пленочных теплицах. Цветение растений ускоряется на 7–8 сут, увеличивается число бутонов, цветков, завязей. Ранний урожай томатов повышается в 2–3 раза, а общий – на 18–22% [8].

Для исследований на табаке был взят ретардант Атлет, ВР (д.в. хлормекватхлорид 600 г/л, ООО фирма “Зеленая Аптека Садовода”, Россия) из препарата фирмы “Рокита-Агро С.А.” (Польша), который рекомендован к применению на капусте, декоративных кустарниках и цветочных культурах, а также на рассаде томата, перца,

баклажана. Препарат замедляет рост растений в высоту, способствует формированию растений с толстыми стеблями, темно-зелеными листьями и мощными корнями, а также раннему цветению и плодоношению. Ретардант относится к 3-му классу опасности (умеренно опасные), безопасен для пчел и полезной микрофлоры почвы [9].

Кроме регуляторов роста замедление роста растений может достигаться с помощью удобрений. Современные агрохимикаты так же, как и природные ретарданты, способны минимально накапливаться в почве и растениях и улучшать качество продукции. По данным производителя, фосфорно-калийное удобрение Cultifort Raiz (Культифорт Раиз) способствует развитию корневой системы, а также сокращению длины междоузлий и предотвращению перерастания растений. Рекомендован для применения на колосовых, при этом регулирует рост стеблей, предупреждая их полегание, повышает их продуктивность. Относится к 4-му классу опасности (мало опасные). Произведен в Испании [10].

Rexolin ABC (Рексолин) – уникальное микроудобрение (Акзо Нобель, Нидерланды) рекомендовано для предпосевной обработки семян и проведения некорневых подкормок. В состав удобрения входят следующие микроэлементы: MgO – 9, CO₂ – 7, Fe – 4, B – 0.5, Mo – 0.1, Cu – 4, Zn – 1.5, Co – 0.03% [11]. Ранее удобрение, при подборе эффективных доз для применения на табаке проявило ретардантные свойства, поэтому использовано в опыте в качестве эталона. На данный момент агрохимикат не входит в список разрешенных препаратов для применения на территории РФ.

Поэтому цель работы – изучение влияния ретардантов на рост, развитие, продуктивность табака и качество сырья для включения в технологию его выращивания.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в парниковом хозяйстве и на опытно-селекционном участке ВНИИТТИ (г. Краснодар) в 2020–2021 гг. на сорте табака Трапезонд 25. Посев и выращивание рассады осуществляли в парнике на питательной смеси с 50%-ной обеспеченностью основными питательными элементами (N₃₅P₃₀K₃₅) от оптимального содержания. Данная питательная смесь являлась фоном и контролем в опыте. Влияние регулятора роста Атлет и удобрения Cultifort Raiz на табачные растения изучали в рассадный и полевой периоды. Рассадку опрыскивали в фазах “ушки” (за 17–20 сут до выборки) и “годная к высадке рассада” (за 7–10 сут до выборки) при дву-

кратном внесении и в фазе “годная к высадке рассада” (за 7–10 сут до выборки) при однократном внесении. Ретардант Атлет испытывали в дозах 2.5, 3.0 и 3.5 мл/м², удобрение Cultifort Raiz – в дозе 3.0 мл/м². В качестве эталона использовали препарат Rexolin ABC в дозе 3.0 г/м². Внесение эталона проводили за 7–10 сут до выборки рассады. Обработку препаратами осуществляли рабочими растворами (1 л/м²) с помощью лейки. Площадь учетной делянки 1 м², повторность четырехкратная. Влияние ретардантов на табачную рассаду определяли по ее биометрическим показателям перед высадкой в поле [12]. Степень развития корневой системы растений устанавливали по способности удерживать питательную смесь по методу Еремеева [13]. Пролонгированное влияние ретардантов, примененных в рассадный период, изучали по измерениям высоты растений, площади листьев среднего яруса и урожайности табака [14]. В конце вегетационного периода учитывали количество семенных продуктивных растений (соцветия с побуревшими коробочками) [15]. Подсчитывали количество растений нормально развитых и недоразвитых (высотой <50 см) на каждой делянке.

Накопление сухого вещества в табачном сырье на фоне проведения обработок ретардантами определяли по следующей формуле:

$$P = \frac{M}{S} \times 10\,000 \text{ (г/м}^2\text{)},$$

где, P – сухое вещество, г/м², M – масса разовой пробы после сушки, г, S – площадь разовой пробы, см² (при диаметре пробы 12 см площадь пробы равна 113.04 см²) [16]. Для исследования берут высежки из 10-ти табачных листьев диаметром 12 см, взвешивают, измельчают, затем после высушивания навеску опять взвешивают.

Оценку химического состава табачного сырья осуществляли в лаборатории химии и контроля качества ВНИИТТИ. Содержание водорастворимых углеводов определяли в сухом табачном сырье по Бертрану (модификация лаборатории химии и контроля качества ВНИИТТИ), белкового азота по Морю, общего азота по Кьельдалю [17], никотина – спектрометрическим методом [18]. Для проверки достоверности полученных данных использовали методы статистической обработки результатов [19] с применением компьютерной программы однофакторного дисперсионного анализа Microsoft Excel.

Погодные условия в годы исследования были разными. Вегетационный период 2020 г. можно охарактеризовать как экстремальный с недобо-

ром почвенной влаги. Однако весна была теплой. По температурному режиму март после посева табака, был теплее среднемноголетней нормы на 6.8°C, что положительно влияло на дружную всхожесть семян. Также превышение среднемноголетней нормы температурного режима отмечено в апреле и мае, что также благоприятно повлияло на процесс выращивания рассады табака в защищенном грунте. Температура в апреле превышала среднемноголетние показатели на 0.8°C, в мае на 1.9°C. Высаженная в поле рассада в конце мая отреагировала на недобор почвенной влаги на 2.8 мм изреживанием и угнетением посадок табака. В июне продолжались экстремальные условия для табачных растений, отмечено превышение температурной среднемноголетней нормы на 3.9°C, а дефицит влаги составил 44.1 мм (что меньше среднемноголетних показателей почти в 2 раза). В этот период проводили искусственный полив растений табака. В июле ситуация изменилась, выпавшие атмосферные осадки с превышением среднемноголетней нормы на 98.1 мм способствовали активному росту растений табака, температура превысила норму на 3.2°C. Погодные условия августа и сентября отмечены также как экстремальные, с недобором почвенной влаги и превышением среднемноголетней температурной нормы. Несмотря на малоблагоприятные погодные условия 2020 г., урожай табачного сырья получен высокий.

Метеорологические условия вегетационного периода 2021 г. определены как благоприятные в связи с оптимальной влажностью почвы в период проведения опыта. Посев табака осуществлен в конце марта, и были получены дружные всходы, т.к. по температурному режиму этот месяц оказался теплее средней многолетней нормы на 1.9°C. В апреле среднемесячная температура превысила среднемноголетнюю норму на 1.6°C. Все это положительно отразилось на росте рассады табака. В мае месяце, когда производили посадку табака, отмечена дождливая погода. Среднесуточная температура воздуха превысила среднемноголетние показатели на 2.6°C. Осадки выпадали на протяжении всего месяца. Они составили 108 мм, что было больше среднемноголетних показателей на 56.2 мм. Среднесуточная температура воздуха в июне превысила среднемноголетнюю норму на 2.5°C, осадков за месяц выпало больше месячной нормы на 44.4 мм. Это активизировало рост табачной рассады в поле. По температурному режиму июль оказался теплее среднемноголетней нормы на 4.1°C, по количеству выпавших осадков отмечено увеличение от среднемноголетнего показателя на 10.0 мм.



Рис. 1. Влияние ретарданта Атлет (доза 3.0 мл/м²) при однократной и двукратной обработке растений табака на качество рассады.

Но все осадки выпали в начале месяца, а следующие 2 декады были засушливыми. Все это сильно затормозило рост табака и способствовало развитию соцветий и раннему зацветанию некоторых растений. Начало августа также было засушливым и жарким, что ускорило созревание табачных листьев. Во 2-й декаде месяца выпали осадки и началась 2-я фаза роста растений, не вошедших в фазу цветения. Данные условия позволили получить к концу вегетационного периода относительно высокий урожай сырья. Температура в августе превышала среднеголетние показатели на 3.6°C, а избыток влаги составил 21.6 мм. Сентябрь отмечен как благоприятный месяц с оптимальным количеством выпавших и распределенных по времени осадков на уровне среднеголетней нормы с небольшим превышением на 18.7 мм и температурой в пределах среднеголетних показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В опыте для отбора эффективных ретардантов, способных сдерживать рост рассады табака в защищенном грунте в случае сложившихся неблагоприятных погодных условий для высадки растений, а также для проведения поэтапной высадки рассады табака в поле, выделили варианты с применением препарата Атлет в дозе 3.0 мл/м² при двукратной обработке (рис. 1) и в дозе 3.5 мл/м² при од-

нократной обработке. Испытанный регулятор роста при создавшихся благоприятных погодных условиях в весенний период способствовал снижению длины растений до точки роста на 7–17% и до конца вытянутых листьев по сравнению с контролем на 3–10% (табл. 1). Сокращение длины табачной рассады произошло из-за оттока питательных веществ из листьев в основание стебля, при этом диаметр стебля увеличился на 14–19, масса стеблей – на 4–11, масса корней – на 44–50%. Возросла на 61–100% способность корневой системы удерживать питательную смесь. Выход стандартной рассады в вариантах опыта с испытанием ретарданта Атлет на 5–6% повысился в сравнении с контролем.

Также ретардантный эффект отмечен при однократном применении удобрения Cultifort Raiz в дозе 3.0 мл/м², при этом показано снижение высоты растений до точки роста на 8% и до конца вытянутых листьев – на 2%. Диаметр стебля превысил контроль на 5%. Масса стеблей увеличилась на 8%. Отмечена активная стимуляция развития корневой системы: масса корней превысила контроль на 68%, масса почвы по удерживающей способности корней увеличилась на 118%. Стандартной рассады в данном варианте опыта получено на 2% больше чем в контроле. Варианты с применением препаратов Атлет и Cultifort Raiz приблизились по описанным параметрам на уровень препарата Рексолин, являвшегося эталоном в данном опы-

Таблица 1. Влияние агрохимикатов, примененных в качестве ретардантов, на рост и развитие рассады табака (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант (доза, кратность обработок)	Длина рассады, см		Диаметр стебля, мм	Масса 25 сырых		Масса почвы с корнями 25 растений	Выход стандартной рассады, шт./м ²
	до точки роста	до конца вытянутых листьев		стеблей	корней		
				г			
Контроль							
Вода	14.8	24.1	4.02	108	5.0	106	804
Ретардант Атлет							
2.5 мл/м ² , однократно	16.2	26.0	3.18	116	5.4	121	900
2.5 мл/м ² , двукратно	15.1	24.8	3.46	111	5.2	118	890
3.0 мл/м ² , однократно	15.3	25.8	4.16	134	7.0	169	902
3.0 мл/м ² , двукратно	13.8	23.5	4.78	121	7.5	211	855
3.5 мл/м ² , однократно	12.6	22.0	4.60	113	7.2	171	848
3.5 мл/м ² , двукратно	9.2	19.4	4.15	85.0	4.7	102	412
Удобрение Cultifort Raiz							
3.0 мл/м ² , однократно	13.7	23.6	4.22	117	8.4	230	824
3.0 мл/м ² , двукратно	11.5	21.4	4.43	95	6.2	150	550
Удобрение Rexolin ABC (эталон)							
3.0 г/м ² , однократно	13.2	22.6	4.60	114	7.0	160	844
<i>HCP</i> ₀₅	1.1	1.9	0.18	6	0.4	19	40

Примечание. Параметры табачной рассады, рекомендуемые ОСТ 10-113-88 (ручная посадка): количество листьев, шт. – 4–7, длина стебля, см – 6–14, длина рассады, см – 12–20, диаметр стебля у корневой шейки, см – 2–5; рекомендуемые ОСТ 10-113-88 (машинная посадка): количество листьев, шт. – 5–6, длина стебля, см – 8–12, длина рассады, см – 14–20, диаметр стебля у корневой шейки, см – 3–4.

те. Определено, что длина растений до точки роста сократилась на 12, длина растений до конца вытянутых листьев – на 7% в сравнении с контролем. Диаметр стебля увеличился на 14, масса стеблей – на 5, масса корневой системы – на 40%.

Препарат Атлет, примененный в минимальной дозе 2.5 мл/м² (при однократной и двукратной обработке), проявил к табаку небольшой стимулирующий эффект. Доза препарата Атлет 3.5 мл/м² при двукратной обработке и удобрение Cultifort Raiz при двукратной обработке (3.0 мл/м²) угнетали растения табака, при этом значительно сокращалась доля выхода стандартных растений с запланированной парниковой площади. Несмотря на полученные отрицательные данные в нескольких вариантах вся рассада, отобранная для биометрических измерений, входила по параметрам в размеры, предусмотренные стандартом, а в лучших вариантах даже превышала их (табл. 1).

После высадки табака в поле, на учетных делянках сохранялся ретардантный эффект в течение 45 сут независимо от погодных условий.

Практически все растения по высоте в этот период находились на уровне или меньше контрольных без обработки. Затем в фазе интенсивного роста отмечали стимуляцию роста растений во всех вариантах и положительное влияние обработок на формирование урожайности. Среди испытанных препаратов лучший результат получен при применении препарата Атлет в дозе 3 мл/м² при двукратной обработке. В этом случае на фоне увеличения высоты растений к концу учетного периода на 13, количества листьев – на 13 и площади табачных листьев – на 13% получен дополнительный урожай табачного сырья в размере 6.2 ц/га, т.е. прибавка урожайности составила 21% (табл. 2). Хорошие показатели установлены и в варианте с применением ретарданта Атлет в дозе 3.5 мл/м² при однократной обработке. При применении ретардантов по данной схеме получен дополнительный урожай табачного сырья в количестве 5.4 ц/га (18%) на фоне повышения высоты растений на 13, увеличении количества листьев на 10 и площади листьев на 12%.

Таблица 2. Влияние агрохимикатов, примененных в качестве ретардантов, на продуктивность табака в поле (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант (доза, кратность обработок)	Высота растений, см		Урожайность, ц/га	Площадь табачных листьев, см ²	Количество листьев на растении, шт.
	45-е сут после посадки	фаза цветения			
	Контроль				
—	67.1	138	30.2	515	31
	Ретардант Атлет				
2.5 мл/м ² , однократно	68.8	144	31.1	517	33
2.5 мл/м ² , двукратно	67.5	149	31.2	524	33
3.0 мл/м ² , однократно	68.1	149	32.7	547	33
3.0 мл/м ² , двукратно	63.7	155	36.4	583	35
3.5 мл/м ² , однократно	66.2	155	35.6	575	34
3.5 мл/м ² , двукратно	57.1	150	29.0	505	31
	Удобрение Cultifort Raiz				
3.0 мл/м ² , однократно	66.3	146	34.1	567	33
3.0 мл/м ² , двукратно	65.2	141	28.4	492	32
	Удобрение Rexolin ABC, (эталон)				
3.0 г/м ² , однократно	66.0	156	39.1	592	35
<i>HCP</i> ₀₅	5.1	8	2.3	27	2.0

Применение удобрения Cultifort Raiz в дозе 3.0 мл/м² (однократно), показавшего в рассадный период оптимальные результаты, привело к увеличению высоты растений к концу вегетации на 6, количества листьев на растении — на 6, площади табачных листьев — на 10% и урожайности — на 3.9 ц/га (на 13%). Примененный в качестве эталона специальный комплекс микроэлементов Rexolin ABC обеспечил самую высокую прибавку урожайности — 9 ц/га (30%) на фоне увеличения всех показателей продуктивности табака.

В ходе исследования также отмечено, что ретарданты во всех испытанных дозах положительно влияли на семенную продуктивность растений, при этом количество растений в вариантах опыта с созревшими семенами находилось либо на уровне контроля, либо было больше. Повлияли ретарданты и на развитие растений. Например, максимальное количество недоразвитых растений (высотой меньше 50 см) — 12%, отмечено в варианте опыта с применением препарата Атлет в дозе 3.5 мл/м² при двукратной обработке (табл. 3). Стоит отметить, что именно в этом варианте получено минимальное количество стандартной рассады.

Важным показателем спелости табака, определяющим величину и качество урожая, является его материальность, зависящая от накопления су-

хого вещества (масса веществ, входящих в состав табака, за исключением воды) в технически зрелых листьях. В опыте с применением ретардантов в рассаднике показано, что накопление сухого вещества в листьях в основном в опытных вариантах увеличивалось в среднем на 3–28%, при этом максимум установлен в эталонном варианте после обработки растений удобрением Rexolin ABC (табл. 4). В вариантах с двукратной обработкой препаратом Атлет в дозе 3.0 мл/м² и в дозе 3.5 мл/м² при однократной обработке, содержание сухого вещества в табачном сырье превысило уровень контроля на 10–17%.

К сухому веществу относятся основные химические вещества, от долевого содержания и соотношения которых определяются курительные достоинства табачного сырья и курительных изделий, изготовленных из него. К ним относятся никотин, общий и белковый азот, углеводы и др. Обработки ретардантами в период выращивания рассады несколько улучшили качество сырья. В опытном сырье отмечено увеличение растворимых углеводов и, следовательно, это проявляется повышением числа Шмука (углеводно-белковым соотношением), являющимся общепризнанным показателем оценки качества табака по его химическому составу. Углеводно-белковое соотношение варьирует от сотых долей до единицы у низ-

Таблица 3. Влияние ретардантов на семенную продукцию и количественные характеристики развития растений табака (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант (доза, кратность обработок)		Среднее количество растений в варианте, шт.		
		к концу уборочного периода	с созревшими семенами	недоразвитых
Контроль		61	18	2
Атлет	2.5 мл/м ² , однократно	56	21	2
	2.5 мл/м ² , двукратно	59	19	1
	3.0 мл/м ² , однократно	53	27	2
	3.0 мл/м ² , двукратно	61	24	5
	3.5 мл/м ² , однократно	55	22	3
	3.5 мл/м ² , двукратно	65	27	8
Cultifort Raiz	3.0 мл/м ² , однократно	55	17	4
	3.0 мл/м ² , двукратно	53	18	2
Rexolin ABC 3.0 г/м ² (эталон), однократно		50	18	3

Таблица 4. Влияние обработки ретардантами в рассадный период на накопление сухого вещества в табачном сырье (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант (доза, кратность обработок)		Средняя масса 10 высечек табачных листьев, г		Коэффициент усушки	Содержание сухого вещества в табачном сырье, г/м ²	Отклонение от контроля, %
		сырых	высушенных			
Контроль		46.7	6.0	7.8	531	–
Атлет	2.5 мл/м ² , однократно	47.7	6.2	7.7	548	103
	2.5 мл/м ² , двукратно	48.0	6.3	7.6	557	105
	3.0 мл/м ² , однократно	48.4	6.4	7.6	566	107
	3.0 мл/м ² , двукратно	49.1	6.6	7.4	584	110
	3.5 мл/м ² , однократно	51.6	7.0	7.4	619	117
	3.5 мл/м ² , двукратно	55.1	7.6	7.3	672	127
Cultifort Raiz	3.0 мл/м ² , однократно	48.4	6.5	7.4	575	108
	3.0 мл/м ² , двукратно	49.2	6.8	7.2	602	113
Rexolin ABC 3.0 г/м ² (эталон), однократно		54.5	7.7	7.1	681	128

кокачественных табаков и до 3 и выше у высококачественных. Средний по качеству табак характеризуется углеводно-белковым соотношением близким к единице. Ретардантные обработки способствовали повышению числа Шмука от 1.00 до 1.18, что свидетельствовало об улучшении качества табачного сырья. В контрольном варианте число Шмука составило 0.96 (табл. 5). При применении удобрений в качестве ретардантов

отмечено повышение содержания никотина в табачном сырье, т.е. его крепости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате двухлетнего исследования определено, что при неблагоприятных погодных условиях для высадки табака в поле целесообразно однократное применение ретарданта Атлет (в дозе 3.5 мл/м²) или агрохимиката

Таблица 5. Влияние обработок ретардантами в рассадный период на химический состав табачного сырья сорта табака Трапезонд 25 (2021 г.)

Вариант (доза, кратность обработок)		Содержание, %			Число Шмука
		никотина	углеводов	белков	
Контроль		2.0	4.5	4.7	0.96
Атлет	2.5 мл/м ² , однократно	2.1	4.6	4.3	1.05
	2.5 мл/м ² , двукратно	2.2	6.0	5.1	1.18
	3.0 мл/м ² , однократно	2.0	5.6	5.3	1.06
	3.0 мл/м ² , двукратно	2.1	5.7	5.0	1.14
	3.5 мл/м ² , однократно	2.2	5.2	4.9	1.06
	3.5 мл/м ² , двукратно	2.2	5.1	5.0	1.02
Cultifort Raiz	3.0 мл/м ² , однократно	2.5	5.5	5.2	1.06
	3.0 мл/м ² , двукратно	3.1	5.2	5.2	1.00
Rexolin ABC 3.0 г/м ² (эталон), однократно		3.1	4.6	4.3	1.07
HCP ₀₅		0.1	0.3	0.4	—

Cultifort Raiz (в дозе 3.0 мл/м²) за 7–10 сут до предполагаемой выборки рассады табака в виде водного раствора объемом 1 л/м², способствующее приостановке роста растений табака. В случае проведения поэтапной высадки рассады рекомендовано двукратное применение ретарданта Атлет (в дозе 3.0 мл/м²) за 17–20 и 7–10 сут до предполагаемой выборки рассады табака. Ретардантный эффект испытанных препаратов проявлялся выраженным снижением длины растений до точки роста на 7–17, до конца вытянутых листьев – на 2–10, увеличением диаметра стебля на 5–19, массы стеблей – на 4–11, массы корней – на 44–68, способности корневой системы удерживать питательную смесь – на 61–118, повышением выхода стандартных растений – на 2–6, площади листьев в полевой период – на 10–13, урожайности табачного сырья – на 13–21% и кумулятивных достоинств табачного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафроновская Г. Регуляторы роста растений: грамотное вмешательство в природный процесс // ГлавАгроном. URL: <https://glavagronom.ru/articles/regulatory-rosta-rasteniy-gramotnoe-vmeshatelstvo-v-prirodnyu-process> (дата обращения 01.02.2022).
2. Роньжина Е.С., Рейтер А.Е. Ретарданты “ЦеЦеЦе 750” и “Моддус” в системе защиты озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от полегания // Современные подходы и методы в защите растений: Всерос. научн.-практ. конф. с междунаrod. участием (12–14 ноября, 2018 г.) / Под ред. Т.В. Глухаревой, Ю.И. Нейн. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 41–44.
3. Salwa A. Orabi, Mervat Sh. Sadak. Improvement of productivity and quality of two wheat cultivars by foliar application of spermine and paclobutrazol // Middle East J. Agricult. Res. 2015. V. 4. № 2. P. 195–203.
4. Томашов С.В., Томашова О.Л. Урожайность и экономическая эффективность выращивания рапса озимого в зависимости от срока посева и применения ретарданта // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2015. № 2(58). С. 70–74.
5. Тропина Н.С., Аникина А.Ю., Тхаганов Р.Н. Применение ретарданта Харди на ромашке аптечной // Биология растений и садоводство: теория, инновации: Сб. научн. тр. ГНБС. 2018. Т. 146. С. 117–120. URL: <https://doi.org/10.25684/NBG.scbook.146.2018.17>
6. Маланкина Е.Л., Шатилова Т.И., Романова Н.Г., Ткачева Е.Н. Влияние ретарданта Харди на продуктивность и биохимический состав сырья змеголовника молдавского // Плодородие. 2020. № 5. С. 38–41. URL: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.116.11>
7. Савченко О.М., Хазиева Ф.М. Урожайность пажитника сеного в зависимости от обработок ростостимулирующими препаратами и ретардантами // Вестн. КрасГАУ. 2020. № 8. С. 3–8. URL: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-8-3-8>
8. Пучков М.Ю., Абделькадер М.М. Изучение влияния регуляторов роста на овощных культурах // Естеств. науки. 2017. № 1(58). С. 13–22.
9. Атлет, ВР. URL: <https://floralworld.ru/regulators/atet.html> (дата обращения 03.02.2022).
10. Cultifort Raiz (Культифорт Раиз). URL: <https://azurniva.ru/ru/products/stimulyatory-i-korrektory-defitsita-pitaniya/cultifort-raiz.html> (дата обращения 03.02.2022).

11. Rexolin ABC (Рексолин). URL: <https://www.pesticide.ru/agrochemical/reksolin-abc> (дата обращения 03.02.2022).
12. *Алехин С.Н., Плотникова Т.В., Саломатин В.А.* Методическое руководство по проведению агротехнических опытов с табаком в рассадниках. Краснодар: ВНИИТТИ, 2013. 27 с.
13. *Еремеев Г.Н.* Метод предпосадочного контроля приживаемости рассады табака и томатов // Докл. ВАСХНИЛ. 1950. Вып. 2. С. 25.
14. *Алехин С.Н., Саломатин В.А., Исаев А.П.* Методическое руководство по проведению полевых агротехнических опытов с табаком (*Nicotiana tabacum* L.). Краснодар: ВНИИТТИ, 2011. 42 с.
15. *Яковук А.С.* Биологические основы культуры табака на семена. Кишинев: Штиинца, 1984. 231 с.
16. *Бурлакина А.В., Дьячкин И.И., Лысенко А.Е.* Метод определения сухого вещества в листьях в период уборки // Сб. НИР ВИТИМ. Краснодар, 1978. Вып. № 167. С 15–19.
17. *Мохначев И.Г., Писклов В.П., Шерстяных Н.А.* Методы анализа табака и табачного дыма. Краснодар, 1976. 83 с.
18. ГОСТ 30038-93. Табак и табачные изделия. Определение алкалоидов в табаке. Спектрофотометрический метод. М.: Изд-во стандартов, 1995. 11 с.
19. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Role and Efficiency of Retardants in Tobacco Growing Technology

T. V. Plotnikova^{a,#} and S. V. Gvozdetskaya^a

^aAll-Russian Research Institute of Tobacco, Makhorka and Tobacco Products
ul. Moskovskaya 42, Krasnodar 350072, Russia

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

The effect of retardants on tobacco plants in the seedling and field periods has been studied. It was found that two-time treatment of seedlings with the Athlete retardant in the phases “ears” and “suitable for planting seedlings” at a dose of 3.0 ml/m² and a single treatment at a dose of 3.5 ml/m² in the phase “suitable for planting seedlings” contributed to the suspension of plant growth. There was a decrease in the length of tobacco plants by 3–17, a thickening of the stem diameter by 14–19, an increase in the mass of stems by 4–11 and the mass of roots by 44–50%. The yield of standard seedlings in the versions treated with a retardant increased by 5–6%. The degree of development of the root system of plants, established by the ability to retain a nutrient mixture, increased by 61–100%. A single application of the fertilizer with the retardant properties of Cultifort Raiz at a dose of 3.0 ml/m² in the phase “suitable for planting seedlings” contributed to a reduction in the length of tobacco plants by 2–8, an increase in the diameter of the stem by 5, the mass of stems by 8, roots by 68%. The ability of the root system to retain the greenhouse mixture increased by 118%. An increase in the yield of standard seedlings by 2% was noted. During the field period, the retardant effect of the applied agrochemicals persisted for 45 days after disembarkation. The best result in obtaining an additional yield of 6.2 c/ha (by 21%) was noted against the background of the use of the Athlete drug at a dose of 3.0 ml/m² with double treatment. When using the Athlete retardant at a dose of 3.5 ml/m² with a single treatment, the additional yield was 5.4 c/ha (by 18%). The use of Cultifort Raiz fertilizer at a dose of 3.0 ml/m² (once), contributed to an increase in the yield of raw materials by 3.9 c/ha (by 13%). In the application of the standard, the highest yield increase was obtained – 9.0 c/ha (by 30%). The accumulation of dry matter (materiality) in tobacco raw materials increased with increasing doses of agrochemicals. The use of retardants contributed to the improvement of the chemical composition of tobacco raw materials, namely, an increase in the number of Schmuck (carbohydrate-protein ratio).

Key words: tobacco, seedlings, retardants, Athlete and Cultifort Raiz preparations, yield, quality of tobacco raw materials.

УДК 632.693.2:632.958.31

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ ЗА РЕЗИСТЕНТНОСТЬЮ ОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЕВКИ (*Microtus arvalis* Pall) К АНТИКОАГУЛЯНТНЫМ РОДЕНТИЦИДАМ

© 2023 г. А. А. Яковлев^{1,2,*}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

²ООО “Инновационный центр защиты растений”
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, а/я 5, Россия

*E-mail: jiakovlev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 13.08.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

Антикоагулянтные родентициды занимают лидирующее положение в практике регулирования численности вредных грызунов. Изучение резистентности к антикоагулянтам в большей степени получило развитие в отношении грызунов-комменсалов. В условиях полевого применения родентицидов при защите растений проблема резистентности имеет особенности, которые отражаются в методике изучения этой проблемы. Рекомендации предназначены для оценки резистентности обыкновенной полевки (*Microtus arvalis* Pall) – одного из наиболее важных вредителей растений в Российской Федерации. Результаты исследования помогут выявить резистентность и своевременно внести изменения в регламенты применения родентицидов или обоснованно сменить средства защиты растений.

Ключевые слова: антикоагулянтные родентициды, защита растений, мониторинг резистентности, методические рекомендации.

DOI: 10.31857/S0002188123010118, **EDN:** FENVBG

ВВЕДЕНИЕ

Антикоагулянты крови – производные инданциона и кумарина – применяют в качестве родентицидов уже более 70 лет, и к настоящему времени они прочно заняли позиции, вытеснив или ограничив объемы применения других родентицидов. Это определяет актуальность изучения резистентности грызунов в первую очередь к этой группе препаратов.

В Российской Федерации на протяжении более 20 лет для защиты растений от грызунов применяют антикоагулянтные родентициды, это 8 препаратов из 9 зарегистрированных к настоящему времени [1]. Применение этих родентицидов в производственных условиях дает неустойчивые результаты биологической эффективности [2]. При всем том, что это определяется многими факторами (поедаемость родентицидной приманки, погодные условия и т.п.), особого внимания заслуживает формирование резистентности грызунов к этой группе препаратов. Предлагаемые к рассмотрению рекомендации предназначены для работы с обыкновенной полевкой (*Microtus arvalis* Pall) – наиболее важным видом из числа

грызунов-вредителей растений. В то же время основы излагаемой методики применимы и к другим видам грызунов, если будут учтены их особенности лабораторного содержания и расчета вводимых доз. Результаты исследования помогут выявить устойчивость грызунов к применяемым против них родентицидов и внести соответствующие поправки в ассортимент родентицидов и регламенты их применения.

Устойчивость грызунов к антикоагулянтам непрямого действия отмечали уже вскоре после начала их применения. В конце 1950-х гг. это проявилось в отношении антикоагулянтов первого поколения (варфарин, фафинон) [3, 4]. В дальнейшем стало известно о резистентности к антикоагулянтам 2-го поколения – бродифакуму и бромадиолону [5]. К настоящему времени определена локализация гена VCORC1, ответственного за резистентность к антикоагулянтам у грызунов-комменсалов – серой крысы (*Rattus norvegicus* Berkenhout, 1769) и домового мыши (*Mus musculus* Linnaeus, 1758), проводят исследования мутаций этих генов [6–9].

Цель работы – исследование резистентности к антикоагулянтам обыкновенной полевки – наиболее важного вредителя растений в Российской Федерации [10].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Условия содержания животных и применения родентицидов. Основой применения родентицидов является использование родентицидных приманок, поедаемых грызунами. Поэтому биологическая эффективность родентицидных обработок зависит не только от восприимчивости грызунов к токсиканту, но и от привлекательности родентицидного препарата для грызунов с учетом пищевых составляющих. В полевых условиях при наличии многих действующих факторов, включая конкурентов на поедание приманки из числа представителей нецелевых видов животных, контроль за поедаемостью препарата грызунами осложняется. В результате данные о недостаточной эффективности препарата, полученные в естественной среде обитания грызунов, служат только предпосылкой для выявления возможной резистентности.

Наиболее полные сведения могут быть получены в лабораторных экспериментах по скармливанию грызунам приманочных препаративных форм родентицидов или в результате перорального введения родентицидных концентратов, которые служат для изготовления родентицидных приманок. Другая сторона вопроса – возможность обеспечить репрезентативность выборки сужает число массовых вредоносных видов грызунов для эксперимента, оставляя наиболее пригодных для длительного содержания в неволе. Самый распространенный массовый вредитель сельскохозяйственных растений – обыкновенная полевка наиболее подходит для лабораторных экспериментов с родентицидами. Грызуны этого вида из естественной среды обитания благополучно размножаются и подолгу живут в условиях вивария, проявляя относительно терпимый характер поведения при обращении с ними.

Определение резистентности грызунов к родентицидам предполагает сравнительную оценку выборки из 2-х популяций. Одна из них (эталонная) – желательна с определенной восприимчивостью к действующему веществу. Уровень восприимчивости должен быть определен экспериментально в лабораторных или полевых условиях и соответствовать обеспечению хозяйственно необходимой эффективности родентицидных обработок, имеющих эффективность не менее 50%. Другая популяция того же вида – тестируемая на резистентность.

Предпосылкой для экспериментальной оценки восприимчивости грызунов к действующему веществу (д.в.) могут быть недостаточно эффективные результаты родентицидных обработок препаратами с этим д.в. При этом надо иметь подтверждение того, что низкая эффективность обработки получена не из-за плохой поедаемости приманки грызунами, массового поедания препарата нецелевыми животными или в результате перехода приманки в негодное состояние из-за осадков.

Работа как с первой, так и со второй популяциями начинается с минимальных выборок с использованием самцов, как наиболее стабильных в физиологическом плане по сравнению с самками. Рациональным является использование для начального исследования возрастной группы sub-adultus (предвзрослой), с приблизительной массой тела от 15 до 20 г. Участвующих в опыте полевок содержат одиночно и рассаживают не менее чем за 2 нед до начала опыта, если они взяты из естественной среды обитания. Этот карантинно-адаптационный срок может быть сокращен или отменен только для грызунов лабораторной популяции (родившихся в условиях данной лаборатории) при условии, если они не имеют признаков заболеваний и среди них не было летальных случаев за отмеченный срок.

Террариумы для одиночного содержания должны быть одинаковыми в условиях одного опыта с ориентировочным объемом не менее 27000 см³ (30 см × 30 см × 30 см), с перегородкой для гнездовой камеры, которая составляет от 30 до 50% площади террариума. Материалами для террариума служат железо не тоньше 1 мм и стекло. Допускается использование аквариумов. В таких случаях необходима плотная металлическая крышка, не выталкиваемая грызунами изнутри. Во всех случаях необходима хорошая аэрация, при этом ширина отверстий не должна превышать 5 мм. Гнездовую камеру заполняют сеном из злаковых или бобовых трав. Дно террариума засыпают древесными опилками с оптимальной толщиной от 3-х до 5-ти см. В ходе опыта с токсичированными приманками дно выстилают светлой бумагой для более удобного учета съеденной приманки. Наиболее удобный и достаточный рацион на время проведения опыта состоит из свежих овощей (картофель, морковь) с корректируемым расчетом ≈50 г особь/сут и овса ≈20 г особь/сут. В присутствии свежих овощей полевки не нуждаются в свободной воде. Оптимальная температура воздуха при содержании полевок – от 5 до 20°C, световой режим – в соответствии с естественным для текущего сезона. Во время проведения опыта условия содержания животных должны быть неизменными. Целесообразно на-

чинать исследование с минимальным числом особей, но не менее 3-х грызунов в выборках.

Подопытным полевым вводят перорально или скармливают с приманкой рассчитанную на основе известных данных о действующем веществе ЛД₅₀ (дозу летальную для половины популяции). При недостатке сведений о токсичности д.в. допускается введение разных доз каждому из подопытной группы грызунов. Для первичной оценки токсичности в принятом диапазоне ближайšie дозы должны отличаться в 2 раза одна от другой.

Если в опыте используют действующее вещество или концентрат, превышающий по содержанию д.в. стандартные родентицидные приманки, то для перорального введения жидкости используют мерные стеклянные трубки Панченкова, прямое назначение которых – определение скорости оседания эритроцитов. Для начала определяют массу родентицидного концентрата, соответствующую делению трубки. Для этого с помощью резиновой груши надетой на верхний конец трубки набирают полную (до верхнего деления, всего их 100) трубку, бумажной салфеткой удаляют концентрат с поверхности трубки и полностью выдувают содержимое трубки в стеклянную емкость удобную для взвешивания на весах с ценой деления 1 мг. Массу взвешенного таким образом содержимого 3-х полных трубок делят на 300 и получают искомую массу концентрата, соответствующего одному делению трубки Панченкова. Обычно содержание д.в. в родентицидных концентратах отражают в г/кг. Если же содержание д.в. выражено в г/л, то нет необходимости во взвешивании содержимого трубки при условии, что на ней записан ее объем (2 мл).

Зная массовую цену деления трубки для вводимого препарата, массу тела грызуна, концентрацию д.в. в концентрате и предполагаемую величину ЛД₅₀, можно определить индивидуальную порцию вводимого концентрата. Например, масса грызуна (M) равна 20 г, концентрация д.в. в концентрате ($K_{дв}$) равна 2.5 г/кг, предполагаемая или достоверно известная доза ЛД₅₀ равна 0.5 мг/кг. Масса вводимого д.в. с приведением в соответствующие единицы измерения будет равна: $M_{дв} = \text{ЛД}_{50} \times M = 0.5 \text{ мг/кг} \times 20 \text{ г} = 0.5 \text{ мг/кг} \times 0.02 \text{ кг} = 0.01 \text{ мг}$. В пересчете на концентрат вводимая порция (M_k) одной полевке равна: $M_k = (1000 \times M_{дв}) : K_{дв} = (1000 \times 0.01 \text{ мг}) : 2.5 \text{ г} = (1000 \times 0.01 \text{ мг}) : 2500 \text{ мг} = 4 \text{ мг}$.

Техника перорального введения мелким грызунам, в частности обыкновенной полевке, заключается в том, чтобы левой рукой в резиновой перчатке взять большим и указательным пальцами за шейную часть кожи грызуна и зафиксиро-

вать его тело между своей ладонью и тремя остальными пальцами. Затем, раздвинув трубкой челюсти грызуна и заглубив трубку в ротовую полость, не повреждая при этом слизистые ткани животного, вдуть туда с помощью резиновой груши на верхнем конце трубки отмеренное количество родентицидного концентрата, не допуская его потерь.

Рассчитанное количество концентрата вводят 3-м полевым эталонной популяции и 3-м полевым тестируемой популяции. При одиночном содержании в стандартных условиях в течение 2-х нед наблюдают за состоянием грызунов, отмечая их внешний вид, особенности поведения, интенсивность питания, летальные исходы, параллельно наблюдая за 3-мя контрольными грызунами, не получавшими препарат и содержащимися в таких же условиях.

Когда исследованию подлежит родентицидный препарат в виде токсифицированной приманки, то предстоит ее скармливание. Предварительно необходимо определить массу приманки, содержащую предполагаемую дозу ЛД₅₀. Воспользуемся данными для перорального введения, представленными выше. Количество д.в., соответствующее ЛД₅₀ для полевки массой 20 г, равно 0.01 мг, а при концентрации д.в. в приманке 0.05 г/кг масса приманки (M_p) будет равна: $M_p = (1000 \times M_{дв}) : K_{дв} = (1000 \times 0.01 \text{ мг}) : 0.05 \text{ г/кг} = (1000 \times 0.01 \text{ мг}) : 50 \text{ мг/кг} = 200 \text{ мг} = 0.2 \text{ г}$. Такое количество родентицидной приманки может соответствовать 1-й или нескольким гранулам в зависимости от их размеров, или части приманочного брикета.

Рассчитанные таким образом порции приманки выставляют на суточную экспозицию 3-м грызунам эталонной популяции и 3-м грызунам тестируемой популяции. Контрольная группа содержится в стандартном режиме, не получая родентицидной приманки.

На следующие сутки проводят контроль поедаемости. Для этого осуществляют полный осмотр каждого террариума, для чего временно отсаживают грызунов. Несъеденные остатки приманки взвешивают для расчета дозы, полученной каждым грызуном. Если отмечено игнорирование приманки грызунами, то дальнейшее тестирование такого препарата нецелесообразно, т.к. неэффективное применение его на практике нельзя будет отнести к резистентности.

После суточной экспозиции токсифицированной приманки и учета ее поедания все подопытные грызуны, а также и контрольные особи, остаются на установленный срок под наблюдением. Для антикоагулянтов это составляет от 10 до 14 сут. Использование животных, получивших любую дозу д.в. и выживших по истечении срока

Таблица 1. Преобразованные летальные дозы и соответствующие им доли л.и. из числа подопытных грызунов (примерные данные)

ЛД (мг/кг) × 10	Lg (ЛД (мг/кг) × 10)	Доля л.и., %	Пробиты <i>Pr</i> по Блиссу
5	0.69	33	4.56
7	0.85	66.66	5.41
10	1.00	100	8.09

наблюдения в дальнейших опытах первичного изучения резистентности не допускается, но они могут быть использованы для более глубокого изучения вопроса.

Если за время наблюдения среди контрольных (интактных животных) были летальные исходы (л.и.), то результаты всей повторности (группы основной популяции, и группы, тестируемой на резистентность) не засчитываются и требуют повторения после истечения карантинного срока 2 нед.

Целью проводимой экспериментальной работы является определение дозы, вызывающей смешанный по числу л.и. результат или определение летальных и сублетальных доз, расположенных максимально близко по шкале возрастания. Оптимально таких величин должно быть не менее 3-х для каждой тестируемой группы из исследуемых популяций. На этом основании в случае отсутствия л.и. в контактной группе (группах) необходимо повторение вариантов с удвоением рассчитанной по д.в. дозы до получения смешанных результатов. Напротив, в случае л.и. всех контактных грызунов, доза для последующих введений сокращается в 2 раза. В ходе исследования допускается изменение вводимых (скармливаемых) доз менее чем в 2 раза, если это будет сочтено целесообразным для получения наиболее достоверных результатов. Не исключается возможность того, что для получения дозы со смешанным результатом потребуется удвоение выборки до 6-ти особей в каждом варианте. При расширенном изучении вопроса в эксперимент могут быть введены самки. Для получения сравнимых и достоверных результатов самки должны быть подобраны с одинаковыми или близкими параметрами (возраст, вес) и в одном репродуктивном состоянии.

После получения не менее 3-х величин доз со смешанным или пограничным результатом для каждой из тестируемых популяций данные готовы для графического и математического анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных. Для определения величин ЛД₅₀ и ЛД₁₀₀ используют специальный статистический метод – пробит-анализ [11, 12].

Подготовка экспериментальных данных заключается в составлении таблицы, содержащей летальные дозы (мг/кг), и доли л.и. (в %) от числа грызунов, получивших эти дозы. Доли л.и. преобразуют в пробиты (величина пробит-функции *Pr* по Блиссу, (рис. 1), а летальные дозы преобразуют в десятичные логарифмы (рис. 2).

Применяемые в настоящее время антикоагулянты 2-го поколения вызывают л.и. в дозах <1 мг/кг, поэтому для удобства целесообразно записать удесятеренные дозы (ЛД × 10) (табл. 1).

Для графического решения на оси абсцисс прямоугольной системы координат откладывают десятичные логарифмы доз (мг/кг), определенные по соответствующим таблицам или с помощью логарифмической линейки. На оси ординат наносят величины пробитов, определенных с помощью соответствующей таблицы (по Блиссу) на основании доли л.и. (в %). Число точек для построения графика должно быть не менее 3-х. Оптимально они должны соответствовать дозам со смешанным эффектом по числу л.и. Допускаются точки, соответствующие дозам с нулевым и 100%-ным результатами, только в том случае, если они по данным эксперимента максимально приближены к “смешанной точке” как со стороны нулевого показателя, так и со стороны 100%-ного. Между точками по возможности на равном удалении от каждой проводят прямую. Точка на этой прямой, с величиной пробитов “5”, будет соответствовать ЛД₅₀ на шкале абсцисс (рис. 3).

Десятичный логарифм 0.78 соответствует числу 6. Помня, что в расчетах использовали удесятеренные величины доз, приходим к выводу, что ЛД₅₀ = 0.6 мг/кг.

Стандартная ошибка может быть вычислена по формуле $S_{ЛД_{50}} = \frac{ЛД_{84} - ЛД_{16}}{\sqrt{2N}}$, где $S_{ЛД_{50}}$ – стандартная ошибка ЛД₅₀. При этом ЛД₈₄ соответствует пробиту 6, а ЛД₁₆ соответствует пробиту 4, *N* – количество животных в группах, использованных для испытания доз, которые находятся в пределах величин пробитов от 3.5 до 6.5.

Аналитический способ пробит-анализа по Финни также может быть осуществлен в рамках

%	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	–	2.67	2.95	3.12	3.25	3.35	3.46	3.52	3.60	3.66
10	3.72	3.77	3.83	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.09	4.12
20	4.16	4.20	4.23	4.26	4.30	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.50	4.51	4.53	4.56	4.59	4.62	4.64	4.67	4.70	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.93	4.95	4.98
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.41	5.45	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.91	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
90	6.28	6.29	6.29	6.30	6.31	6.31	6.32	6.32	6.33	6.34
91	6.34	6.45	6.35	6.36	6.37	6.37	6.38	6.39	6.39	6.40
92	6.41	6.41	6.42	6.43	6.43	6.44	6.45	6.45	6.46	6.47
93	6.48	6.48	6.50	6.50	6.51	6.51	6.52	6.53	6.54	6.55
94	6.55	6.56	6.57	6.58	6.59	6.60	6.61	6.62	6.63	6.64
95	6.65	6.66	6.67	6.68	6.69	6.70	6.71	6.72	6.73	6.74
96	6.75	6.76	6.77	6.79	6.80	6.81	6.83	6.84	6.85	6.87
97	6.88	6.90	6.91	6.93	6.94	6.96	6.98	7.00	7.01	7.03
98	7.05	7.08	7.10	7.12	7.14	7.17	7.20	7.23	7.26	7.29
99	7.33	8.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Рис. 1. Преобразование доли (%) летальных исходов в пробиты.

Таблица величин десятичных логарифмов чисел от 1 до 9.9

десятичные целые	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.0	0.04	0.08	0.11	0.15	0.18	0.20	0.23	0.26	0.28
2	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.41	0.43	0.45	0.46
3	0.48	0.49	0.51	0.52	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59
4	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69
5	0.70	0.71	0.72	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.76	0.77
6	0.78	0.79	0.79	0.80	0.81	0.81	0.82	0.83	0.83	0.84
7	0.85	0.85	0.86	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89	0.89	0.90
8	0.90	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.93	0.94	0.94	0.95
9	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00

Рис. 2. Преобразование летальных доз в десятичные логарифмы.

пакета КП MathCAD или с помощью таблицы Excel [13].

Сравнение популяций по восприимчивости к препарату целесообразнее проводить именно по показателю ЛД₅₀, поскольку этот критерий оказывается более достоверным, чем другие дозы.

Получив ЛД₅₀ для основной популяции и для тестируемой, можно приступить к оценке рези-

стентности. Коэффициент резистентности вычисляют по формуле (1):

$$Kr = \frac{\text{ЛД}_{50} \text{ тестируемой популяции}}{\text{ЛД}_{50} \text{ для основной популяции}}. \quad (1)$$

Если величины числителя и знаменателя одинаковы, то резистентность к изучаемому д.в. отсутствует. Если $Kr > 1$, то резистентность обнаружена, и это служит основанием для внесения соот-

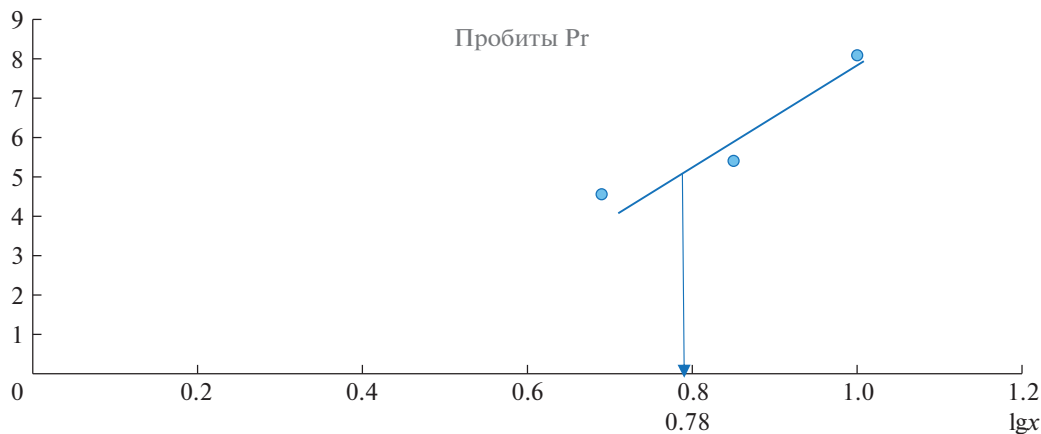


Рис. 3. Графическое определение величины ЛД₅₀.

ветствующей поправки в регламент применения родентицида против устойчивой популяции или изменения ассортимента средств против этой популяции. В отсутствие относительной резистентности и неудовлетворительных результатов в родентицидных обработках следует увеличивать поедаемость приманки, включая в ее состав дополнительные аттрактанты.

Кумулятивная резистентность. Антикоагулянтные родентициды, наиболее широко применяемые в настоящее время, обладают кумулятивным действием. И, следовательно, изучение кумулятивной резистентности в отношении их имеет значение.

При расчете дробных хронических доз используют известные о д.в. данные. Принимают во внимание время действия и скорость выведения из организма. Летальный исход под воздействием острой пероральной дозы антикоагулянтов крови непрямого действия наступает как правило в сроки от 3-х до 8-ми сут. Полувыведение этих токсикантов происходит в течение ≈2-х мес. Такая характеристика позволила определить высокую кумулятивность бродифакума (0.4–0.68) при 60-суточном введении грызунам [14]. Однако анализ популяций на выявление кумулятивной резистентности в практических условиях не может основываться на модели, которая предполагала бы такое длительное поступление токсиканта в организм, потому что нормы внесения родентицидов из соображений безопасности рассчитаны на минимально необходимое количество и сравнительно быстрое поедание приманки грызунами. В этом случае целесообразнее в основу расчета хронической дозы взять время токсического действия д.в. Как уже было отмечено, летальный исход от действия антикоагулянтных родентицидов наступает в основном от 3-х до 8-ми сут после разового перорального поступ-

ления в организм. Нормы применения родентицидов при защите растений снижены для безопасности до уровня, позволяющего поедать приманки в течение ≈2-х–3-х сут [1]. Из этого следует, что целесообразная кратность хронического введения составляет от 3-х до 5-ти сут. Учитывая приведенный выше коэффициент кумулятивности >0.5, можно обоснованно начать тестирование с половины ЛД₅₀ (в нашем примере это 0.3 мг/кг), разбив ее, как минимум, на 3 введения.

В остальном структура опыта остается такой же, как и при определении острой ЛД₅₀. Наиболее достоверными будут результаты при синхронном проведении вариантов с выборками из основной и тестируемой популяций. После определения полулетальной кумулятивной дозы основной популяции (ЛД_{50n}) и тестируемой (ЛД_{50nr}) можно определить коэффициент кумулятивной резистентности (*Krn*) (2):

$$Krn = \frac{ЛД_{50nr}}{ЛД_{50n}}. \quad (2)$$

В результате величина коэффициента *Krn*, равная 1, означает отсутствие различий в формировании кумулятивной резистентности в 2-х сравниваемых популяциях. Величина *Krn* > 1 означает наличие кумулятивной резистентности в тестируемой популяции. Это позволяет сделать вывод о том, что повторные обработки против тест-популяции будут сопровождаться снижением эффективности. К такому же результату приведет применение приманочных ящиков или других стационарных источников родентицидной приманки.

Нельзя забывать, что оценка резистентности популяций может происходить не только по признаку территориальной удаленности популяций, интенсивности родентицидных обработок, но и в зависимости от сезона, обуславливающего различный рацион грызунов. Наиболее интенсивное

употребление зеленых кормов, содержащих витамины группы К, может привести к повышению устойчивости грызунов к антикоагулянтным родентицидам на том основании, что эти витамины являются противоядиями (антидотами) для производных кумарина и индандиона, служащих основой этих родентицидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов по состоянию на 14 марта 2022 г. <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/5ba/5ba42dcd0dc36061195cd47d706fd094.zip>
2. Яковлев А.А., Бабич Н.В., Драгомиров К.А. Эффективность антикоагулянтных родентицидов // Защита и карантин раст. 2010. № 1. С. 23–25.
3. Boyle C.M. Case of apparent resistance of *Rattus norvegicus* Berkenhout to anticoagulant poisons // Nature. 1960. V. 188. P. 517.
4. Greaves J.H., Ayres P. Heritable resistance to warfarin in rats // Nature. 1967. V. 215. P. 877–878.
5. Lund M. Resistance to the second-generation anticoagulant rodenticides // Proc. 11th Vertebr. Pest Conf., Sacramento, Calif. March 6 to 8. 1984. P. 89.
6. Jones C., Talavera M., Bauckle A.P. Anticoagulant resistance in rats and mice in the UK – Summary report with new data for 2019–20. Colin Presscott Report from the Campaign for Responsible Rodenticide Use (CR-RU) UK for the Government Oversight Group https://www.researchgate.net/publication/336871353_Anticoagulant_Resistance_in_Rats_and_Mice_in_the_UK_-_Summary_Report_with_new_data_for_2019
7. Прескотт С.В. Резистентность к родентицидам антикоагулянтам. Новая молекулярная методология определения мутаций гена резистентности VKORC1 и понимание их возможности влияния на эффективность применения препаратов // Пест-Менеджмент. 2013. № 4. С. 39–46.
8. Миронова Т.А., Рылников В.А., Богачева А.В., Лавренченко Л.А. Распространение мутаций гена VKORC1 и резистентность серых крыс к родентицидам-антикоагулянтам в ряде городов России // Пест-Менеджмент. 2020. № 1(113). С. 5–7. <https://doi.org/10.25732/2396.2020.86.98.001>
9. Мальцев А.Н., Рябов С.В., Стахеев В.В., Панасюк Н.В., Гашев С.Н., Сорокина Н.В., Баженов Ю.А., Котенкова Е.В. Мутации гена резистентности VCORC1 к антикоагулянтам у синантропных грызунов на урбанизированных территориях России // Докл. РАН. Науки о жизни. 2021. Т. 498. № 1. С. 254–257. <https://doi.org/10.31857/S2686738921030094>
10. Бабич Н.В., Яковлев А.А. Развитие резистентности к антикоагулянтным родентицидам у полевых грызунов в России // Фитосанитарные технологии в обеспечении независимости и конкурентоспособности АПК России. Сб. тез. докл. IV Всерос. съезда по защите раст. с международ. участием “Фитосанитарные технологии в обеспечении независимости и конкурентоспособности АПК России”. СПб., 2019. С. 311.
11. Бельский М.Б. Элементы количественной оценки фармакологического эффекта. Л.: Медгиз, 1963. 146 с.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. С. 313–316.
13. Аналитический способ пробит-анализа по Финни с помощью КП Math CAD или с помощью таблицы Excel. <https://www.youtube.com/watch?v=wrUADPU3in4>, <https://www.aatbio.com/tools/probit-model-regression-analysis-calculator>
14. Денисенко В.И. Гигиеническое обоснование безопасного производства и применения современных родентицидных средств – антикоагулянтов на основе бромадиолона и бродифакума: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 25 с. [khttps://www.dissercat.com/content/gigienicheskoe-obosnovanie-bezopasnogo-proizvodstva-i-primeneniya-sovremennykh-rodentitsidny](https://www.dissercat.com/content/gigienicheskoe-obosnovanie-bezopasnogo-proizvodstva-i-primeneniya-sovremennykh-rodentitsidny)

Guidelines for the Control of Resistance of the Common Vole (*Microtus arvalis* Pall) to Anticoagulant Rodenticides

A. A. Yakovlev^{a,b,#}

^aThe All-Russian Scientific Research Institute of Plant Protection
shosse Podbelskogo 3, Saint Petersburg–Pushkin 196608, Russia

^bLLC “Innovative Plant Protection Center”

subscriber box 5, St. Petersburg–Pushkin 196608, Russia

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

Anticoagulant rodenticides occupy a leading position in the practice of regulating the number of harmful rodents. The study of resistance to anticoagulants has been developed to a greater extent in relation to rodent commensals. In the conditions of field application of rodenticides in plant protection, the problem of resistance has features that are reflected in the methodology of studying this problem. The recommendations are intended to assess the resistance of the common vole (*Microtus arvalis* Pall), one of the most important plant pests in the Russian Federation. The results of the study will help to identify resistance and make timely changes to the regulations for the use of rodenticides or reasonably change plant protection products.

Key words: anticoagulant rodenticides, plant protection, resistance monitoring, methodological recommendations.

УДК 633.11«321»:631.445.24:631.821:57.014

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ НА КИСЛОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ, ПРОИЗВЕДЕННОЙ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИМИ ОТХОДАМИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСЛОКАЦИИ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ВЕГЕТАТИВНЫЕ И ГЕНЕРАТИВНЫЕ ОРГАНЫ РАСТЕНИЙ

© 2023 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, А. В. Лаврищев², А. О. Ковлева^{1,2}, В. М. Буре^{1,3}

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург–Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

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

Поступила в редакцию 02.08.2022 г.

После доработки 09.09.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В 2-х вегетационных опытах, заложенных на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, проведено сравнительное изучение удобрительной ценности и мелиоративных свойств тонкоизмельченных частиц доломита (ДМ), используемых для дорожного строительства, и доменного шлака (ДШ) металлургического завода. Установлено, что спустя 1 год после известкования ДМ, внесенная в эквивалентных с ДШ по нейтрализующей способности дозах, способствовала большему сдвигу pH_{KCl} и большему накоплению суммы обменных оснований $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. По влиянию на продуктивность соломы пшеницы варианты с ДШ, внесенном в равных с ДМ количествах, не уступали последней. Влияние известкования ДМ на урожайность зерна пшеницы было более значимо, чем с ДШ. Выявлена связь между содержанием подвижных катионов $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в мелиорированной почве и продуктивностью зерна пшеницы. Разработаны эмпирические зависимости, описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на переход кальция, магния, цинка, железа и марганца в солому и зерно растений. Сделан вывод, что на первом этапе растворения мелиорантов их химическая природа была ведущим фактором при достижении эффекта от известкования. Степень измельчения известковых материалов имела второстепенное значение.

Ключевые слова: химический состав растений, яровая пшеница, кислая дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, известкование, кальцийсодержащие отходы промышленности, эмпирические модели, транслокация макро- и микроэлементов, вегетативные и генеративные органы растений.

DOI: 10.31857/S0002188123010052, EDN: FEOMBE

ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории мелиорации почв АФИ (бывшая лаборатория агроэкологических исследований ВНИПТИМ) с 1987 г. проводили исследования, направленные на установление возможности использования отходов промышленных производств в качестве удобрений и мелиорантов [1–8].

Сложившиеся в настоящее время экономические условия в сельском хозяйстве, дороговизна проведения известкования, терриконы кальцийсодержащих отходов около металлургических

предприятий и многочисленные известковые отвалы вблизи бывших и существующих карьеров по добыче щебня для дорожного строительства заставляют вернуться к этому вопросу.

К настоящему времени существуют достаточно полные представления о механизме растворения кальцийсодержащих мелиорантов в почвах. Например, при растворении известняковой муки кальций, который содержится в отдельных полисинтетических двойниковых зернах, исчезает почти полностью. Остаются реликты зерен кальцита, окруженные мелкозернистыми новообразова-

Таблица 1. Изменение кислотно-основных свойств почвы под действием возрастающих доз доломитовой муки и доменного шлака

Вариант	pH _{KCl}	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль(экв)/100 г
Опыт 1		
1. Фон (NPK)	4.14	1.45
2. Фон + ДМ по 0.375 Н _г	4.52	3.71
3. Фон + ДМ по 0.75 Н _г	4.97	5.36
4. Фон + ДМ по 1 Н _г	5.38	6.63
Опыт № 2		
1. Фон (NPK)	4.14	1.45
5. Фон + ДШ по 0.1 Н _г	4.30	2.06
6. Фон + ДШ по 0.25 Н _г	4.39	2.54
7. Фон + ДШ по 0.375 Н _г	4.42	3.05
8. Фон + ДШ по 0.75 Н _г	4.69	3.84
9. Фон + ДШ по 1 Н _г	4.83	4.71

Примечание. ДМ – доломитовая мука, ДШ – доменный шлак. То же в табл. 2–5.

ниями Ca₃(C₆H₅O₇)₃, которые препятствуют дальнейшему растворению, но с увеличением продолжительности взаимодействия с почвой так же полностью исчезают.

Доломитовая порода, сложенная исключительно чистым доломитом – Ca,Mg(CO₃)₂ – встречается очень редко. Чаще она состоит из кальцита, магнезита и, собственно, доломита. Обычно избыток CaCO₃ образует кальциевый цемент, скрепляющий ромбоэдрические кристаллы двойного карбоната. Растворение среднего доломита – результирующая 2-х параллельно идущих процессов: 1 – растворение кальцита (или магнезита), цементирующего кристаллы двойной соли, 2 – растворение зерен собственно двойной соли. Растворимость чистого кальцита или чистого магнезита выше, чем растворимость двойной соли, поэтому избирательное растворение имеет своим результатом процесс с характерными конечными продуктами. Происходит измельчение доломита в процессе химического выветривания с образованием порошковидного доломита [9].

Результаты петрографических исследований доменных шлаков показали, что доминирующим минералом в их составе является мелинит (2CaO · MgO · 2SiO₂) · (2CaO · Al₂O₃ · SiO₂), состоящий на 10% из окерманита (2CaO · MgO · 2SiO₂) и на 90% из геленита (2CaO · Al₂O₃ · SiO₂). Отмечено постепенное равномерное растворение мелинита по

трещинам по всей поверхности его соприкосновения с почвой [10].

Использование отходов в качестве мелиорантов имеет свои особенности. Каждый обладает только ему присущим набором макро- и микроэлементов. При их внесении в почву важную роль играет не только прямое увеличение концентрации примесных элементов, которые могут поглощать растения непосредственно, но и сложные процессы адсорбции, комплексообразования, ионного обмена, соосаждения между отдельными элементами, в результате чего подвижность (доступность) их для растений будет меняться. При повышении уровня обеспеченности одним элементом у растений, как правило, изменяется потребность в других.

Цель работы – изучить особенности химического состава растений яровой пшеницы, выращенных на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной возрастающими дозами доломитовой муки (ДМ), приготовленной из отсева доломитовой крошки, и тонкоизмельченного доменного шлака (ДШ) металлургического предприятия.

Задачи исследования: изучить изменения кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы спустя 1 год после известкования ДМ и ДШ в широком интервале доз; определить продуктивность и химический состав генеративных и вегетативных органов яровой пшеницы; выявить связь между содержанием подвижных катионов (Ca²⁺ + Mg²⁺) в мелиорируемой почве и продуктивностью зерна пшеницы; разработать эмпирические зависимости, описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на переход кальция, магния, марганца, железа и цинка в солому и зерно растений; на основе проведенных исследований дать сравнительную оценку удобрительной ценности и мелиоративных свойств известковых материалов карбонатной и силикатной природы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение проводили в 2-х параллельных вегетационных опытах. Схема опыта с ДМ (опыт 1) включала 4 варианта, с ДШ (опыт 2) – 6 вариантов. Контролем в обоих опытах служил вариант без известкования, удобренный минеральными удобрениями (табл. 1).

Выращивание растений проводили в вегетационных сосудах, вмещающих 5 кг почвы. Перед посевом почву удобряли азофоской (NPK = 16 : 16 : 16) в количестве 0.2 г д.в./кг почвы. Культура – яровая пшеница (*Triticum*) сорта Ленинградская-97. Пшеницу в опыте выращивали до полной спелости.

Таблица 2. Валовой химический состав дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, % на бескарбонатную и безгумусную почву

Потеря при прокаливании	SiO ₂	R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	Σ
4.75	82.27	9.12	1.89	8.38	0.29	0.30	0.09	0.38	1.47	99.82

Таблица 3. Содержание элементов-загрязнителей и тяжелых металлов в доменном шлаке и доломитовой муке, мг/кг

As	Hg	Pb	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni
Доменный шлак							
0.14	0.018	27.2	9.0	4.1	1105	<0.01	11.6
Доломитовая мука							
<1.0	<0.015	9.76	1.46	8.50	Не определяли	<0.05	6.20

В опытах использовали сильноокислую дерново-подзолистую легкосуглинистую почву со следующими физико-химическими показателями: рН_{KCl} 4.1, гидролитическая кислотность (H_r) и сумма поглощенных оснований (S) – 4.75 и 1.5 ммоль(экв)/100 г почвы соответственно, гумус – 1.75%, содержание фракции <0.01 мм – 24.1%. Валовой химический состав почвы приведен в табл. 2.

В качестве мелиорантов применяли доломитовую муку, приготовленную из отсева доломита, используемого для дорожного строительства (месторождение Елизаветино, Гатчинский р-н Ленинградской обл.) и доменный шлак Череповецкого металлургического комбината.

Перед применением мелиорантов их размалывали до тонкодисперсного (порошкообразного) состояния, пропуская через сито с диаметром ячеек 0.25 мм. Нейтрализующая способность ДМ – 93, ДШ – 85%. При внесении в почву мелиоранты выравняли по нейтрализующей способности. Доза ДМ, рассчитанная по 1 H_r , составила 12.6, ДШ – 13.8 г/сосуд. Содержание CaCO₃ в отсева – 48.1, MgCO₃ – 36.4%, в доменном шлаке: CaO – 39.73, MgO – 19.7, SiO₂ – 38.43, Al₂O₃ – 6.7, MnO – 0.32%. Содержание примесных элементов в мелиорантах приведено в табл. 3.

ДШ Череповецкого завода является известково-силикатным, а доломитовая мука – известково-карбонатным удобрением. По содержанию тяжелых металлов, присутствующих в отходах, они не представляют угрозы загрязнения почв и растений.

Физико-химические показатели почвы устанавливали общепринятыми методами. Микроэлементный состав почв, растений и мелиорантов определяли на атомно-адсорбционном спектрофотометре. Извлечение суммы Ca²⁺ + Mg²⁺ из почв проводили ацетатно-аммонийным буфером

(рН 4.8). Полученные данные обработаны методами математической статистики [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты свидетельствовали, что во всех вариантах с известкованием применение мелиорантов способствовало росту величины рН, измеренной в растворе 1 н. KCl. Чем больше была доза применения, тем показатель рН был выше. Использование одних минеральных удобрений не вызвало подкисления (табл. 1).

Эффект от применения мелиорантов карбонатной и силикатной природы был различен. Если при использовании ДМ рост рН в варианте с использованием полной дозы мелиоранта (1 H_r) достигал 5.38 ед. рН, то при применении ДШ в эквивалентной дозе величина рН_{KCl} составила 4.83 ед.

Изменение величины рН_{KCl} в мелиорированной почве коррелировало с изменением суммы поглощенных оснований Ca²⁺ + Mg²⁺. В опыте с ДМ изменения содержания составили от 1.45 (вариант НРК) до 6.63 ммоль(экв)/100 г почвы (вариант с доломитовой мукой, рассчитанной по полной дозе H_r). Коэффициент корреляции был равен $r = 0.99$. В опыте с ДШ размах изменений содержания суммы Ca²⁺ + Mg²⁺ составил 1.45–4.71 ммоль(экв)/100 г почвы. Коэффициент корреляции между величинами рН_{KCl} и суммы Ca²⁺ + Mg²⁺ был равен 0.99. Таким образом, в обоих опытах в результате известкования уже в год применения был достигнут мелиоративный эффект. Использование ДМ более значимо повлияло на кислотно-основные свойства почвы. Следовательно, химическая природа мелиоранта была ведущим фактором при достижении эффекта от известкования. Степень измельчения имела второстепенное значение.

Таблица 4. Продуктивность и химический состав растений яровой пшеницы

Вариант	Урожай, г/сосуд		Ca		Mg		Fe		Mn		Zn	
			%				мг/кг					
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Опыт 1												
1. Фон (НРК)	2.2	4.7	0.066	0.418	0.125	0.056	56.3	82.1	194.7	419.3	45.1	17.3
2. Фон + ДМ по 0.375 H_T	9.7	10.8	0.053	0.425	0.162	0.181	62.9	82.5	54.4	206.1	41.2	12.7
3. Фон + ДМ по 0.75 H_T	11.9	11.4	0.047	0.488	0.167	0.190	60.2	77.0	42.3	141.0	30.6	6.9
4. Фон + ДМ по 1 H_T	12.5	11.6	0.049	0.470	0.170	0.190	64.0	67.4	41.7	101.9	27.2	5.1
Опыт 2												
1. Фон (НРК)	2.2	4.7	0.066	0.418	0.125	0.056	56.3	82.1	194.7	419.3	45.1	17.3
2. Фон + ДШ по 0.1 H_T	6.0	7.3	0.047	0.403	0.145	0.092	42.9	72.9	126.6	347.7	39.3	10.6
3. Фон + ДШ по 0.25 H_T	8.8	8.7	0.058	0.407	0.130	0.078	49.3	66.1	69.1	246.5	32.9	8.6
4. Фон + ДШ по 0.375 H_T	8.4	10.0	0.048	0.433	0.147	0.091	52.8	78.7	65.5	219.7	34.5	16.0
5. Фон + ДШ по 0.75 H_T	9.2	11.8	0.051	0.435	0.140	0.150	61.4	76.7	50.6	198.4	45.4	9.0
6. Фон + ДШ по 1 H_T	9.4	12.7	0.048	0.460	0.136	0.172	55.0	81.1	40.6	185.3	25.7	7.9

Примечание. В графе 1 – зерно, 2 – солома.

Данные о влиянии известкования на урожайность и химический состав растений пшеницы приведены в табл. 4. Минимальный выход соломы растений в опытах был характерен для контрольного варианта. В вариантах, удобренных ДМ в дозах 0.375–1 H_T , урожайность соломы была в 2.3–2.5 раза больше, чем в контроле. Применение ДШ в эквивалентных с ДМ дозах было не менее эффективным.

Влияние известкования ДМ на выход зерна пшеницы оказалось более значимо, чем ДШ. Прибавки урожая в сосудах с использованием ДМ в дозах, соответствующих 0.75 и 1 H_T , были больше, чем в аналогичных вариантах со шлаком.

Эмпирическая модель (1), описывающая влияние содержания суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве, мелиорированной ДМ, на урожайность зерна пшеницы имеет следующий вид:

$$y_1 = 0.4558 + 2.01x, \quad (1)$$

для доменного шлака:

$$y_2 = 1.669 + 1.93x, \quad (2)$$

где x – содержание суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве, y – урожайность зерна.

Для опыта 1: $p = 0.051$ (p – value по критерию Фишера), $R^2 = 0.901$, для опыта 2: $p = 0.046$, $R^2 = 0.67$. Ожидаемое изменение показателя y при увеличении x на одну единицу в интервале измерений в опыте 1 – $v_1 = 2.01$, в опыте 2 –

$v_2 = 1.93$. График эмпирической зависимости (1) приведен на рис. 1.

Зависимости величины урожая зерна в опыте 1 и опыте 2 от содержания суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве были статистически значимыми на высоком уровне значимости. Таким образом, использование мелиорантов как карбонатной, так и силикатной природы, привело к увеличению урожая зерна пшеницы. Величины ожидаемых изменений v_1 и v_2 были практически одинаковыми. На рис. 1 графики моделей (1) и (2) почти параллельны. Более высокий уровень урожая зерна, достигнутый в опыте 1, по-видимому, объясняется более высоким содержанием доступных для растений $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве, мелиорированной ДМ, чем ДШ в год применения.

Разная растворимость мелиорантов в почве различных вариантов опыта неизбежно сказалась на количестве поглощенного пшеницей магния. Концентрация магния в соломе во всех изученных вариантах опыта с ДМ была больше, чем в аналогичных вариантах опыта с ДШ. При использовании ДМ в дозе 0.375 H_T содержание магния в соломе было равно 0.181% от абсолютно сухой массы растений, в варианте с эквивалентной дозой ДШ – 0.091%, т.е. в 2 раза меньше. Изменения содержания магния в вариантах опыта с ДМ составили 0.056–0.190% (разница в 3.4 раза), в вариантах с ДШ – от 0.056 до 0.172% (разница в 3.0 раза).

По мере увеличения дозы применения мелиорантов установлен рост содержания магния в со-

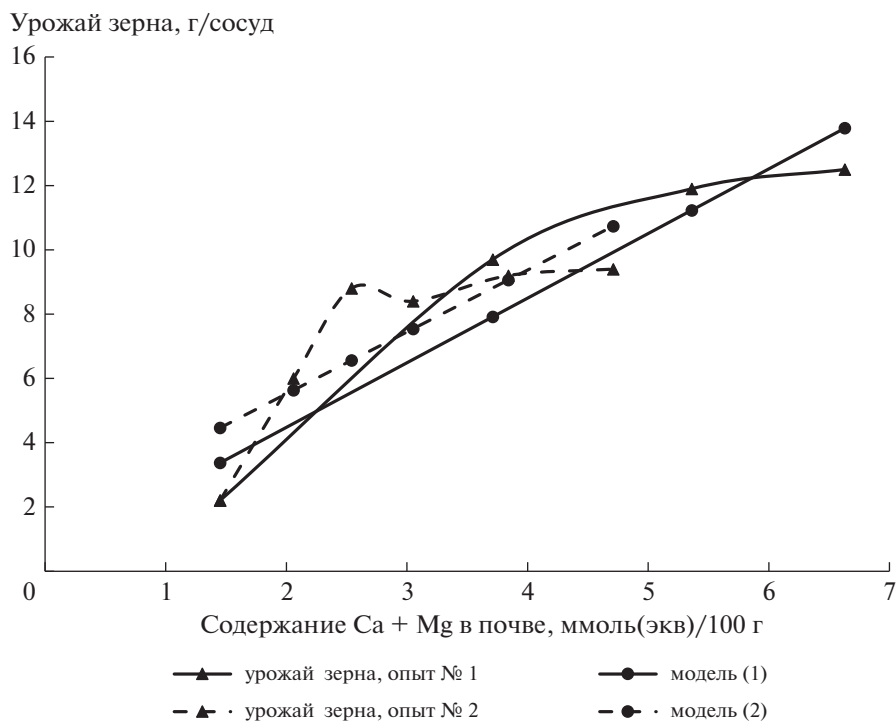


Рис. 1. Зависимость продуктивности зерна пшеницы от концентрации доступных соединений $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве.

ломе пшеницы. Статистическая значимость моделей (5) и (6), описывающих влияние дозы применения мелиорантов на переход магния в солому, в опыте с ДМ была низкой, в опыте с ДШ — высокой (табл. 5).

Изменение содержания магния в зерне пшеницы на почве, мелиорированной ДМ, составило 0.165–0.170, в опыте с ДШ — 0.125–0.147%. Разница в опыте с ДМ составила 1.03 раза, в опыте с ДШ — 1.2 раза. Таким образом, можно говорить об определенной стабильности концентрации магния в генеративных органах пшеницы.

Известно, что в растения пшеницы основная масса минеральных элементов поступает до колошения, а репродуктивные органы обеспечиваются элементами питания за счет оттока из листьев и стебля. Наряду с неодинаковой растворимостью мелиорантов, именно перераспределением магния из вегетативных органов в зерно следует объяснять низкую вариабельность его содержания в зерне пшеницы и высокую — в вегетативных органах. В этом убеждает следующее обстоятельство. Содержание магния в соломе пшеницы во всех известкованных вариантах опыта с ДМ было больше, чем в зерне. В опыте с ДШ подобная закономерность установлена только в вариантах с применением шлака в невысоких дозах (0.1–0.375 H_T). При известковании ДШ в дозе 0.75–1.0 H_T

количество магния в соломе резко возросло и было больше, чем в зерне. При этом изменение содержания магния в зерне пшеницы в вариантах опыта с известкованием низкими дозами мелиоранта и дозой, соответствующей 1 H_T , было незначительным (0.136–0.145%).

Согласно современным представлениям, формирование элементного состава растений проходит под влиянием генетически обусловленных и экологических факторов. Не все органы растений в одинаковой мере отражают через элементный состав химическую ситуацию в почве. Между элементным составом семян и вегетативных органов существует значительная разница. Содержание и соотношение основных элементов питания в семенах более постоянно. Очевидно, что химический состав генеративных органов в большей степени следует рассматривать как наследственное свойство. Можно утверждать, что растения осуществляют более жесткий генетический контроль за содержанием элементов питания в генеративных органах. Это обеспечивает нормальное функционирование растений на начальном этапе их развития.

Статистическая значимость моделей (3) и (4), описывающих влияние дозы мелиорантов на переход Mg в зерно пшеницы в опыте 1 была не высокой, в опыте 2 — низкой. Ожидаемое изменение

Таблица 5. Эмпирические модели транслокации макро- и микроэлементов в генеративные и вегетативные органы пшеницы

	Модель, №	Модель	<i>p</i> -value	<i>v</i> *	<i>R</i> ^{2**}
Опыт 1 (Mg, зерно)	3	$y_3 = 0.133 + 0.043x$	0.1	0.043	0.79
Опыт 2 (Mg, зерно)	4	$y_4 = 0.135 + 0.0048x$	0.67	0.0048	0.04
Опыт 1 (Mg, солома)	5	$y_5 = 0.087 + 0.126x$	0.15	0.126	0.71
Опыт 2 (Mg, солома)	6	$y_6 = 0.061 + 0.111x$	0.0019	0.111	0.92
Опыт 1 (Ca, зерно)	7	$y_7 = 0.063 - 0.018x$	0.1	-0.018	0.8
Опыт 2 (Ca, зерно)	8	$y_8 = 0.057 - 0.01x$	0.28	-0.01	0.278
Опыт 1 (Ca, солома)	9	$y_9 = 0.415 + 0.067x$	0.138	0.067	0.74
Опыт 2 (Ca, солома)	10	$y_{10} = 0.406 + 0.048x$	0.019	0.048	0.78
Опыт 1 (Mn, зерно)	11	$y_{11} = 160.2 - 144.8x$	0.1	-144.8	0.72
Опыт 2 (Mn, зерно)	12	$y_{12} = 141.8 - 122.7x$	0.05	-122.7	0.65
Опыт 1 (Mn, солома)	13	$y_{13} = 380.2 - 307.1x$	0.05	-307.1	0.9
Опыт 2 (Mn, солома)	14	$y_{14} = 353.7 - 204.1x$	0.03	-204.1	0.7
Опыт 1 (Fe, зерно)	15	$y_{15} = 57.7 + 5.94x$	0.23	5.94	0.58
Опыт 2 (Fe, зерно)	16	$y_{16} = 49.5 + 8.51x$	0.288	8.51	0.27
Опыт 1 (Fe, солома)	17	$y_{17} = 84.7 - 14.01x$	0.12	-14.01	0.76
Опыт 2 (Fe, солома)	18	$y_{18} = 74.5 + 4.26x$	0.59	4.26	0.07
Опыт 1 (Zn, зерно)	19	$y_{19} = 46.14 - 19.06x$	0.017	-19.06	0.96
Опыт 2 (Zn, зерно)	20	$y_{20} = 41 - 9.36x$	0.3	-9.36	0.22
Опыт 1 (Zn, солома)	21	$y_{21} = 17.25 - 12.7x$	0.006	-12.7	0.99
Опыт 2 (Zn, солома)	22	$y_{22} = 14.16 - 6.28x$	0.2	-6.28	0.36

**v* – ожидаемое изменение показателя содержания элемента питания при увеличении концентрации Ca + Mg в почве на одну единицу.

***R*² – коэффициент детерминации.

концентрации Mg в зерне пшеницы от дозы применения мелиорантов: опыт 1 – $v_3 = 0.043$, опыт 2 – $v_2 = 0.0048$; в соломе: опыт 1 – $v_5 = 0.126$, опыт 2 – $v_6 = 0.111\%$ от абсолютно сухой массы растений.

Из неравенств $v_3 = 0.043 > v_4 = 0.0048$ и $v_5 = 0.126 > v_6 = 0.111$ можно сделать вывод, что применение ДМ способствовало большему обогащению магнием как генеративных, так и вегетативных органов пшеницы, чем ДШ.

Кальций преимущественно накапливался в вегетативных органах пшеницы (табл. 4). Его концентрация в соломе менялась в зависимости от варианта опыта с ДМ от 0.418 до 0.488%. Максимальным уровнем накопления характеризовался вариант с использованием доломитовой муки в дозе 0.75 Н_г. В варианте, удобренном доломитовой мукой в полной дозе, рассчитанной по 1 Н_г, содержание кальция было меньше (0.47%). Эмпи-

рическая значимость моделей (9) и (10), описывающих влияние дозы ДМ на концентрацию кальция в соломе пшеницы, была низкой (табл. 5).

В опыте с применением ДШ наблюдали постепенный рост содержания кальция в соломе пшеницы. В большинстве вариантов с ДШ содержание кальция было меньше, чем в аналогичных вариантах с ДМ. Изменение составило от 0.403 до 0.460%. Статистическая значимость модели, описывающая зависимость накопления кальция в соломе от дозы применения ДШ, была высокой.

Содержание кальция в зерне растений было на порядок меньше, чем в соломе. Изменение концентрации в зерне в опыте с ДМ составило от 0.047 до 0.053%, в опыте с ДШ – от 0.047 до 0.058%. Каких-либо закономерностей, связанных с влиянием дозы применения мелиоранта на накопление кальция в зерне пшеницы, выявить не удалось.

Реакция растений на накопление кальция в тканях при внесении доломитовой муки была выражена сильнее, чем на доменный шлак:

$$\begin{aligned} \text{abs}(v_7) &= 0.018 > \text{abs}(v_8) = 0.01, \\ v_9 &= 0.067 > v_{10} = 0.048. \end{aligned}$$

Физиологическая роль марганца связана с его участием в окислительно-восстановительных процессах. В качестве элемента, входящего в состав ферментов, он задействован в процессах дыхания, азотном и нуклеиновых обменах. Марганец содержится в тканях всех растений, однако отдельные органы существенно различаются между собой. Известкование, в целом, приводит к осаждению в почвах доступных для растений соединений марганца [12–14].

Данные табл. 4 свидетельствуют, что марганец преимущественно накапливался в вегетативных органах растений. Максимальным уровнем накопления характеризовался вариант с использованием одних минеральных удобрений (419 мг/кг воздушно-сухой массы растений).

Вне зависимости от вида использованного мелиоранта известкование привело к снижению содержания марганца в соломе пшеницы. В большинстве изученных вариантов содержание марганца в опыте с ДМ было меньше, чем в опыте с ДШ. Размах изменений содержания в вариантах опыта с ДМ составил от 419 до 102 мг/кг абсолютно сухой массы растений, т.е. отличался в 4.1 раза, в опыте с ДШ – от 419 до 185 мг/кг. Разница составила 2.3 раза. Коэффициент корреляции между величиной содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве и содержанием марганца в соломе в опыте 1 был равен $r = -0.97$, в опыте 2 – $r = -0.90$.

Эмпирические модели (13) и (14), описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на переход марганца в солому пшеницы, приведены в табл. 5.

Содержание марганца в зерне растений было меньше, чем в соломе. В зависимости от варианта в опыте с ДМ, его содержание варьировало от 41.7 до 54.4 мг/кг, т.е. различалось в 1.3 раза. В опыте с ДШ изменения составили от 40.6 до 127 мг/кг, т.е. отличались в 3.1 раза. Коэффициент корреляции между величинами содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве и содержания марганца в зерне в опыте 1 был равен $r = -0.97$, в опыте 2 – $r = -0.90$. Согласно литературным данным [15], оптимальная величина содержания марганца в зерне меняется от 15–25 до 80 мг/кг сухой массы растений. Таким образом, полученные данные свидетельствовали, что изменения содержания марганца в зерне большинства вариантов с известкованием

укладывались в диапазон нормальных концентраций, позволяющих обеспечить нормальное функционирование растений пшеницы.

Сопоставление изменения содержания марганца в генеративных и вегетативных органах в опытах показало, что реакция растений на внесение ДМ оказалась сильнее, чем на ДШ:

$$\begin{aligned} \text{abs}(v_{11}) &= 144.8 > \text{abs}(v_{12}) = 122.7 \text{ (в зерне)}, \\ \text{abs}(v_{13}) &= 307.1 > \text{abs}(v_{14}) = 204.1 \text{ (в соломе)}. \end{aligned}$$

Железо – необходимый элемент для роста и развития растений. Участие железа в процессах обмена веществ в растительном организме чрезвычайно обширно и отражается на активности и характере метаболизма потребляемых растениями элементах питания. Этот элемент участвует в переносе электронов и окислительно-восстановительных реакциях, таких как окисление углеводов, восстановление сульфатов и нитратов. Большую роль играет железо в фотосинтезе растений, являясь незаменимым компонентом в составе хлоропластов [16].

Показано (табл. 4), что железо присутствовало как в генеративных, так и вегетативных органах пшеницы. Сравнительный анализ данных содержания железа в зерне и соломе растений позволил установить, что содержание железа в соломе было больше, чем в зерне. В соломе пшеницы, выращенной в опыте с ДМ, изменение его содержания в вариантах составило от 82.1 (контроль) до 67.4 мг/кг в варианте с максимальной дозой мелиоранта. В опыте с ДШ содержание железа в вариантах варьировало от 82.1 до 66.1 мг/кг абсолютно сухой массы. В зерне изменение содержания железа в опыте 1 составило от 56.3 до 62.9 мг/кг, в опыте 2 – от 42.9 до 61.4 мг/кг абсолютно сухой массы.

Согласно литературным данным [16], содержание железа в органах пшеницы, обеспечивающее нормальное функционирование растений меняется от 25 до 80 мг/кг сухой массы растений. Таким образом, содержание железа в зерне в известкованных вариантах укладывалось в оптимальный интервал, необходимый для роста и развития растений пшеницы.

Статистически значимых изменений содержания железа в среднем во всем интервале доз мелиорантов в опытах с ДМ и ДШ не происходило ни в зерне – модели (15) и (16), ни в соломе – модели (17) и (18).

Цинк играет важную роль в азотном, углеродном и фосфорных обменах. Он способствует синтезу нуклеиновых кислот и белка. При недостатке цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, небелковые соединения азота, органиче-

ские кислоты, уменьшается содержание сахарозы и крахмала, нарушается синтез белка. Дефицит цинка приводит также к нарушению фосфорного обмена. При недостатке этого элемента в листьях подавляется скорость деления клеток мезофилла, что приводит к морфологическим изменениям листьев. Возрастание рН почвенного раствора, а также увеличение содержания в почве обменных соединений кальция и магния способствует снижению содержания цинка в растениях.

Из всех изученных элементов цинк характеризовался наименьшим накоплением в растениях пшеницы. Вне зависимости от дозы и вида примененного мелиоранта содержание цинка в соломе растений было в 2.6–5.3 раза (опыт 1) и в 2.2–5.0 раза меньше (опыт 2), чем в зерне. Максимальным накоплением цинка характеризовались растения контрольного варианта. Известкование способствовало снижению содержания этого элемента в растениях. Коэффициент корреляции между величинами содержания $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве и Zn в растениях в опыте 1 был равен $r = 0.95$ (зерно) и $r = 0.89$ (солома), в опыте 2 – $r = 0.82$ (зерно), $r = 0.98$ (солома).

Эмпирические зависимости, описывающие переход Zn в зерно и солому пшеницы в зависимости от вида и дозы примененных мелиорантов приведены в табл. 5. Статистическая значимость моделей (19) и (21) перехода цинка в зерно и солому растений в опыте с ДМ была очень высокой, в опыте с ДШ – модели (20) и (22) – низкой. Влияние ДМ на накопление цинка в зерне и соломе пшеницы было значительно сильнее, чем ДШ:

$$\text{abs}(v_{19}) = 19.06 > \text{abs}(v_{20}) = 9.36 \text{ (зерно),}$$

$$\text{abs}(v_{21}) = 12.7 > \text{abs}(v_{22}) = 6.28 \text{ (солома).}$$

В целом показано, что как ДМ, приготовленная из отсева доломита, так и тонкоразмолотый шлак являются высокоэффективными мелиорантами. Их использование устраняет почвенную кислотность и приводит к обогащению почвы доступными для растений соединениями кальция и магния уже в год применения. Чем больше доза внесения известковых материалов, тем мелиоративный и удобрительный эффекты больше. Силикатная форма мелиоранта (ДШ), внесенная в эквивалентной с ДМ дозах, по влиянию на почву и растения в год применения уступала ДМ.

Возникает вопрос, какова продолжительность растворения мелиорантов карбонатной и силикатной природы. В работах [17–22] было показано, что тонкоизмельченные материалы карбонатной природы довольно активно взаимодействуют с почвой. Например, спустя 1 год после мелиора-

ции доломитовой и известняковой мукой в дозе 1 H_r остаточное количество непрореагировавших карбонатов изменялось от 15.1 до 15.5% от внесенного количества, а полное растворение заканчивалось на 7-й год после известкования [18].

Растворение доменного шлака проходило медленнее. В опытах [23] продолжительность действия полной по H_r дозы металлургического шлака составила 34 года. Действие металлургического шлака на кислотность почвы было слабее, чем известняковой и доломитовой муки, продуктивность сельскохозяйственных культур была больше.

В опытах [24] проведено изучение мелиоративных свойств мелкоразмолотого доменного шлака. Установлено, что даже спустя 39 лет после применения мелкоразмолотого ДШ, он продолжал оказывать положительное действие на почву. Основываясь на данных опытов [23, 24] и в нашем случае следует ожидать длительного последствия ДШ.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, использование доломитовой муки (ДМ) и доменного шлака (ДШ) привело к росту показателя pH_{KCl} в кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Чем больше была доза применения мелиорантов, тем больший сдвиг величины рН достигнут в опытах. Карбонатная форма мелиоранта в год применения более значимо повлияла на изменение рН, чем силикатная форма.

2. Применение мелиорантов способствовало обогащению почвы доступными для растений катионами кальция и магния. Почва, мелиорированная доломитовой мукой спустя 1 год после применения, характеризовалась более высоким содержанием обменных оснований, чем почва, удобренная ДШ.

3. Известкование привело к росту продуктивности растений пшеницы. В вариантах, удобренных ДМ, урожай соломы пшеницы был в 2.3–2.5 раза больше, чем в контроле. Варианты с ДШ, внесенном в равных с ДМ количествах, не уступали вариантам с ДМ. Влияние известкования ДМ на урожай зерна было более значимо, чем доменного шлака. Зависимость урожайности зерна в опытах с ДМ и ДШ от содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве были статистически значимыми на высоком уровне значимости. Более высокая продуктивность зерна в опыте с доломитовой мукой объясняется большей концентрацией в почве опыта доступных для растений катионов кальция и маг-

ния, достигнутой при применении карбонатной формы мелиоранта.

4. Изменения содержания магния в соломе в вариантах опыта с ДМ составили 0.056–0.190%, разница – в 3.4 раза, в вариантах опыта с ДШ – 0.056–0.172%, разница – в 3.1 раза. В зерне, выращенном в опыте с ДМ, содержание магния варьировало от 0.125 до 0.170% (в 1.36 раза), в опыте с ДШ – 0.125–0.147% (в 1.18 раза).

5. Кальций преимущественно накапливается в вегетативных органах пшеницы. Его концентрация в соломе менялась в зависимости от вариантов опыта с ДМ от 0.418 до 0.488%. В большинстве вариантов с ДШ содержание кальция было меньше, чем в аналогичных вариантах с ДМ. Изменения составили от 0.403 до 0.460%. Содержание кальция в зерне было на порядок меньше, чем в соломе. В опыте с доломитовой мукой размах изменений установлен в интервале от 0.047 до 0.053%, в опыте с ДШ – от 0.047 до 0.058%.

6. Во всех опытах известкование способствовало уменьшению поступления марганца и цинка в растения пшеницы. Это было связано как с изменением подвижности микроэлементов при изменении реакции почвенного раствора, так и с конкурентным характером поступления марганца, цинка и $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в корни растений.

7. В соломе пшеницы, выращенной в опыте с ДМ, изменение содержания железа в вариантах составило от 82.1 (контроль) до 67.4 мг/кг (вариант с максимальной дозой мелиоранта – 1 H_r). В опыте с ДШ накопление железа в вариантах варьировало от 82.1 до 66.1 мг/кг абсолютно сухой массы. В зерне изменение его содержания в опыте 1 составило от 56.3 до 63.9 мг/кг, в опыте 2 – от 42.9 до 61.4 мг/кг абсолютно сухой массы. Статистически значимых изменений содержания железа в среднем во всем интервале доз мелиорантов в опытах с ДМ и ДШ ни в зерне, ни в соломе не происходило.

8. Содержания Mn и Fe в тканях растений, выращенных на почве известкованных вариантов, укладывались в оптимальный диапазон для роста и развития растений пшеницы.

9. Растения осуществляли более жесткий генетический контроль за содержанием элементов питания в генеративных органах. Содержание и соотношение основных элементов питания в зерне было более постоянным.

10. Разработаны эмпирические зависимости, описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на транслокацию кальция, магния, железа, цинка и марганца в зерно и солому пшеницы.

11. Химическая природа мелиорантов была ведущим фактором при достижении эффекта от известкования. Степень измельчения известковых материалов имела второстепенное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.
2. *Алексеев Ю.В., Вялушкина Н.И.* Вопросы загрязнения почв хромом при известковании феррохромовыми шлаками // Химизация сел. хоз-ва. 1991. № 7. С. 21.
3. *Алексеев Ю.В., Вялушкина Н.И., Игамбердиев В.М.* Экологические аспекты известкования феррохромовым шлаком // Химизация сел. хоз-ва. 1991. № 9. С. 29.
4. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В.* Накопление стабильного стронция сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистых почв конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 9. С. 80–88.
5. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Бирюков В.А.* Разложение конверсионного мела в дерново-подзолистой почве в связи с угрозой ее загрязнения стабильным стронцием // Агрохимия. 2001. № 11. С. 64–68.
6. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // Агрохимия. 2002. № 4. С. 81–87.
7. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Витковская С.Е.* Экологические аспекты известкования почв конверсионным мелом // Плодородие. 2005. № 1(22). С. 23–26.
8. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Алексеев Ю.В., Оглуздин А.С.* Химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произвесткованных промышленными отходами // Агрохимия. 2008. № 7. С. 50–55.
9. *Якуч Л.* Морфогенез карстовых областей. М.: Прогресс, 1979. 388 с.
10. *Шильников И.А., Васильева С.И.* Эффективность металлургических шлаков, как известковых удобрений в зависимости от их структуры // Агрохимия. 1974. № 9. С. 86–94.
11. *Буре В.М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб., 2007. 141 с.
12. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В.* Динамика почвенной кислотности и содержание подвижных форм соединений алюминия, марганца и железа в почве при известковании конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 6. С. 10–15.
13. *Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю.* Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // Агрохимия. 2015. № 5. С. 61–68.
14. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В.* Динамика со-

- держания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита // *Агрохимия*. 2018. № 8. С. 52–63.
15. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 440 с.
 16. Шейджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп, 2003. 1028 с.
 17. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // *Агрохимия*. 2012. № 10. С. 79–94.
 18. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Ковлева А.О. Мелиоративные свойства, удобрительная ценность и скорость растворения в почвах различных по размеру фракций отсева доломита, используемого для дорожного строительства // *Агрохимия*. 2016. № 2. С. 31–41.
 19. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Салаев И.В. Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // *Агрохимия*. 2016. № 12. С. 42–50.
 20. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // *Агрохимия*. 2010. № 10. С. 3–10.
 21. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Влияние различных по размеру фракций доломита на показатели почвенной кислотности легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 27–37.
 22. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Динамика содержания обменных катионов кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2018. № 3. С. 50–61.
 23. Зеленов Н.А., Шильников И.А., Аканова Н.И., Швырков Д.А. Резерв химических мелиорантов и их агроэкологическая эффективность // *Современные проблемы и перспективы известкования кислых почв*. СПб., 2010. С. 30–34.
 24. Небольсин А.И., Небольсина З.П. Теоретические основы известкования почв. СПб., 2005. 252 с.

Chemical Composition of Spring Wheat Plants on Acidic Sod-Podzolic Light Loamy Soil, Calcified by Calcium-Containing Industrial Waste. Empirical Models of Translocation of Macro- and Microelements into Vegetative and Gene-Rative Organs of Plants

A. V. Litvinovich^{a,b,#}, A. V. Lavrishchev^b, A. O. Kovleva^a, and V. M. Bure^{a,c}

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

^b*Sankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia*

^c*Sankt-Petersburg State University
Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg 199034, Russia*

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

In 2 vegetation experiments laid on acidic sod-podzolic light loamy soil, a comparative study of the fertilizing value and reclamation properties of finely ground dolomite flour (DF) particles used for road construction and blast furnace slag (FS) of a metallurgical plant was carried out. It was found that 1 year after liming, DF, introduced in doses equivalent to FS in terms of neutralizing ability, contributed to a greater shift in pH_{KCl} and a greater accumulation of the sum of the exchange bases $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. In terms of the effect on the productivity of wheat straw, variations with FS, introduced in equal amounts with DF, were not inferior to the latter. The effect of liming DF on wheat grain yield was more significant than with FS. The relationship between the content of mobile $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ cations in reclaimed soil and the productivity of wheat grain was revealed. Empirical dependences describing the effect of increasing doses of meliorants on the transition of calcium, magnesium, zinc, iron and manganese into straw and grain of plants have been developed. It is concluded that at the first stage of the dissolution of meliorants, their chemical nature was the leading factor in achieving the effect of curing. The degree of grinding of lime materials was of secondary importance.

Key words: chemical composition of plants, spring wheat, acidic sod-podzolic light loamy soil, liming, calcium-containing industrial waste, empirical models, translocation of macro- and microelements, vegetative and generative organs of plants.

УДК 631.879.2:631.821:632.122.1:631.445.24

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ИЗВЕСТИ НА ВАЛОВОЕ СОДЕРЖАНИЕ И КОНЦЕНТРАЦИЮ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СУПЕСЧАНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2023 г. А. С. Фрид^{1,*}, В. А. Касатиков², Т. И. Борисочкина³,
К. А. Колчанова³, Н. С. Никитина³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 п/о Большие Вязёмы, Московская обл., ул. Институт, влад. 5, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений – филиал Верхневолжского ФАНЦ
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, д. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия

³Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 04.08.2022 г.

После доработки 28.08.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

Рассмотрена многолетняя динамика валового содержания и концентрации подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) в почве микрополевого опыта, заложенного в 1984 г. на дерново-подзолистой глееватой супесчаной почве на моренном суглинке (Владимирская обл.). Вносили различные большие дозы осадков городских сточных вод (ОСВ) и извести (доломитовую муку) в качестве мелиорантов. Несмотря на длительность проведения полевого опыта, отбор образцов для сравнения вариантов опыта по содержанию ТМ в почве оказался недостаточно системным. Поэтому сравнения удалось провести лишь на основе 3–4 лет, причем с недостаточной сопоставимостью аналитических данных. В результате, если в отдельные годы получена значимая зависимость содержаний ТМ в почве от доз мелиорантов, то в многолетнем плане, в основном можно говорить лишь о тенденциях. С точки зрения загрязнения пахотного слоя почвы найдено, что валовое содержание Cd, Zn, As было больше норматива (ОДК) во всех вариантах опыта (включая контроль); то же показано для Си во всех вариантах, кроме контроля, и для Ni при максимальных дозах внесения ОСВ. Загрязнение почвы в контроле, по-видимому, связано с латеральным переносом. Большую часть валового содержания Cd и Си извлекали однонормальными кислотами. Содержание подвижной меди (ААБ рН 4.8) (по сравнению с кислоторастворимой) слабо реагировало на внесение мелиорантов.

Ключевые слова: многолетний полевой опыт, осадок городских сточных вод, известкование, тяжелые металлы, динамика тяжелых металлов в почве, дерново-подзолистая супесчаная почва.

DOI: 10.31857/S0002188123010040, EDN: FEQIYU

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние полевые опыты – довольно распространенный метод исследования в почвоведении и агрохимии. Однако многолетняя специфика таких опытов анализируется очень редко. В частности, содержание тяжелых металлов (ТМ) в почвах определяют один или несколько раз за время проведения опыта, но анализируют их путем сравнения вариантов и/или сравнения с нормативами загрязнения. Временные изменения, сопоставления внесения ТМ и их содержания в почве не анализируют. Одна из причин этого – отсутствие общепринятой методики анализа по-

добных данных. В работе [1] представлен возможный вариант такой методики.

Цель работы – проанализировать многолетнюю динамику валового содержания и концентраций форм ТМ в почве длительного опыта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроделяночный полевой опыт был заложен в 1984 г. на дерново-подзолистой глееватой супесчаной почве на моренном суглинке на территории ВНИИОУ (Судогодский р-н Владимирской обл.) [2]. Варианты опыта содержат кон-

Таблица 1. Схема многолетнего полевого опыта

Вариант, №	Разовые дозы внесения, т/га	
	<i>ОСВ</i>	Известь
1 (контроль)	0	0
2	15	3
3	30	3
4	60	3
5	120	3
6	15	6
7	30	6
8	60	6
9	120	6
10	15	9
11	30	9
12	60	9
13	120	9

Примечание. Дозы *ОСВ* указаны при 50%-ной влажности.

троль и сочетания различных доз осадков городских сточных вод (*ОСВ*) и извести (доломитовой муки) в качестве мелиорантов (табл. 1). Не считая контроля, в остальных вариантах дозы *ОСВ* имели 4 уровня (градации), дозы извести — 3. Число организованных полевых повторений — 6, площадь делянки 3 м² (2 × 1.5 м). Расположение вариантов внутри повторений — рандомизированное.

ОСВ вносили осенью в пахотный слой в 1984–1995, 2000, 2006, 2010 и 2015 г., доломитовую муку — в 1984, 1990, 1995, 2006, 2011 и 2015 г. Дозы извести соответствовали примерно 2-м, 4-м и 6-ти величинам гидролитической кислотности (H_r).

Имеется опубликованная информация разной степени подробности о содержании в почве ТМ в 2014, 2016, 2017 и 2018 г. [3–9], архивные данные 2003 и 2011 г. (средние данные для вариантов). Дополнительно к этому в 2015 и 2017 г. были проведены обследования опыта сотрудниками Почвенного института им. В.В. Докучаева. Математический анализ опыта в настоящей работе проводили в основном для средних в вариантах.

Поступление ТМ в почву с *ОСВ* оценивали, имея данные анализа последних [8]. После 2000 г. ввиду значительного снижения содержания ТМ в *ОСВ* их поступление в почву при внесении осадков стало незначительным (суммарно не превышало 10–12% от достигнутого до 2000 г.).

Анализ почвенных образцов проводили в разные годы в различных лабораториях и различными методами, поэтому изучение временной дина-

мики содержания ТМ представляло определенные трудности. В этом смысле внутригодовой анализ был более надежен.

Так как число изученных сроков опыта для отдельных показателей не превышало 4, число решаемых при анализе данных задач было ограничено по сравнению с возможностями, предоставляемыми методикой [1].

Для регрессионного анализа (**РА**) везде использовали квадратичную модель для обоих факторов опыта; наименее значимые члены модели отбрасывали, достигая варианта модели с наименьшей ошибкой. Эти варианты и представлены далее в таблицах, они отражают основные закономерности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщенное представление о полученных экспериментальных данных по содержанию ТМ в почве различных вариантов опыта дает табл. 2: можно наблюдать очень широкие интервалы варьирования, обусловленные скорее всего несопоставимостью между собой некоторых аналитических лабораторий. Недостаточно точны и сами методы анализа, что видно из приведенных в табл. 2 допустимых межлабораторных расхождений для валовых анализов почв [10]. Возможны и ошибки в отборе почвенных образцов, особенно в 2003 г., данные которого сильно превышают результаты других лет (рис. 1). Поэтому для большей надежности сопоставлений следует в этом случае использовать медианные величины показателей.

Из интересных результатов можно отметить следующие. Кислотное извлечение из почвы Cd и Cu дало величины, близкие к валовым содержаниям. Валовое содержание в почве, как правило, заметно меньше внесенного количества (для Sr они соответствовали друг другу). Чем объяснить такое расхождение, осталось неясным; обычно говорят о выносе растениями или миграции латеральной (по поверхности) или вертикальной вглубь почвы. О внесении с мелиорантами Mn и Co ничего не известно, но создается впечатление, что их вносили, т.к. была видна зависимость от доз внесения *ОСВ*. Стоит также обратить внимание на то, что валовое содержание As и Se при малых дозах внесения *ОСВ* было значительно меньше, чем в контрольном варианте, что возможно обусловлено выносом растениями (но это требует проверки).

Оценим экологическую составляющую полученных данных валового содержания ТМ в почве данного опыта, учитывая ее супесчаный характер.

Таблица 2. Экспериментальные оценки суммарного внесения ТМ за годы опыта и их содержания в почве

Элемент	Внесено суммарно		Пахотный слой, 0–20 см			Подпахотный слой, 20–40 см, 2003 г.		Д _{абс} [10]
			валовое	кислоторас- творимое	ААБ рН 4.8	валовое	ААБ с рН 4.8	валовое
	кг/Га	МГ/КГ почвы	МГ/КГ ПОЧВЫ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cd	$\frac{8}{60}$	$\frac{3}{22}$	0.55–2.2(1.5)	1.5–1.7(1.6)	0.03–0.93(0.72)	0.7	0.03	0.4–>0.8
			2.5–9(3.4)	1.8	1.8	1	0.55	
			8.1–39(11)	8.0–13(11)	3.8–13(5.7)	21	7.4	
Cr	$\frac{88}{707}$	$\frac{33}{260}$	15–61(38)	18	0.05–0.25(0.25)	24	0.07	–
			60–400(68)	–	0.5–0.8(0.65)	110	0.35	
			120–1680(215)	165	0.8–2.9(0.88)	1360	2.8	
Cu	$\frac{70}{560}$	$\frac{26}{207}$	17–48(28)	15–31(22)	1.0–5.7(2.1)	–	–	6–20
			42–55(48)	15–48(33)	1.3–7.3(5.3)			
			130–170(140)	77–140(130)	3.3–31(17)			
Zn	$\frac{210}{1700}$	$\frac{78}{630}$	46–110(81)	25–37(31)	3.7	89	2.4	10–60
			120–240(120)	39	5.2	120	2.9	
			61–870(340)	150–250(200)	10	280	57	
Pb	$\frac{8}{65}$	$\frac{3}{24}$	7–27(9.5)	3.2–4.5(3.8)	0–2.1(1.2)	8.2	0.3	10
			10–13(13)	3.6	0.6–2.4(1.5)	12	1.1	
			19–39(25)	11–20(16)	0.1–3.4(3.2)	28	1.5	
Ni	$\frac{26}{210}$	$\frac{9.6}{78}$	3.5–15(12)	3.1–5.6(4.4)	0.34–0.8(0.38)	10	0.15	–
			6.1–44(15)	6	0.67–1.2(0.94)	18	0.3	
			25–235(46)	25–26(26)	2.7–24(2.9)	66	7.4	
Mn	–	–	340–480(410)	110–130(120)	5.1	–	–	70–100
			300	140	–			
			650–890(770)	240	5.4			
Co	–	–	2.7–3.9(3.3)	0.91	0.04	–	–	–
			2.9	–	–			
			4.1–6.2(5.2)	2.0	0.12			
Sr	–	–	62	–	–	–	–	–
			–					
			78					
As	–	–	11	–	–	–	–	–
			0.72					
			7.9–52(30)					
Se	–	–	0.24–3.7(2)	–	–	–	–	–
			0.01					
			2.1–6.0(4)					

Примечания. 1. Для внесенного количества элемента (графы 2, 3): над чертой – при минимальной дозе *ОСВ*, под чертой – при максимальной дозе *ОСВ* (реальные дозы внесения могут быть несколько больше, на ≈15%).

2. Для содержаний ТМ в почве в разные годы (графы 4–8): верхняя строка – в контрольном варианте, средняя – минимальные показатели в остальных вариантах, нижняя – максимальные показатели в остальных вариантах.

3. В скобках – медианные величины. Д_{абс} – межлабораторное абсолютное допустимое расхождение химического анализа. Прочерк – отсутствие данных.

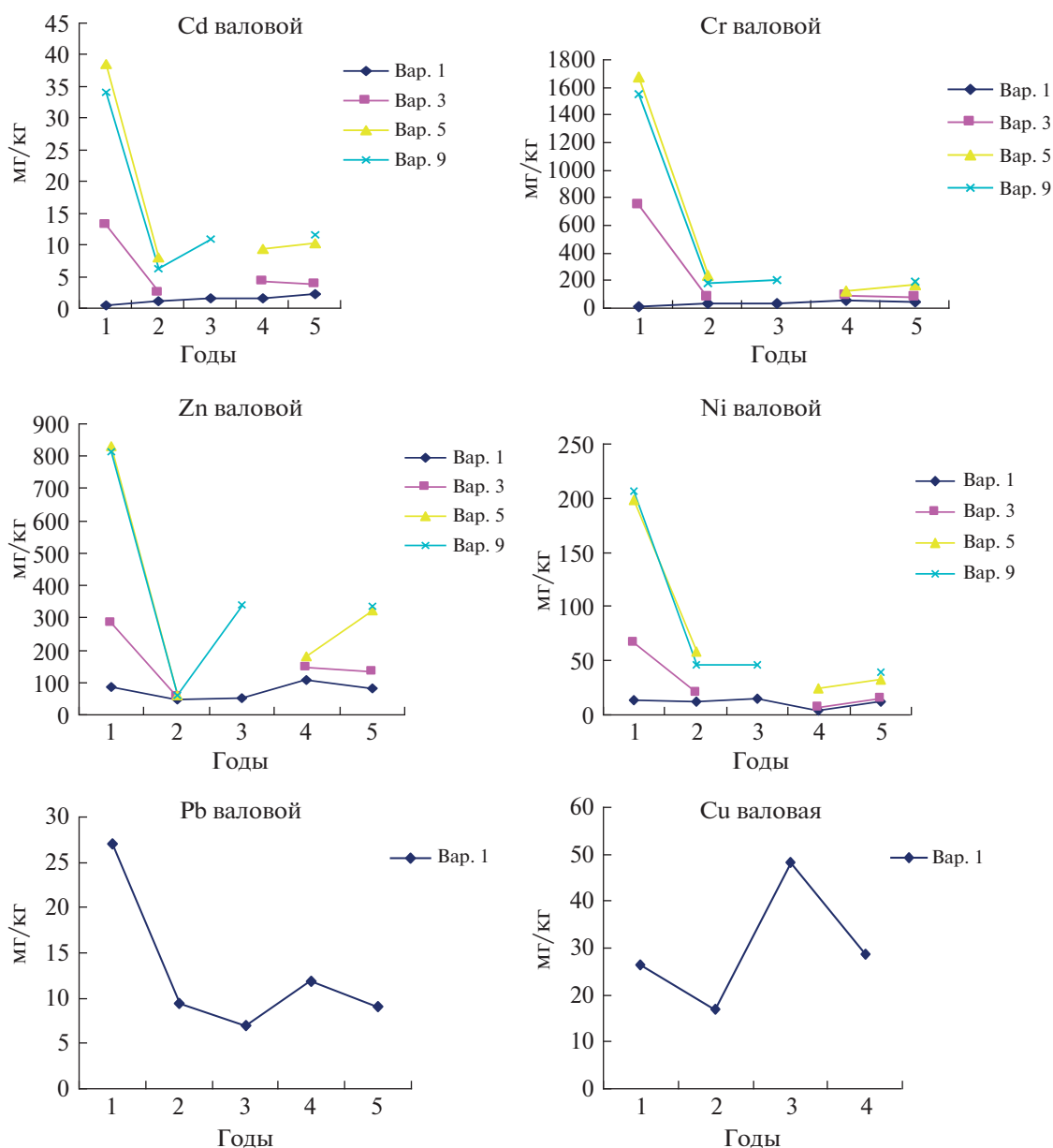


Рис. 1. Многолетняя динамика валовых содержаний тяжелых металлов в пахотном слое почвы.

По оси абсцисс – годы, для Cd, Cr, Zn, Ni, Pb: 1 – 2003, 2 – 2011, 3 – 2015, 4 – 2016, 5 – 2017 г.; для Cu: 1 – 2011, 2 – 2015, 3 – 2016, 4 – 2017 г.

Для этого также надежнее использовать медианные показатели содержаний. Согласно отчетственным нормативам, получаем, что содержания Cd, Zn, As больше ОДК для всех вариантов опыта, содержание Cu больше ОДК в вариантах с внесением мелиорантов, Ni – только при максимальных дозах их внесения. Содержание Pb везде меньше ОДК, Mn – меньше ПДК.

В качестве примера экспериментальных данных конкретных лет рассмотрим данные, полученные сотрудниками Почвенного института им.

В.В. Докучаева (табл. 3, 4). В 2015 г. почвенные образцы отбирали из разрезов на 3-х делянках 1-го полевого повторения, а также на пашне в 10 м от границ опыта. В данной работе использованы результаты для пахотного слоя. На что в этом случае можно обратить внимание. Вне опыта валовое содержание Cd, Cr, Cu, Zn, Ni было значительно меньше, чем в контрольном и в других вариантах опыта, для Pb, Sr, As, Se этого не отмечено; для Mn и Co валовое содержание вне опыта было на уровне варианта с максимальной дозой *ОСВ*. Если последний результат трудно

Таблица 3. Содержание ТМ в пахотном слое (2015 г.) (медианы измерений)

Вариант	Внесено ОСВ*	Доза извести	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Ni	Mn	Co	Sr	As	Se
	т/га		мг/кг										
	Валовое содержание												
1 (контроль)	0	0	1.47	37.5	17.1	53.7	6.97	15	337	2.7	61.7	—	0.24
8	660	6	7.03	137	94.3	217	14.4	29.4	389	3.3	62.1	7.85	2.06
9	1320	6	10.9	201	131	342	19.2	46.2	653	4.1	78.4	7.44	1.65
Вне опыта			0.15	18.5	6.71	23.9	7.19	7.14	608	4.3	56.7	7.22	0.74
1 н. HNO ₃													
1 (контроль)	0	0	1.7	18.2	17.7	24.6	4.5	3.05	109	0.91	—	—	—
8	660	6	8.46	109	92.6	177	13.2	15.1	192	1.4			
9	1320	6	13.4	165	141	251	19.7	26.2	239	2.0			
Вне опыта			0.26	1.2	1.66	3.19	2.53	0.99	161	1.2			
ААБ, pH 4.8													
1 (контроль)	0	0	0.93	0.25	1.6	9.7	0	0.34	5.1	0.04	—	—	—
8	660	6	4.23	0.78	13.9	64.7	0	1.74	5.35	0.01			
9	1320	6	5.66	0.88	19.9	93.9	0.1	2.9	5.4	0.12			
Вне опыта			0.07	0	0	0.19	0	0.13	4.7	0.12			

Примечание. Прочерк – отсутствие данных. То же в табл. 4. *Суммарное внесение ОСВ до данного года обследования.

Таблица 4. Валовое содержание ТМ в пахотном слое (2017 г.) (медианы измерений)

Вариант	Внесено ОСВ*	Доза извести	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Ni	Mn	As	Co	Se
	т/га		мг/кг									
1 (контроль)	0	0	2.2	50.8	28.8	80.9	9.1	11.8	478	11	3.85	3.7
2	180	3	2.9	68.4	42	118	9.7	15	507	51.5	3.4	6
3	360	3	3.73	75.2	48.7	133	11.6	15.1	309	43.1	3.2	4.5
4	720	3	7	117	84.5	223	17.1	22.3	484	31.2	3.8	0.01
5	1440	3	10.2	165	126	325	21.4	33.2	392	10.3	3.2	2.2
6	180	6	4.1	83.8	51.1	151	15.1	18.6	298	16.1	2.85	3.5
7	360	6	4.47	85	54.1	152	12.8	18.6	459	23	4.2	4
8	720	6	10.5	182	123	298	24.8	36.6	726	18	5.2	3.15
9	1440	6	11.6	190	128	334	24.4	39	549	48	4.6	4.7
10	180	9	8.9	147	87.1	221	20.3	30.2	625	9.1	5.2	3.7
11	360	9	8.26	141	85.8	218	18.1	29.1	600	17.4	4.6	5.1
12	720	9	10.6	165	108	260	18.4	36.4	590	0.72	4.8	0.87
13	1440	9	14.5	214	150	359	25.4	44	893	15.5	6.2	3.3
Вне опыта			2.9	—	12.5	22.3	—	—	—	—	—	—

объясним, то 2-я группа элементов, по-видимому, не содержалась в мелиорантах. Повышенное валовое содержание (по сравнению с данными вне опыта) первой группы элементов в контрольном варианте скорее всего было связано с его загрязнением от вариантов с внесением мелиоран-

тов путем латеральной миграции с поверхностными потоками воды, которые наблюдали во время дождей.

Что касается кислоторастворимой формы ТМ, то интересно отметить, что Cd, Cu, Pb (последний, кроме точки вне опыта), как и в случае дан-

Таблица 5. Дисперсионный анализ (пахотный слой (0–20 см), валовое содержание ТМ)

Год	Число учетных вариантов	Доля влияния фактора/уровень значимости			
		ОСВ		Известь	
		Cd		Cr	
2003	12	0.97/0.0005	0.005/–	0.99/0.0005	0.002/–
2011	4	0.90/–	0.018/–	0.87/–	0.03/–
2016	8	0.52–0.58/≥0.10	0.23–0.30/≥0.10	0.51–0.56/≥0.10	0.27–0.33/≥0.10
2017	12	0.66/0.001	0.30/0.0025	0.65/0.005	0.27/0.025
		Zn		Ni	
2003	12	0.97/0.0005	0.0004/–	0.98/0.0005	0.017/0.025
2011	4	0.94/–	2×10^{-5} /–	0.91/–	0.01/–
2016	8	0.51–0.52/–	0.23–0.29/–	0.66–0.71/≥0.10	0.16–0.18/–
2017	12	0.83/0.001	0.11/0.05	0.61/0.0025	0.33/0.005
		Cu		Pb	
2011	4	0.93/–	0.009/–	0.95/–	2×10^{-4} /–
2016	8	0.61–0.67/–	0.19–0.22/–	0.52–0.54/–	0.25–0.32/–
2017	12	0.79/0.001	0.15/0.05	0.60/0.025	0.23/0.10
		Mn		As	
2017	12	0.19/–	0.42/–	0.009–0.07/–	0.30–0.39/–
		Co		Se	
2017	12	0.15/–	0.58/0.05	0.60/0.10	0.03/–

Примечание. Прочерк – незначимость влияния фактора. То же в табл. 6–8.

Таблица 6. Дисперсионный анализ (пахотный слой (0–20 см), содержание кислоторастворимых форм ТМ)

Год	Число учетных вариантов	Доля влияния фактора/уровень значимости	
		ОСВ	Известь
1 М HNO ₃			
Cd			
2014	12	0.85/0.01	0.004/–
Cu			
2014	12	0.90/0.0025	0.02/–
Zn			
2014	12	0.97/0.0005	0.02/–
Pb			
2014	12	0.91/0.0005	0.04/–
Ni			
2014	12	0.85/0.01	0.01/–
Mn			
2014	12	0.88/0.0005	0.10/0.0025
1 М HCl			
Cu			
2017	4	0.97/0.05	0.03/–
2018	4	0.72/–	0.25/–

ных из табл. 2, практически полностью извлекали из почвы, а остальные элементы извлекали в вариантах опыта в значительной степени. Ацетатный буфер извлекал довольно много Cd и Zn и практически не извлекал Pb.

В 2017 г. (в отличие от 2015 г.) имелся полный набор вариантов опыта с отбором образцов в 2-х повторностях из разных полевых повторений и в нескольких точках на пашне вне опыта. Зависимость валовых содержаний ТМ от доз мелиорантов изложена ниже, а здесь имеет смысл сравнение с 2015 г. одинаковых вариантов с учетом того, что между этими сроками отбора было проведено очередное внесение ОСВ и извести. В 2017 г. вне опыта валового Cd найдено намного больше, Cu – в 2 раза больше, а Zn – столько же. Скорее всего, эти результаты объясняются пространственным варьированием. В контрольных вариантах в 2017 г. валовое содержание в почве Cd, Cr, Cu, Zn, Mn, As увеличилось, а Co и Se значительно уменьшилось (содержание Pb и Ni изменилось мало). Объяснить эти результаты для контроля можно как поверхностным переносом загрязнений, так и аналитическими ошибками.

В варианте 8 валовое содержание всех элементов в 2017 г. стало больше (что можно было бы

Таблица 7. Дисперсионный анализ (пахотный слой (0–20 см), содержание ТМ, растворимых в ААБ)

Год	Число учетных вариантов	Доля влияния фактора/уровень значимости	
		<i>ОСВ</i>	известь
Cd			
2003	12	0.68/0.05	0.06/–
2016	8	0.46–0.50/–	0.27–0.37/–
Cr			
2003	12	0.53/0.05	0.30/0.05
2016	8	0.36–0.40/–	0.30–0.49/–
Zn			
2003	12	0.91/0.001	0.017/–
2016	8	0.56–0.63/≥0.10	0.21–0.26/≥0.10
Ni			
2003	12	0.91/0.0005	0.045/–
2016	8	0.67–0.72/≥0.05	0.16–0.18/≥0.10
Cu			
2016	8	0.62–0.68/≥0.10	0.18–0.22/–
2017	4	0.98/0.01	0.012/0.10
2018	4	0.81/–	0.14/–
Pb			
2016	8	0.40/–	0.30–0.50/–

объяснить дополнительным внесением мелиорантов), а в варианте 9 изменения содержания большинства элементов были незначительными, но Mn стало меньше (что непонятно), а As и Se – заметно больше (что аналогично варианту 8 и говорит в пользу наличия этих элементов в *ОСВ* и/или в доломитовой муке).

Рассмотрим результаты дисперсионного анализа (ДА) для отдельных лет и элементов (табл. 5–8). Для валовых содержаний Cd, Cr, Zn, Ni, Cu, Pb, Se доля влияния доз *ОСВ* всегда была больше или значительно больше доли влияния доз известкования. Для Mn, As и Co отмечена обратная закономерность, причем влияние обоих факторов опыта для этих элементов (кроме Co) было незначимым. Динамику эффектов мелиорантов на валовое содержание ТМ во времени оценить затруднительно, т.к. имеются данные не более, чем для 4 лет, да и то вразбивку. Последнее обстоятельство относится и к формам тяжелых металлов в почве.

Рассмотрим влияние факторов опыта на содержание ТМ в почве с точки зрения регрессионного анализа (РА) (табл. 9–12).

Таблица 8. Дисперсионный анализ (подпахотный слой (20–40 см), содержание ТМ, 2003 г., число учетных вариантов 12)

Доля влияния фактора/уровень значимости			
<i>ОСВ</i>	известь	<i>ОСВ</i>	известь
валовое содержание		растворимое в ААБ	
Cd			
0.84/0.01	0.007/–	0.71/0.05	0.02/–
Cr			
0.72/0.05	0.03/–	0.68/0.025	0.17/0.10
Zn			
0.86/0.0025	0.06/–	0.73/0.05	0.035/–
Ni			
0.95/0.0005	0.012/–	0.73/0.025	0.053/–

Валовое содержание Cd во все годы опыта росло с увеличением доз *ОСВ*, причем наблюдаемые в уравнениях нелинейности свидетельствуют о замедлении роста содержания валового Cd с увеличением доз *ОСВ* до некоторых максимумов, расчетные величины которых выходят за рамки реальных доз *ОСВ*. Таким образом, прогнозируемые по уравнениям снижения валовых содержаний при дальнейшем увеличении доз *ОСВ* являются гипотетическими.

В 2016 и 2017 г. проявилось значимое влияние доз известкования, причем в 2016 г. оно проходило через максимум при дозах от 8 до 2 т/га, а в 2017 г. содержание валового Cd только возрастало с ростом доз известки. Сопоставляя последнее с экспериментальными данными, можно сделать вывод, что Cd в небольших количествах поступал в почву с известью, но это было не очень заметно, пока проходило его много большее поступление с *ОСВ*. В то же время появление максимума в содержании Cd в 2016 г. в зависимости от дозы известки могло быть связано с обобщением неполного набора вариантов опыта. В подпахотном слое в 2003 г. проявилось только влияние доз *ОСВ*, что одновременно означает проникновение Cd в этот слой.

Для содержания валового Cr закономерность была очень похожей для Cd, но влияние доз известкования в пахотном слое проявлялось уже 3 года из 4-х.

Для содержания валовой Cu в пахотном слое закономерность была та же, что и для Cd.

Для содержания валового Zn более четко, чем для предыдущих элементов, были выражены максимумы влияния доз *ОСВ* и известки внутри изу-

Таблица 9. Результаты РА валового содержания ТМ в пахотном слое почвы (0–20 см)

Год	Уравнение регрессии
2003	$Cd = 1.0 + 0.055OCB - 0.20 \times 10^{-4}OCB^2; R^2 = 0.97/0.0005$
2011	$Cd = 1.4 + 0.0043OCB; R^2 = 0.90/-$
2016	$Cd = 1.6 + 0.0054OCB + 0.52ИЗВ - 0.028ИЗВ^2 - 0.28 \times 10^{-3}OCB ИЗВ; R^2 = 0.99/0.005$
2017	$Cd = 0.42 + 0.0099OCB - 0.25 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.064ИЗВ^2; R^2 = 0.93/0.0025$
2003	$Cr = 49.5 + 2.6OCB - 0.0011OCB^2 + 0.6ИЗВ^2; R^2 = 0.99/0.0005$
2011	$Cr = 53 + 0.12OCB; R^2 = 0.87/-$
2016	$Cr = 61 + 0.069OCB - 0.3 \times 10^{-4}OCB^2 + 6.5ИЗВ - 1.1ИЗВ^2 + 0.0039OCB ИЗВ; R^2 = 0.993/0.025$
2017	$Cr = 8.8 + 0.14OCB - 0.35 \times 10^{-4}OCB^2 + 10ИЗВ; R^2 = 0.89/0.01$
2011	$Cu = 37 + 0.09OCB; R^2 = 0.93/0.10$
2016	$Cu = 48 + 0.074OCB - 0.23 \times 10^{-4}OCB^2 + 4.2ИЗВ - 0.79ИЗВ^2 + 0.0034OCB ИЗВ; R^2 = 0.999/0.005$
2017	$Cu = 17 + 0.11OCB - 0.29 \times 10^{-4}OCB^2 + 0.45ИЗВ^2; R^2 = 0.91/0.005$
2003	$Zn = 0.61 + 1.5OCB - 0.69 \times 10^{-3}OCB^2; R^2 = 0.95/0.0005$
2011	$Zn = 53 + 0.0053OCB; R^2 = 0.94/0.10$
2016	$Zn = 108 + 0.074OCB - 0.31 \times 10^{-4}OCB^2 + 7.6ИЗВ - 1.1ИЗВ^2 + 0.0043OCB ИЗВ; R^2 = 0.996/0.025$
2017	$Zn = 68 + 0.15OCB + 11ИЗВ; R^2 = 0.91/0.0025$
2011	$Pb = 10.6 + 0.011OCB; R^2 = 0.95/0.10$
2016	$Pb = 11.8 + 0.007OCB - 0.17 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.15ИЗВ; R^2 = 0.98/0.0025$
2017	$Pb = 7.5 + 0.0077OCB + 0.93ИЗВ; R^2 = 0.75/0.05$
2003	$Ni = -24 + 0.37OCB - 0.00015OCB^2 + 0.3ИЗВ^2; R^2 = 0.99/0.0005$
2011	$Ni = 13.7 + 0.03OCB; R^2 = 0.91/-$
2016	$Ni = 3.6 + 0.011OCB + 0.42 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.051ИЗВ^2 - 0.8 \times 10^{-3}OCB ИЗВ; R^2 = 0.9985/0.0005$
2017	$Ni = 1.8 + 0.025OCB - 0.63 \times 10^{-5}OCB^2 + 2.3ИЗВ; R^2 = 0.91/0.005$
2017	$Mn = 303 + 0.12OCB + 3.6ИЗВ^2; R^2 = 0.56/-$
2017	$As = 37 - 0.33ИЗВ^2; R^2 = 0.39/-$
2017	$Co = 2.0 + 0.67 \times 10^{-3}OCB + 0.3ИЗВ; R^2 = 0.69/0.10$
2017	$Se = 6.8 - 0.011OCB + 0.62 \times 10^{-5}OCB^2; R^2 = 0.45/-$

ченного диапазона доз, а влияние доз извести распространилось и на подпахотный слой почвы.

Содержание валового Pb также возрастало с ростом доз OCB и извести.

Содержание валового Ni возрастало с ростом доз OCB (в том числе в подпахотном слое) и доз извести, кроме 2016 г., когда влияние извести проходило через минимум, что вероятно было связано (как и для Cd) с обобщением неполного набора вариантов опыта.

Изменение валовых содержаний Mn и As в пахотном слое было незначимым, а содержание Co слабозначимо возрастало с увеличением доз OCB и извести.

Для кислоторастворимых форм ТМ наблюдали рост их содержания с увеличением доз OCB, а влияние извести было слабым и отрицательным, кроме Mn (табл. 11). Так как эта форма составляла в данном опыте значительную долю от валового содержания, то и влияние доз мелиорантов было аналогичным с влиянием на валовые содержания. Более подробное сопоставление оказалось в этом случае невозможным, т.к. не совпадали годы изучения этих 2-х форм ТМ.

Для форм ТМ, извлекаемых ацетатным буфером (табл. 12), информации значительно больше, и она может быть сопоставлена с валовыми содержаниями. Благодаря этому удалось получить 2 типа уравнений регрессии: А) только от факто-

Таблица 10. Результаты РА валового содержания ТМ в подпахотном слое почвы (20–40 см)

Год	Уравнение регрессии
2003	$Cd = -4.8 + 0.042OCB - 0.20 \times 10^{-4}OCB^2;$ $R^2 = 0.83/0.025$
2003	$Cr = -138 + 1.7OCB - 0.65 \times 10^{-3}OCB^2;$ $R^2 = 0.71/0.10$
2003	$Zn = 63 + 0.31OCB - 0.15 \times 10^{-3}OCB^2 + 0.39ИЗв^2;$ $R^2 = 0.89/0.01$
2003	$Ni = -5.1 + 0.14OCB - 0.73 \times 10^{-4}OCB^2;$ $R^2 = 0.90/0.0025$

Таблица 11. Результаты РА содержания кислоторастворимых форм ТМ в пахотном слое почвы (0–20 см)

Год	Уравнение регрессии
1 М HNO ₃	
2014	$Cd = 1.6 + 0.0038OCB; R^2 = 0.84/0.01$
2014	$Cu = 9.8 + 0.04OCB; R^2 = 0.90/0.001$
2014	$Zn = 57 + 0.11OCB - 0.22 \times 10^{-4}OCB^2 -$ $- 11ИЗв + 0.82ИЗв^2; R^2 = 0.98/0.0005$
2014	$Pb = 3.4 + 0.01OCB - 0.35 \times 10^{-5}OCB^2 -$ $- 0.19ИЗв; R^2 = 0.94/0.001$
2014	$Ni = 4.8 + 0.012OCB; R^2 = 0.84/0.01$
2014	$Mn = 98 + 0.1OCB - 0.29 \times 10^{-4}OCB^2 +$ $+ 14ИЗв - 0.89ИЗв^2; R^2 = 0.97/0.0005$
1 М HCl	
2017	$Cu = 56 + 0.061OCB - 2.25ИЗв; R^2 = 0.998/0.10$
2018	$Cu = 78 + 0.0425OCB - 5.3ИЗв; R^2 = 0.97/-$

ров опыта, Б) от факторов опыта плюс валовое содержание соответствующего элемента в данном году. Несмотря на высокую корреляцию валовых содержаний с дозами мелиорантов (табл. 7–10), в уравнениях типа Б почти всегда совместно присутствовали и дозы мелиорантов и валовые содержания. В то же время это совместное присутствие (в отличие от уравнений типа А не позволило анализировать данные уравнения обычными математическими методами для определения положений максимумов и минимумов. Подобные ситуации встречаются и в других экспериментальных выборках [11]. Для уравнений типа А в большинстве случаев эта форма ТМ возрастала с увеличением доз мелиорантов, но для Cu и Ni закономерность была неоднозначной по годам.

Для количественного анализа сходства и различия вариантов опыта по совокупности лет ока-

зались пригодными только данные содержаний кислоторастворимой и подвижной (ААБ) меди. Для остальных элементов удалось оценить только различия вариантов (по сопряженному *t*-критерию). Найденные средние разности (между вариантами с меньшим и большим номером) для валовых содержаний 6-ти элементов показаны в табл. 13. При этом только для Pb и Cu имелись значимые средние разности (т.е. отличные от нуля), в остальных случаях полученные результаты отражают лишь возможные тенденции. Незначимость средних разностей, как известно, может быть обусловлена как большим разбросом отдельных разностей (для конкретных лет), так и малым числом лет (3–4), подходящих для сравнения опытных данных анализируемого опыта.

Наиболее полно представлены средние разности с контрольным вариантом. На их примере можно проследить, где происходило возрастание средней разности с ростом доз мелиорантов, а где – остановка роста. Подробнее об этом сказано ниже. Для валовых Pb и Cu средние разности хоть и были значимыми, но их маловато для выявления закономерностей.

Представим теперь средние разности валовых содержаний между контролем и остальными вариантами в зависимости от градаций факторов опыта (табл. 14). Напомним, что для Cd, Cr, Zn, Ni эти средние разности незначимы, для Cu – значимы, а для Pb – в основном значимы. Это отличает ежегодные регрессионные зависимости от факторов опыта, которые почти все значимы (табл. 9–10). Другими словами, в данном случае многолетнее рассмотрение не сводится к сумме однолетних. Как отмечено выше, в этом случае могли играть роль и недостаточная сопоставимость аналитических методов и лабораторий, использованных в разные годы, а также малое число сопоставимых лет (3–4 года). Тем не менее, в большинстве случаев найдено, что рост доз OCB вел к повышению содержания ТМ в почве, а рост доз извести влиял не столь однозначно.

Рассмотрение кислоторастворимых и подвижных (ААБ) форм ТМ в многолетнем плане оказалось возможным только для меди (табл. 15). В этом случае удалось оценить и уровни сходства вариантов (в диапазоне от 0 до 100) и соответствующие средние разности. Интересно отметить, что для кислоторастворимой формы Cu (как и для валового содержания) имеется достаточно много значимых средних разностей между вариантами, а для подвижной формы их не было, т.е. последняя форма была менее чувствительна к действию факторов опыта. Возможно, в этом случае имелись большие аналитические ошибки, что требу-

Таблица 12. Результаты РА содержания ТМ, растворимых в ААБ, в пахотном (0–20 см) и подпахотном (20–40 см) слоях почвы

Год	Уравнение регрессии
Пахотный слой	
2003	А) $Cd = -1.4 + 0.015OCB - 0.64 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.275ИЗВ; R^2 = 0.73/0.10$
2003	Б) $Cd = -4.6 + 0.66 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.8Cd_{вал} - 0.02Cd_{вал}^2 + 0.014ИЗВ Cd_{вал}; R^2 = 0.83/0.05$
2016	А) $Cd = 0.77 + 0.0038OCB - 0.11 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.082ИЗВ - 0.89 \times 10^{-4}OCB ИЗВ; R^2 = 0.992/0.005$
2016	Б) $Cd = 0.66 + 0.002OCB - 0.11 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.17ИЗВ - 0.015ИЗВ^2 + 0.022Cd_{вал}^2 + 0.0076ИЗВ Cd_{вал}; R^2 = 0.9998/0.05$
2003	А) $Cr = -0.56 + 0.0051OCB - 0.31 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.15ИЗВ; R^2 = 0.79/0.05$
2003	Б) $Cr = 0.68 - 0.0021OCB - 0.094ИЗВ + 0.0014Cr_{вал} + 0.22 \times 10^{-3}ИЗВ Cr_{вал}; R^2 = 0.91/0.01$
2016	А) $Cr = 0.25 + 0.595 \times 10^{-3}OCB - 0.18 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.073ИЗВ - 0.0045ИЗВ^2 - 0.18 \times 10^{-4}OCB ИЗВ; R^2 = 0.99/0.05$
2016	Б) $Cr = 0.38 + 0.001OCB - 0.35 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.1ИЗВ - 0.01ИЗВ^2 - 0.35 \times 10^{-4}Cr_{вал}^2; R^2 = 0.992/0.05$
2016	А) $Cu = 0.97 + 0.0012OCB + 0.18ИЗВ - 0.021ИЗВ^2 + 0.57 \times 10^{-4}OCB ИЗВ; R^2 = 0.98/0.01$
2016	Б) $Cu = 1.0 + 0.0018OCB - 0.38 \times 10^{-6}OCB^2 - 0.0095ИЗВ^2 + 0.0011ИЗВ Cu_{вал}; R^2 = 0.990/0.01$
2017	А) $Cu = 5.5 + 0.0069OCB - 0.16ИЗВ; R^2 = 0.9998/0.025$
2017	Б) $Cu = 3.7 + 0.84 \times 10^{-3}Cu_{вал}^2 - 0.0062ИЗВ Cu_{вал}; R^2 = 0.94/-$
2018	А) $Cu = 17 + 0.013OCB - 1.2ИЗВ; R^2 = 0.96/-$
2003	А) $Zn = -22 + 0.33OCB - 0.14 \times 10^{-3}OCB^2; R^2 = 0.90/0.0025$
2003	Б) $Zn = 32 - 22ИЗВ + 1.8ИЗВ^2 + 0.24Zn_{вал}; R^2 = 0.98/0.0005$
2016	А) $Zn = 3.7 + 0.0055OCB - 0.19 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.51ИЗВ - 0.068ИЗВ^2 + 0.28 \times 10^{-3}OCB ИЗВ; R^2 = 0.992/0.05$
2016	Б) $Zn = 0.65 + 0.17 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.086ИЗВ + 0.26 \times 10^{-3}Zn_{вал}^2; R^2 = 0.997/0.0005$
2003	А) $Ni = -2.2 + 0.02OCB - 1.85ИЗВ + 0.21ИЗВ^2; R^2 = 0.96/0.0005$
2003	Б) $Ni = -0.91 - 0.073OCB + 0.59 \times 10^{-4}OCB^2 - 3.5ИЗВ + 0.23ИЗВ^2 + 0.55Ni_{вал} - 0.002Ni_{вал}^2 + 0.012ИЗВ Ni_{вал}; R^2 = 0.992/0.0025$
2016	А) $Ni = 0.4 + 0.0011OCB + 0.48 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.005ИЗВ^2 - 0.72 \times 10^{-4}OCB ИЗВ; R^2 = 0.999/0.0005$
2016	Б) $Ni = 0.01 - 0.0014ИЗВ^2 + 0.105Ni_{вал} + 0.0016ИЗВ Ni_{вал}; R^2 = 0.9999/0.0005$
2016	А) $Pb = 1.16 + 0.0011OCB - 0.24 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.48ИЗВ - 0.041ИЗВ^2 + 0.83 \times 10^{-5}OCB ИЗВ; R^2 = 0.9999/0.0005$
2016	Б) $Pb = 1.1 + 0.0011OCB - 0.23 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.45ИЗВ - 0.042ИЗВ^2 + 0.26 \times 10^{-3}Pb_{вал}^2 + 0.0017ИЗВ Pb_{вал}; R^2 = 1.0/0.0025$
Подпахотный слой	
2003	А) $Cd = -1.1 + 0.0099OCB - 0.41 \times 10^{-5}OCB^2; R^2 = 0.70/0.10$
2003	Б) $Cd = 0.30 + 0.01Cd_{вал}^2 + 0.014ИЗВ Cd_{вал}; R^2 = 0.95/0.0005$
2003	А) $Cr = -0.43 + 0.0035OCB - 0.16 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.0094ИЗВ^2; R^2 = 0.85/0.025$
2003	Б) $Cr = -0.33 + 0.0016OCB + 0.19ИЗВ - 0.02ИЗВ^2 - 0.17 \times 10^{-5}Cr_{вал}^2 + 0.33 \times 10^{-3}ИЗВ Cr_{вал}; R^2 = 0.98/0.0005$
2003	А) $Zn = 2.0 + 0.033OCB; R^2 = 0.71/0.05$
2003	Б) $Zn = -39 + 0.97 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.43ИЗВ^2 + 0.39Zn_{вал} - 0.03ИЗВ Zn_{вал}; R^2 = 0.81/0.10$
2003	А) $Ni = 0.31 + 0.0042OCB; R^2 = 0.70/0.05$
2003	Б) $Ni = -5.5 + 0.19 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.41Ni_{вал} - 0.0047Ni_{вал}^2; R^2 = 0.87/0.025$

Таблица 13. Средние разности валовых содержаний ТМ в пахотном слое почвы для группы годов исследования

		Кадмий валовой											
		Варианты											
		1(К**)	2	3	4	5	7	8	9	11	12	13	
Варианты	1 (К)	X	-38	-4.6	-13	-15	-6.8	-13	-14	-7.8	-14	-20	
	2	-140	X		-8.8					-4.0	-9.7	-16	
	3	-210		X		-11							
	4	-430	-290		X					+4.8	-0.8	-7.2	
	5	-450		-240		X							
	7	-280					X						
	8	-490						X					
	9	-490							X				
	11	-310	-170		+120					X	-5.7	-12	
	12	-460	-320		-34					-150	X	-6.3	
	13	-600	-460		-170					-290	-140	X	
			Хром валовой										
			Цинк валовой										
		варианты											
		1(К)	2	3	4	5	7	8	9	11	12	13	
Варианты	1 (К)	X	-74	-75	-300	-270	-130	-330	-320	-130	-260	-380	
	2	-12	X		-220					-60	-180	-310	
	3	-17		X		-200							
	4	-52	-40		X					+160	+44	-80	
	5	-69		-51		X							
	7	-27					X						
	8	-62						X					
	9	-72							X				
	11	-33	-21		+19					X	-120	-250	
	12	-64	-52		-12					-31	X	-120	
	13	-90	-78		-39					-57	-26	X	
			Никель валовой										
			Свинец валовой										
		Варианты											
		1	3	5	9	13							
Варианты	1	X	-3.1 ⁺	-12*	-14 ⁺	-3.4							
	3	-28 ⁺	X	-9.1*									
	5	-110 ⁺	-79*	X									
	9	-110 ⁺			X								
	13					X							
		Медь валовая											

Примечания. 1. Треугольник выше диагонали X – средние разности вариантов для одного элемента, треугольник ниже диагонали X – для другого элемента. Пропуск – отсутствие возможности расчета средней разности. 2. Индекс ⁺ означает значимость средней разности, индекс * – слабую значимость (0.10).

**К – контроль.

Таблица 14. Зависимость средней разности многолетних динамик (между контролем и другими вариантами) валовых содержаний ТМ в пахотном слое почвы от градаций факторов опыта

Cd					
Градации ОСВ					
		1	2	3	4
Градации извести	1	-3.8	-4.6	-13	-15
	2		-6.8	-13	
	3		-7.8	-14	-20
Cr					
Градации ОСВ					
		1	2	3	4
Градации извести	1	-140	-210	-430	-450
	2		-280	-490	
	3		-310	-460	-600
Cu					
Градации ОСВ					
		1	2	3	4
Градации извести	1		-28 ⁺		-110 ⁺
	2				-110 ⁺
	3				
Ni					
Градации ОСВ					
		1	2	3	4
Градации извести	1	-12	-17	-52	-69
	2		-27	-62	
	3		-33	-64	-90
Zn					
Градации ОСВ					
		1	2	3	4
Градации извести	1	-74	-75	-300	-270
	2		-130	-330	-320
	3		-130	-260	-380
Pb					
Градации ОСВ					
		1	2	3	4
Градации извести	1		-3.1 ⁺		-12 [*]
	2				-14 ⁺
	3				-3.4

Примечание. Индексом ⁺ обозначены значимые средние разности, индексом * – слабозначимые (0.10), остальные разности незначимы. В пропущенных местах расчет средних разностей был невозможен. То же в табл. 15.

Таблица 15. Медь кислоторастворимая и подвижная в пахотном слое почвы. Уровни сходства между вариантами (верхние правые треугольники), средние разности между вариантами (нижние левые треугольники) и зависимость средних разностей контроля с вариантами от градаций факторов опыта по многолетним данным

		Cu кислоторастворимая				
		Варианты				
		1	2	5	10	13
Варианты	1	X	62	16	95	26
	2	-26	X	26	72	46
	5	-	-62 ⁺	X	19	70
	10	-8.6	+18	+79 ⁺	X	32
	13	-66 [*]	-40 [*]	+22 ⁺	-57 ⁺	X
		Cu (ААБ рН 4.8)				
		Варианты				
		1	2	5	13	
Варианты	1	X	62	19	21	
	2	-5.6	X	35	41	
	5	-13	-7.8	X	96	
	13	-12	-6.4	+1.4	X	
		Cu кислоторастворимая				
		Градации ОСВ				
		1	2	3	4	
Градации извести	1	-26				-88 [*]
	2					
	3	-8.6				-66 [*]
		Cu (ААБ рН 4.8)				
		Градации ОСВ				
		1	2	3	4	
Градации извести	1	-5.6				-13
	2					
	3					-12

ет дополнительных исследований. В целом для этих показателей были более сходными между собой варианты с одинаковыми или близкими дозами ОСВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, несмотря на длительность проведения полевого опыта с внесением ОСВ и доломитовой муки в качестве мелиорантов в пахотный слой дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы, отбор образцов для многолетнего сравнения вариантов опыта по содержанию тяжелых металлов (ТМ) в почве оказался недостаточным, несистемным. Поэтому сравнения удалось

провести лишь на основе 3–4 лет. Этого явно недостаточно, учитывая невысокую сопоставимость аналитических лабораторий и точность самих анализов. В результате, если в отдельные годы получены четкие значимые зависимости содержания ТМ в почве от доз мелиорантов, то в многолетнем плане в основном можно говорить лишь о тенденциях.

С точки зрения загрязнения пахотного слоя почвы найдено, что валовое содержание Cd, Zn, As больше ОДК для всех вариантов опыта (включая контроль); то же для Cu для всех вариантов, кроме контроля, и для Ni при максимальных дозах внесения ОСВ. Загрязнение почвы в контроле было обусловлено латеральным переносом.

Большая доля от валовых содержаний Cd и Cu извлекалась однонормальными кислотами. Содержание подвижной меди (ААБ рН 4.8) (по сравнению с кислоторастворимой) слабо реагировало на внесение мелиорантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид А.С. Рекомендации к анализу данных многолетних полевых опытов (проект) / *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 81–93. <https://doi.org/10.31857/S0002188122030048>
2. Реестр аттестатов длительных опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами Российской Федерации. Изд. 2-е. М.: ВНИИА, 2005. С. 130–131.
3. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние систематического применения осадков городских сточных вод на агроэкологические и физические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы // “75 лет Геосети опытов с удобрениями” Мат-лы Всерос. совещ. научн. учреждений-участников геосети опытов с удобрениями. М.: ВНИИА, 2016. С. 108–113.
4. Касатиков В.А., Шабардина Н.П., Раскатов В.А. Последствие систематического применения осадка городских сточных вод по фону известкования на агробиологические и экологические свойства дерново-подзолистой почвы // *Плодородие*. 2017. № 1. С. 43–46.
5. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние систематического применения осадка городских сточных вод, известкования на агроэкологические свойства почвы, урожайность зерновых культур и их макроэлементный состав в длительном опыте // *Почвовед. и агрохим.* 2018, № 1(60). С. 155–161.
6. Касатиков В.А., Анисимова Т.Ю., Шабардина Н.П. К вопросу о мелиоративном влиянии систематического применения осадка городских сточных вод на агроэкологические свойства слабокультуренной дерново-подзолистой почвы // *Мелиорация*. 2018. № 3(85). С. 78–84.
7. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Действие систематического применения осадка городских сточных вод на агроэкологические свойства почвы, урожайность культур в длительном опыте // “Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг.” Мат-лы Всерос. коорд. совещ. научн. учреждений-участников географич. сети опытов с удобрениями / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2018. С. 107–116.
8. Касатиков В.А., Шабардина Н.П., Раскатов В.А. Агроэкологическая оценка применения осадка городских сточных вод в длительном полевом опыте // *Плодородие*. 2018. № 5. С. 46–49. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.104.14>
9. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние торфо-гуминового удобрения на фоне последствия мелиоративных доз осадка сточных вод на агроэкологические показатели агроценоза и продуктивность культур звена севооборота // “Биологический круговорот питательных веществ при использовании удобрений и биоресурсов в системах земледелия различной интенсификации”. Суздаль–Иваново, 2021. С. 179–184.
10. Фрид А.С. Международный анализ почвенных и растительных образцов. Межлабораторная метрологическая характеристика // *Агрохимия*. 2006. № 7. С. 49–62.
11. Фрид А.С. Международный анализ почвенных образцов. Связи между показателями химического состава почв // *Агрохимия*. 2006. № 12. С. 54–60.

Effect of Long-Term Use of Sewage Sludge and Lime on the Gross Content and Concentration of Mobile Forms of Heavy Metals in Sandy Loam Sod-Podzolic Soil

A. S. Frid^{a,#}, V. A. Kasatnikov^b, T. I. Borisochkina^c, K. A. Kolchanova^c, and N. S. Nikitina^c

^aAll-Russian Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, vlad. 5, Moscow region, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia

^bAll-Russian Research Institute of Organic Fertilizers – branch of the Upper Volga FASC
ul. Pryanishnikova 2, Vladimir region, Sudogodsky district, d. Vyatkinno 601390, Russia

^cFederal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Institute”
Pyzhevsky p. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia

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

The long-term dynamics of the gross content and concentration of mobile forms of heavy metals (TM) in the soil of a microfield experiment laid in 1984 on sod-podzolic gleevate sandy loam soil on moraine loam (Vladimir region) is considered. Various large doses of municipal sewage sludge (*MSS*) and lime (dolomite flour) were introduced as meliorants. Despite the duration of the field experiment, sampling to compare the variants of the experiment on the content of TM in the soil turned out to be insufficiently systematic. Therefore, comparisons were made only on the basis of 3–4 years, and with insufficient comparability of analytical data. As a result, if in some years a significant dependence of the TM content in the soil on the doses of meliorants was obtained, then in the long-term plan, basically we can only talk about trends. From the point of view of contamination of the arable soil layer, it was found that the gross content of Cd, Zn, As was greater than the standard of approximate permissible concentration (APC) in all variants of the experiment (including control); the same is shown for Cu in all variants except control, and for Ni at maximum doses of *MSS*. Soil contamination in the control appears to be associated with lateral transport. Most of the total Cd and Cu content was extracted with mononormal acids. The content of mobile copper (AAB pH 4.8) (compared with acid-soluble) reacted poorly to the introduction of ameliorants.

Key words: long-term field experience, urban sewage sludge, liming, heavy metals, dynamics of heavy metals in soil, sod-podzolic sandy loam soil