

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской области

А. А. Уткин

3

Изучение показателей почвенного плодородия окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы на разных стадиях формирования природных экосистем

А. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев, В. М. Буре

14

Удобрения

Влияние удобрений на урожайность пшеницы и качество зерна в зернопаровом севообороте в центральной зоне Курганской области

О. В. Волынкина, Е. В. Кириллова

28

Регуляторы роста растений

Связь удлинения корня растений ячменя с АБК-зависимым транспортом цитокининов из корней в побеги при сверхоптимальных концентрациях нитратов и фосфатов

Л. Н. Тимергалина, Л. Б. Высоцкая

34

Влияние регуляторов роста растений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы на фоне ранневесенней азотной подкормки

Э. С. Давидяни

45

Ростовые показатели и метаболизм прорастающих семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в зависимости от дозы экстракта из отработанного соломенного субстрата вешенки (*Pleurotus ostreatus*)

С. С. Тарасов, Е. В. Михалёв, Е. К. Крутова, И. А. Шестеркина

51

Пестициды

Биологически и экономически эффективные системы защиты сахарной свеклы отечественной и иностранной селекции в ЦЧР

О. В. Гамуев, В. М. Вилков, О. А. Минакова

61

Влияние 3-амино-1,2,4-триазола на особенности развития возбудителя мучнистой росы на растениях мягкой пшеницы

Г. А. Аветисян, Т. В. Аветисян

70

Экотоксикология

Влияние различных солей на вертикальную миграцию ⁹⁰Sr в серой лесной почве

В. Г. Граковский, А. С. Фрид

75

Влияние выбросов Астраханского газового комплекса на качество почв прилегающей территории

А. М. Гребенников

88

Contents

No. 6, 2022

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Loamy Soils of the Vladimir Region

A. A. Utkin

3

Study of Indicators of Soil Fertility of Cultivated Sod-Podzolic Sandy Soil at Different Stages of Formation of Natural Ecosystems

A. V. Litvinovich, O. Y. Pavlova, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure

14

Fertilizers

Effect of Fertilizers on Wheat Yield and Grain Quality in a Cereal Fallow Rotation in the Central Zone of Kurgan Oblast

O. V. Volynkina, E. V. Kirillova

28

Plant Growth Regulators

Effect of Supra-Optimal Nitrates and Phosphates Concentrations on the Process of Barley Roots Elongation Associated with the ABA-Dependent Transport of Cytokinins from the Roots

L. N. Timergalina, L. B. Vysotskaya

34

Influence of Plant Growth Regulators on the Yield and Grain Quality of Winter Wheat against the Background of Early Spring Nitrogen Fertilization

E. S. Davidyants

45

Growth Indicators and Metabolism of Germinating Seeds of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Depending on the Dose of the Extract from Substrate after Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus*) Cultivation

S. S. Tarasov, E. V. Mikhalev, E. K. Krutova, I. A. Shesterkina

51

Pesticides

Biologically and Economic Effective Protection Systems of Domestic and Foreign Sugar Beet in the Central-Chernozem Region

O. V. Gamuev, V. M. Vilkov, O. A. Minakova

61

Influence of 3-Amino-1,2,4-triazole on Features of Powdery Mildew Development on Soft Wheat

G. A. Avetisyan, T. V. Avetisyan

70

Ecotoxicology

Effect of Various Salts on the Vertical Migration of ⁹⁰Sr in Gray Forest Soil

V. G. Grakovsky, A. S. Frid

75

Impact of Emissions from the Astrakhan Gas Complex on the Quality of the Soils of the Adjacent Territory

A. M. Grebennikov

78

ПЛОДОРОДИЕ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РЕПЕРНЫХ УЧАСТКОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2022 г. А. А. Уткин

*Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева
153012 Иваново, ул. Советская, 45, Россия*

E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 17.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Представлены результаты многолетних агрохимических и экотоксикологических исследований реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв сельскохозяйственного назначения Владимирской обл., которые проводили для установления уровня плодородия по основным агрохимическим показателям, содержанию микроэлементов и серы, экотоксикологического состояния — по содержанию валовых и подвижных форм тяжелых металлов. Установлено ухудшение таких показателей плодородия почв как обеспеченность органическим веществом, подвижными формами фосфора и калия, обменными основаниями кальция, магния, увеличения обменной и гидролитической кислотности. Произведена оценка плодородия почв по расчету почвенно-экологического индекса. Определена обеспеченность почв бором, молибденом, медью и подвижной серой. Концентрации валовых и подвижных форм тяжелых металлов в обследованных почвах не превышали допустимых уровней. По содержанию изученных металлов исследованные почвы относятся к слабозагрязненным и не являются опасными для культурных растений и здоровья человека. По коэффициентам корреляции Пирсона установлены особенности влияния свойств почвы на концентрации микроэлементов, серы, валовых и подвижных форм металлов.

Ключевые слова: плодородие, дерново-подзолистая почва, тяжелые металлы, микроэлементы, реперные участки, Владимирская обл.

DOI: 10.31857/S0002188122060126

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в результате недостаточного уровня развития земледелия России отмечается снижение объемов применения минеральных и органических удобрений, что приводит к существенному уменьшению уровня плодородия обрабатываемых почв, выражающееся в ухудшении агрохимических свойств, снижении урожайности сельскохозяйственных культур и качества растительной продукции [1–4].

Эффективное использование земель в агропромышленном производстве невозможно без проведения агрохимического и экотоксикологического обследований почв, которые обеспечивают землепользователя важной информацией, касающейся содержания подвижных форм макро- и микроэлементов питания растений, органического вещества, реакции почвенной среды и др. [5].

Кроме того, в связи с постоянным возрастанием антропогенной нагрузки на почву, вызванной

деятельностью автотранспорта, нерациональным ведением промышленного и сельскохозяйственного производств, остро стоит вопрос изучения экотоксикологического состояния почв по содержанию в них различных загрязняющих веществ, среди которых особое место занимают тяжелые металлы (ТМ). Увеличение химического загрязнения почв металлами обуславливает снижение их самоочищающей способности, повышение токсичности для живых организмов и общего негативного влияния на природную среду [6].

Установлено, что в Нечерноземной зоне России и, в частности, во Владимирской обл. отмечается значительная потеря почвами своего плодородия и постепенный переход в разряд малоплодородных и загрязненных земель, что создает угрозу вывода их из сельскохозяйственного оборота и, как следствие, недополучение необходимой растительной продукции [7–9].

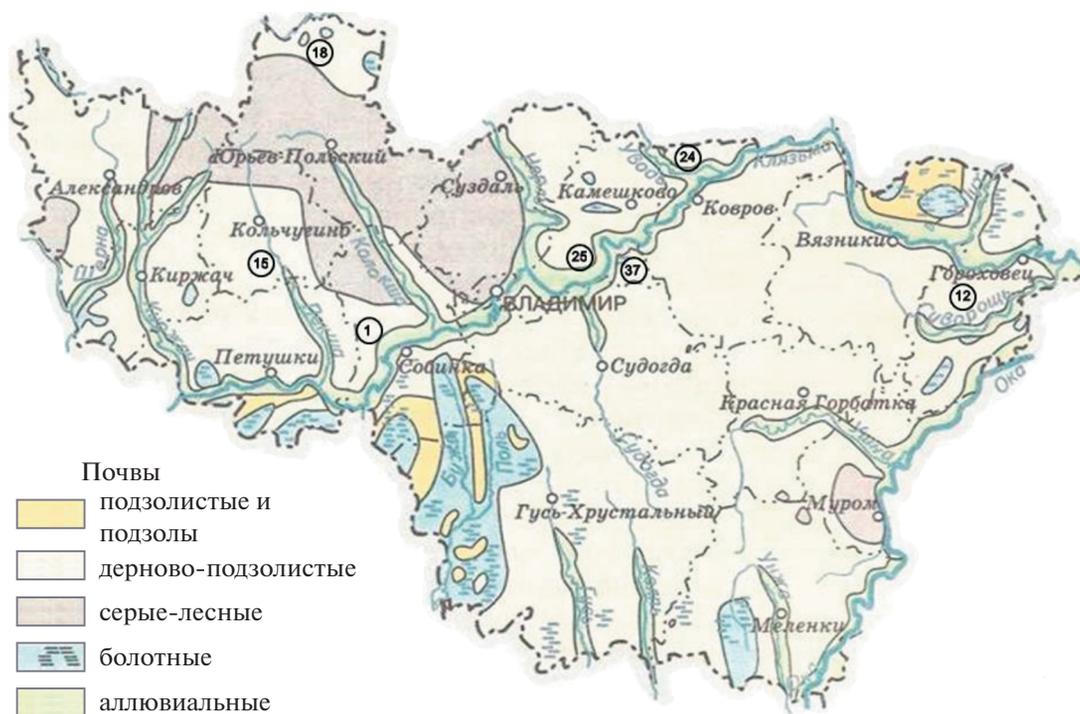


Рис. 1. Почвенная карта Владимирской области: числа – номера реперных участков.

Высокоэффективное ведение сельского хозяйства возможно только при соблюдении правильного подхода к проблемам, связанным с использованием, восстановлением и сохранением плодородия почв. Для обеспечения высоких урожаев культур необходимо регулярно наблюдать за параметрами, связанными с плодородием почв и их экотоксикологическим состоянием.

Современная изменчивость параметров плодородия дерново-подзолистых почв Владимирской обл. и оценка их экотоксикологического состояния на реперных участках в научной литературе слабо освещены и требуют дополнительного изучения, что повышает актуальность проведенного исследования.

Объектом изучения были реперные участки с дерново-подзолистыми суглинистыми почвами. Доля дерново-подзолистых суглинистых почв в сельскохозяйственном фонде почв Владимирской обл. составляет $\approx 40\%$ [10].

Цель работы – оценка существующего уровня плодородия дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской обл. по основным агрохимическим показателям и их экотоксикологического состояния по содержанию валовых и подвижных форм соединений ТМ: свинца (Pb), кадмия (Cd), меди (Cu), никеля (Ni), цинка (Zn), кобальта (Co), хрома (Cr) и марганца (Mn).

Особое внимание к изученным поллютантам вызвано тем, что большинство из них относится к I и II классам химической опасности (ГОСТ 17.4.1.02–83), их соединения обладают высокой токсичностью для многих живых организмов, в т.ч. для культурных растений, животных и человека.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Агрохимическое и экотоксикологическое обследование почв проводили в 1993 и 2019 гг. в соответствии с ежегодным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на 7-ми реперных участках, расположенных во Владимирской обл. (рис. 1), путем закладки почвенных разрезов и отбора образцов почв из пахотного горизонта (0–20 см). Реперные участки располагались на пахотных землях и кормовых естественных угодьях. Преобладающая растительность участков – культурные растения, в редких случаях – злаковое разнотравье. Общая площадь реперных участков с дерново-подзолистыми суглинистыми почвами – 270 га. Почвенно-экологический индекс (ПЭИ) определяли по методике, разработанной в Почвенном институте им. В.В. Докучаева [11].

Физико-химические анализы почв были выполнены согласно следующим методикам: об-

Таблица 1. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистых суглинистых почв реперных участков

Реперный участок, №*	Район	Фракция, %		C _{орг} , %	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH _{KCl}	H _r	Ca	Mg	S	ЕКО	V, %	ПЭИ							
		<0.001	<0.01												мг/кг почвы		мг-экв/100 г почвы				
1	Собинский	15.7	35.8	2.3	582	491	6.7	1.15	7.6	1.4	13.8	14.95	92.31	76.8							
		н/о**	н/о	2.7	609	501	7.1	0.79	8.7	1.7	14.7	15.49	94.90	79.0							
12	Гороховецкий	13.4	28.6	2.6	239	181	5.6	2.41	7.6	2.3	11.8	14.21	83.04	60.2							
		н/о	н/о	3.0	261	189	6.2	1.57	8.8	2.5	12.8	14.37	89.07	67.4							
15	Кольчугинский	25.1	47.6	2.4	210	110	6.3	1.03	9.4	2.3	16.8	17.83	94.22	50.5							
		н/о	н/о	2.7	245	123	6.7	0.76	10.0	2.5	17.5	18.26	95.84	56.6							
18	Юрьев-Польский	15.9	35.8	2.2	186	120	5.4	2.16	6.4	1.4	10.4	12.56	82.80	60.1							
		н/о	н/о	2.6	201	129	5.7	1.32	7.3	1.6	11.3	12.62	89.54	64.6							
24	Ковровский	12.6	22.9	1.5	209	41	6.2	0.70	5.0	1.2	10.6	11.30	93.81	49.0							
		н/о	н/о	1.9	232	49	6.6	0.51	5.7	1.5	12.0	12.51	95.92	55.5							
25	Камешковский	12.8	24.8	2.3	369	139	5.5	2.02	5.1	1.5	8.6	10.62	80.98	56.9							
		н/о	н/о	2.7	387	145	5.9	1.41	6.1	1.7	10.0	11.41	87.64	58.3							
37	Камешковский	13.2	27.8	2.6	352	125	5.8	1.86	5.9	1.1	9.5	11.36	83.63	54.8							
		н/о	н/о	2.9	376	129	6.3	1.27	6.8	1.3	10.5	11.77	89.21	63.5							
	M	15.5	31.9	2.3	307	172	5.9	1.62	6.7	1.6	11.6	13.26	87.25	58.3							
		н/о	н/о	2.6	330	181	6.4	1.09	7.6	1.8	12.7	13.78	91.73	63.6							
	V, %	28.5	26.7	16.4	46.1	85.0	8.1	40.3	23.6	31.0	24.2	19.4	6.7	15.8							
		н/о	н/о	13.4	43.1	81.4	7.6	36.6	20.7	26.2	20.8	17.8	4.0	12.8							
	±m	1.67	3.22	0.14	53.40	55.39	0.18	0.25	0.60	0.19	1.07	0.97	2.22	3.07							
		н/о	н/о	0.13	53.77	55.63	0.18	0.15	0.60	0.18	1.00	0.93	1.38	3.49							

Примечания. 1. M – среднее арифметическое, V, % – коэффициент вариации, ±m – ошибка среднего арифметического. н/о – не определяли. То же в табл. 2–4. 2. Над чертой – 2019 г., под чертой – 1993 г. То же в табл. 2–5.

менная кислотность (pH_{KCl}) – по ГОСТ Р 58594-2019, гидролитическая кислотность (H_r) – по ГОСТ 26212-91, подвижные фосфор (P₂O₅) и калий (K₂O) – по ГОСТ Р 54650-2011 (по Кирсанову в модификации ЦИНАО), обменные основания кальция и магния (Ca и Mg) – по ГОСТ 26487-85, органическое вещество (по Тюрину в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ 26213-91, сумма поглощенных оснований (S) (по Каппену) – по ГОСТ 27821-88, подвижная сера (S_{подв}) (по ЦИНАО) – по ГОСТ 26490-85, подвижный бор (B) (по Бергеру и Труогу в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ Р 50688-94, подвижная медь (Cu_{подв}) (по Пейве и Ринькису в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ Р 50684-94, подвижный молибден (Mo) (по Григгу в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ Р 50689-94, фракции физической глины и ила (по Качинскому) – по [12]. Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почвы основаниями (V) определяли расчетным способом.

Определение в почвах подвижных и валовых форм ТМ проводили в вытяжках ацетатно-аммонийного буфера pH 4.8 (ААБ) и 5.0 н. HNO₃ соот-

ветственно методом атомно-абсорбционной спектроскопии [13–15].

Степень подвижности ТМ в почве рассчитана как соотношение содержания подвижных соединений ТМ и валовой концентрации металла в почве и выражена в %.

Отдельные аналитические данные подвергали математической обработке и корреляционному анализу с расчетом коэффициента линейной корреляции Пирсона с использованием программы Statistica (версия 10).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обменная кислотность дерново-подзолистых суглинистых почв за период наблюдений увеличилась на 0.5 ед. с нейтральной до близкой к нейтральной, т.е. произошло подкисление почв (табл. 1). Вероятно, это явилось результатом снижения объемов известкования почв реперных участков за прошедшие годы.

Известно, что особенности проявления обменной и гидролитической кислотностей тесно

связаны между собой. Подтверждение этому было отмечено в нашем исследовании. В 1993 и 2019 гг. прослежена высокая корреляционная взаимосвязь $r_{H_r/pH_{KCl}} = -0.75$ и -0.84 , при $P = 0.95$ соответственно. Величины гидролитической кислотности исследованных почв реперных участков на протяжении всего периода мониторинга соответствовали преимущественно очень низкой степени кислотности. Средняя величина H_r за последние 26 лет увеличилась на 0.53 мг-экв/100 г почвы или на 48.6% от исходного уровня.

Средняя обеспеченность почв реперных участков органическим веществом на протяжении всего периода наблюдения, согласно существующей градации, преимущественно соответствовала низкому содержанию, при этом среднее содержание $C_{орг}$ в почвах участков снизилось на 0.3% (табл. 1).

Подвижные P_2O_5 и K_2O являются одними из основных элементов питания растений, этим определяется важность изучения этих форм их соединений в почвах. Обеспеченность дерново-подзолистых суглинистых почв участков подвижными P_2O_5 и K_2O широко варьировала от высокой до очень высокой и низкой до очень высокой степени на всем протяжении исследования соответственно. В целом, за весь период наблюдений на реперных участках отмечено выраженное снижение содержания подвижных форм P_2O_5 и K_2O . Наибольшее относительное снижение к уровню 1993 г. выявлено для P_2O_5 – 7.0, наименьшее – для K_2O – 5.0%.

По-видимому, снижение содержания подвижных форм P_2O_5 при отмеченном повышении кислотности почв могло быть связано с частичным переходом доступных соединений фосфора в прочносвязанные фосфаты. Рассчитанные коэффициенты корреляции средней силы взаимосвязи между уровнем pH_{KCl} и обеспеченностью почв P_2O_5 в 2019 и 1993 гг. в определенной мере подтвердили эту закономерность: $r = 0.50$ и 0.54 , $P = 0.95$ соответственно.

На протяжении всего периода наблюдения обеспеченность почв реперных участков обменным Ca соответствовала средней степени, содержание обменного Mg изменялось от средней до повышенной степени обеспеченности. Отметим, что среднее содержание Ca и Mg в почвах участков с 1993 г. снизилось на 11.9 и 11.1% соответственно. Суммарное содержание обменных Ca и Mg за период мониторинга уменьшилось на 1.2 мг-экв/100 г почвы или на 12.6% от исходного уровня.

Средняя доля присутствия обменных Ca и Mg в общем составе поглощенных катионов в 2019 и 1993 гг. составляла 71.8 и 74.9% соответственно, что свидетельствовало о значительной роли Ca и Mg в процессах генезиса и химизма дерново-подзолистых почв. Прослежена тенденция к снижению содержания обменных Ca и Mg предположительно по причине их вымывания из корнеобитаемого слоя вниз по профилю и выноса товарной частью урожая сельскохозяйственных культур.

Средняя обеспеченность почв участков поглощенными основаниями (S) за период наблюдений снизилась на 1.1 мг-экв/100 г почвы или на 8.7%. Отмечено, что степень насыщенности почв основаниями уменьшилась на 4.48% с высокой до повышенной.

Согласно градации распределения глинистых частиц в гранулометрическом составе, среди дерново-подзолистых почв реперных участков преобладают участки почв с легкосуглинистым составом (участки № 12, 24, 25 и 37).

Расчет ПЭИ, как комплекса показателей, позволяет объективно оценить состояние почвы по агрохимическим и физико-химическим свойствам, а также учесть такие факторы почвообразования как климатические условия и рельеф местности, выявлять негативные процессы, которые приводят к деградации и снижению плодородия. Установлено, что в среднем к 2019 г. на реперных участках отмечали снижение показателя ПЭИ на 5.3 балла или на 8.3% к уровню 1993 г.

К возможным причинам снижения показателя ПЭИ можно отнести уменьшение обеспеченности почв подвижными формами P_2O_5 и K_2O , увеличение кислотности почв, что было следствием уменьшения известкования и применения удобрений, содержащих фосфор и калий.

Анализ данных содержания в почвах участков подвижных форм микроэлементов и серы показал следующее (табл. 2).

Бор. Среднее содержание и пределы изменений водорастворимых форм В в изученных дерново-подзолистых почвах согласовались с данными, приведенными в работах [16, 17]. Согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны подвижными формами В и исходя из изменений его содержания в почвах участков, обеспеченность бором варьировала от очень низкой до очень высокой в течение всего периода наблюдения. В среднем, в 1993 и 2019 гг. обеспеченность почв участков подвижным В соответствовала высокой обеспеченности [18].

Молибден. Содержание подвижных форм Мо в исследованных почвах реперных участков согла-

Таблица 2. Концентрации микроэлементов и подвижной серы в почве, мг/кг

Реперный участок, №	Район	В	Cu _{подв}	Mo	S _{подв}
1	Собинский	<u>2.16</u>	<u>11.8</u>	<u>0.095</u>	<u>8.1</u>
		1.99	9.7	0.087	19.3
12	Гороховецкий	<u>0.56</u>	<u>5.0</u>	<u>0.124</u>	<u>3.1</u>
		0.51	3.8	0.114	12.1
15	Кольчугинский	<u>0.90</u>	<u>5.3</u>	<u>0.130</u>	<u>2.1</u>
		0.79	3.9	0.119	5.9
18	Юрьев-Польский	<u>0.78</u>	<u>4.5</u>	<u>0.083</u>	<u>3.9</u>
		0.66	4.0	0.071	7.6
24	Ковровский	<u>0.64</u>	<u>5.0</u>	<u>0.120</u>	<u>4.4</u>
		0.59	4.2	0.122	10.2
25	Камешковский	<u>0.18</u>	<u>9.6</u>	<u>0.135</u>	<u>9.1</u>
		0.11	8.9	0.139	17.9
37	Камешковский	<u>н/о</u>	<u>8.1</u>	<u>0.082</u>	<u>н/о</u>
		н/о	7.0	0.079	н/о
<i>M</i>		<u>0.87</u>	<u>7.0</u>	<u>0.110</u>	<u>5.1</u>
		0.78	5.9	0.104	12.2
<i>V, %</i>		<u>77.9</u>	<u>40.2</u>	<u>20.6</u>	<u>55.2</u>
		82.3	43.3	24.3	44.7
$\pm m$		<u>0.28</u>	<u>1.1</u>	<u>0.009</u>	<u>1.2</u>
		0.26	1.0	0.009	2.2
<i>r</i> (фракция <0.01 мм, %)		<u>0.36</u>	<u>-0.15</u>	<u>0.04</u>	<u>-0.46</u>
		н/о	н/о	н/о	н/о
<i>r</i> (C _{орг} , %)		<u>0.08</u>	<u>0.22</u>	<u>-0.15</u>	<u>-0.04</u>
		0.07	0.21	-0.24	0.20
<i>r</i> (рН _{KCl})		<u>0.78*</u>	<u>0.40</u>	<u>0.02</u>	<u>0.08</u>
		0.76*	0.25	0.03	0.21
<i>r</i> (ЕКО, мг-экв/100 г почвы)		<u>0.48</u>	<u>-0.11</u>	<u>0.19</u>	<u>-0.50</u>
		0.49	-0.23	0.07	-0.32

* Значимые коэффициенты корреляции ($r > \pm 0.70$) при $P = 0.95$. То же в табл. 5.

совалась с пределами его содержания в дерново-подзолистой почве, отмеченными в работе [19]. Согласно градации обеспеченности почв подвижными формами Mo и исходя из изменений его содержания и средних концентраций в почвах участков, обеспеченность молибденом характеризовалась низкой степенью на всем протяжении исследования [18].

Медь. Пределы содержания форм Cu_{подв} в почвах участков значительно превышали пределы содержания, указанные для данной почвы в работе [17]. Обеспеченность почв участков Cu_{подв} варьировала от высокой до очень высокой в 2019 г. и от

средней до очень высокой в 1993 г. В среднем, на протяжении всего периода мониторинга обеспеченность почв участков Cu_{подв} соответствовала очень высокой степени [18].

Серя. Исходя из среднего содержания S_{подв}, исследованные почвы в 2019 г. имели низкий уровень обеспеченности, в 1993 г. — высокий [20]. Общее содержание серы в почве определяется почвообразующими породами и содержанием в них органического вещества. Установлено, что с органическим веществом почвы связано до 70–90% валовых запасов серы. Между содержанием углерода органического вещества и серой в его

составе установлена тесная прямая корреляционная связь линейной зависимости [21]. Ввиду того, что изученные почвы бедны $C_{\text{орг}}$, между содержанием $C_{\text{орг}}$ и $S_{\text{подв}}$ в почвах не было установлено достоверно выраженной корреляционной взаимосвязи: $r = -0.04$ и 0.20 (табл. 2).

Между суммарным содержанием частиц физической глины и ила и подвижным В установлена прямая корреляция средней силы взаимосвязи: $r = 0.36$. Подтверждение выявленной силе и характеру зависимости для дерново-подзолистых суглинистых почв отмечено в работе [22].

Содержание гумуса в почве является специфическим и противоречивым критерием оценки содержания подвижных форм микроэлементов. На факт проявления слабой корреляции между содержанием гумуса и форм микроэлементов, в частности $C_{\text{подв}}$, в дерново-подзолистых почвах указано в работах [22, 23], что полностью подтверждено результатами настоящего исследования.

На высокую корреляцию прямой зависимости между концентрацией подвижного В и $pH_{\text{КСI}}$ почвы в своей работе указывал В.Б. Ильин [24], что не противоречило рассчитанным нами величинам корреляции.

Между содержанием в дерново-подзолистой суглинистой почве $S_{\text{подв}}$ и подвижного В и величиной ЕКО почвы отмечена взаимосвязь средней силы обратной и прямой зависимостей. Отрицательную корреляционную зависимость ЕКО/ $S_{\text{подв}}$ можно объяснить тем, что подвижные соединения серы в виде сульфатов за счет своего отрицательного заряда не могут адсорбироваться на поверхности одноименно заряженных почвенных частиц.

С 1993 г. среднее содержание $S_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистых суглинистых почвах уменьшилось к 2019 г. на 58.2%, что, возможно, могло быть причиной снижения применения серосодержащих удобрений, систематическим ежегодным выносом серы из почвы урожаем и вымыванием сульфатов из пахотного слоя почв участков.

За 26-летний период мониторинга среднее содержание В, Си и Мо в почвах реперных участков увеличилось на 11.5, 18.6 и 5.7%. Это повышение обеспеченности подвижными формами микроэлементов можно связать в основном с поступлением в почвы дополнительных количеств этих элементов от промышленных источников загрязнения и, в меньшей степени, от удобрений.

Данные о загрязненности почв участков ТМ приведены в табл. 3. В настоящее время для минеральных почв по-прежнему не разработаны вели-

чины предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) для многих ТМ, при этом встречающиеся в научной литературе фоновые показатели содержания металлов в почвах сильно меняются в зависимости от различных почвенно-климатических условий их образования, деятельности человека и т.п. Поэтому для оценки содержания ТМ использовали методику, применяемую в геохимии, заключающуюся в сравнении полученных величин валовых концентраций металлов в дерново-подзолистых почвах Владимирской обл. с имеющимися как валовыми и подвижными ПДК, так и с кларками элементов в земной коре [25].

Медь. Средняя обеспеченность и пределы изменений содержания Си в изученной почве во многом подтверждены другими исследованиями, в которых отмечено среднее содержание валовой Си, переходящей в вытяжку 5.0 н. HNO_3 , на уровне 10–15 мг/кг почвы при диапазоне изменений 0.1–47.9 мг/кг [26]. Среднее содержание подвижных форм Си, переходящих в вытяжку ААБ pH 4.8 во многом соответствовало показателям, характерным для почв европейской части России [19].

Цинк. В ряде работ для Zn приведены в основном согласующиеся с нашими средние валовые и подвижные концентрации металла [19], а также пределы содержания (28.0–45.0 мг/кг) в почве [26, 27].

Кадмий. Валовое содержание Cd в пахотных дерново-подзолистых почвах России невелико и меняется в пределах 0.30–2.40 мг/кг при среднем содержании 0.56 мг/кг [28]. Установленные нами средние показатели и пределы изменения содержания валового Cd в дерново-подзолистой почве были значительно меньше. Отмеченные пределы изменений содержания подвижных форм Cd в изученной почве и среднее содержание подвижных форм металла соотносились с данными, указанными в других работах [19, 29].

Свинец. Содержание валового Pb и пределы изменения его содержания в дерново-подзолистых почвах Владимирской обл. имели сходные параметры со средней обеспеченностью валовым Pb на уровне 9.0 мг/кг и с пределами изменений от 2.6 до 43.0 мг Pb/кг исследованной почвы Русской равнины [8].

Никель. Рассчитанные средние показатели содержания Ni в почвах реперных участков Владимирской обл. хорошо укладывались в пределы изменений содержания валовых форм для данных почв России – 6.0–25.0 мг/кг почвы [19, 26, 28]. Средние концентрации подвижных форм Ni за весь период обследования в почвах участков были

Таблица 3. Содержание форм ТМ в почве, мг/кг

Реперный участок, №	Район	Валовые формы, мг/кг								Подвижные формы, мг/кг						
		Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cr
1	Собинский	13.7	98.7	0.20	10.1	12.6	8.9	17.5	205	0.41	0.92	0.13	0.61	0.18	0.48	0.52
		13.2	93.6	0.16	9.3	10.6	8.2	15.8	199	0.32	1.22	0.09	0.54	0.13	0.40	0.43
12	Гороховецкий	10.9	37.2	0.20	13.0	18.0	13.7	11.3	311	0.27	1.73	0.18	0.45	0.19	0.41	0.28
		9.3	32.3	0.17	12.1	16.4	12.6	10.2	297	0.25	1.45	0.12	0.39	0.12	0.32	0.24
15	Кольчугинский	6.2	9.7	0.18	9.3	14.2	11.5	13.5	314	0.51	1.40	0.07	0.49	0.22	0.41	0.42
		5.4	9.5	0.13	8.7	12.3	11.0	11.2	305	0.44	1.21	0.07	0.42	0.27	0.34	0.37
18	Юрьев-Польский	9.3	29.5	0.17	11.7	19.2	7.9	14.4	247	0.28	0.97	0.11	0.54	0.21	0.40	0.48
		6.9	22.8	0.14	10.4	17.5	7.1	12.3	233	0.30	0.76	0.06	0.50	0.23	0.30	0.39
24	Ковровский	4.7	20.4	0.18	9.6	11.8	5.8	5.9	225	0.31	0.85	0.10	0.70	0.21	0.38	0.35
		4.3	18.4	0.12	9.5	10.3	5.1	4.6	214	0.25	0.77	0.10	0.61	0.16	0.31	0.31
25	Камешковский	10.4	23.9	0.21	13.1	17.5	7.6	11.5	93	0.40	1.15	0.15	0.63	0.12	0.39	0.29
		9.8	20.0	0.14	12.3	15.6	6.5	9.8	89	0.32	1.05	0.11	0.57	0.10	0.35	0.23
37	Камешковский	4.5	23.2	0.22	4.3	8.8	5.2	3.2	226	0.27	1.31	0.16	0.44	0.17	0.33	0.20
		4.0	19.2	0.15	3.7	8.4	4.6	2.7	209	0.22	1.22	0.10	0.41	0.14	0.26	0.16
	<i>M</i>	8.5	34.7	0.19	10.2	14.6	8.7	11.0	232	0.35	1.19	0.13	0.55	0.19	0.40	0.36
		7.6	30.8	0.14	9.4	13.0	7.9	9.5	221	0.30	1.10	0.09	0.49	0.16	0.33	0.30
	<i>V, %</i>	40.8	85.0	9.3	29.7	26.1	35.1	44.9	32.2	26.3	26.3	29.6	17.9	18.4	11.2	31.9
		44.6	92.4	11.9	30.5	26.9	37.8	47.2	32.6	24.3	23.2	23.0	17.6	38.0	13.5	32.3
	$\pm m$	1.3	11.1	0.01	1.1	1.4	1.1	1.9	28	0.03	0.12	0.01	0.04	0.01	0.02	0.04
		1.3	10.8	0.01	1.1	1.3	1.1	1.7	27	0.03	0.10	0.01	0.03	0.02	0.02	0.04
	ПДК(ОДК) _{вал/подв}	(132)	(220)	(2)	32	(80)	н/д*	н/д	1500	3	23	н/д	6	4	5	6
	Кларк мировой [25]	55	70	0.2	12.5	75	25	100	950							
	Кларк региональный [32]	8.5	47.3	н/д	14.9	35.7	4.6	84.8	609							

*н/д – нет данных.

примерно в 2 раза меньше средней концентрации (0.39 мг/кг), приведенной в работе [19].

Кобальт. Среднее валовое содержание Co в почвах участков в основном соответствовало среднему валовому содержанию ТМ (10.0 мг/кг) в суглинистой дерново-подзолистой почве [26]. Содержание подвижных форм Co в почвах участков было значительно меньше средних показателей (0.75–3.0 мг/кг) [16].

Хром. Данные по содержанию валового Cr в почвах России весьма разноречивы. Например, установлено, что в суглинистых дерново-подзолистых почвах в среднем его содержится от 70 до 175 мг/кг [30]. Отметим, что изученные почвы реперных участков Владимирской обл. отличались существенно меньшим содержанием валового Cr по сравнению с приведенными выше показателя-

ми. Полученные нами величины содержания подвижного Cr в исследованных почвах также отличались меньшими концентрациями по сравнению с показателями, отмеченными для центрально-европейской части России, где средняя концентрация поллютанта составляет 2.62–2.66 мг/кг [19, 29].

Марганец. Концентрация валовых форм Mn в дерново-подзолистых почвах России изменяется от 270 до 720 мг/кг [31]. В работе [32] установлено фоновое валовое содержание Mn в почвах Владимирской обл. 609 мг/кг с изменениями от 203 до 1040 мг/кг. Полученные нами концентрации валового Mn располагаются вблизи нижней границы этого предела.

На всех реперных участках содержание валовых и подвижных форм изученных ТМ были зна-

Таблица 4. Степени подвижности ТМ в почве, %

Реперный участок, №	Район	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cr
1	Собинский	<u>3.0</u>	<u>0.9</u>	<u>65.0</u>	<u>6.0</u>	<u>1.4</u>	<u>5.4</u>	<u>3.0</u>
		2.4	1.3	56.3	5.8	1.2	4.9	2.7
12	Гороховецкий	<u>2.5</u>	<u>4.7</u>	<u>90.0</u>	<u>3.5</u>	<u>1.1</u>	<u>3.0</u>	<u>2.5</u>
		2.7	4.5	70.6	3.2	0.7	2.5	2.4
15	Кольчугинский	<u>8.2</u>	<u>14.4</u>	<u>38.9</u>	<u>5.3</u>	<u>1.5</u>	<u>3.6</u>	<u>3.1</u>
		8.1	12.7	53.8	4.8	2.2	3.1	3.3
18	Юрьев-Польский	<u>3.0</u>	<u>3.3</u>	<u>64.7</u>	<u>4.6</u>	<u>1.1</u>	<u>5.1</u>	<u>3.3</u>
		4.3	3.3	42.9	4.8	1.3	4.2	3.2
24	Ковровский	<u>6.6</u>	<u>4.2</u>	<u>55.6</u>	<u>7.3</u>	<u>1.8</u>	<u>6.6</u>	<u>5.9</u>
		5.8	4.2	83.3	6.4	1.6	6.1	6.7
25	Камешковский	<u>3.8</u>	<u>4.8</u>	<u>71.4</u>	<u>4.8</u>	<u>0.7</u>	<u>5.1</u>	<u>2.5</u>
		3.3	5.3	78.6	4.6	0.6	5.4	2.3
37	Камешковский	<u>6.0</u>	<u>5.6</u>	<u>72.7</u>	<u>10.2</u>	<u>1.9</u>	<u>6.3</u>	<u>6.3</u>
		5.5	6.4	66.7	11.1	1.7	5.7	5.9
	<i>M</i>	<u>4.7</u>	<u>5.4</u>	<u>65.5</u>	<u>6.0</u>	<u>1.4</u>	<u>5.0</u>	<u>3.8</u>
		4.6	5.4	64.6	5.8	1.3	4.5	3.8
	<i>V, %</i>	<u>46.5</u>	<u>78.5</u>	<u>24.1</u>	<u>37.4</u>	<u>32.3</u>	<u>26.4</u>	<u>42.0</u>
		44.5	67.1	22.3	43.3	40.6	29.3	47.1
	$\pm m$	<u>0.8</u>	<u>1.6</u>	<u>6.0</u>	<u>0.8</u>	<u>0.2</u>	<u>0.5</u>	<u>0.6</u>
		0.8	1.4	5.4	1.0	0.2	0.5	0.7

Таблица 5. Коэффициенты линейной корреляции между свойствами почвы и формами содержания ТМ

Свойства почвы	Cu		Zn		Cd		Pb		Ni		Co		Cr		Mn	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Фракция <0.01 мм, %	<u>0.02</u>	<u>0.70*</u>	<u>-0.02</u>	<u>0.17</u>	<u>-0.45</u>	<u>-0.65</u>	<u>-0.07</u>	<u>-0.35</u>	<u>0.09</u>	<u>0.53</u>	<u>0.47</u>	<u>0.38</u>	<u>0.55</u>	<u>0.56</u>	<u>0.54</u>	<u>н/о</u>
	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
$S_{орг}, %$	<u>0.29</u>	<u>0.03</u>	<u>0.10</u>	<u>0.73*</u>	<u>0.54</u>	<u>0.51</u>	<u>-0.10</u>	<u>-0.85*</u>	<u>0.12</u>	<u>-0.29</u>	<u>0.46</u>	<u>-0.01</u>	<u>0.16</u>	<u>-0.27</u>	<u>0.20</u>	<u>н/о</u>
	0.35	0.06	0.15	0.78*	0.78*	0.16	-0.08	-0.77*	0.24	-0.16	0.48	0.01	0.26	-0.29	0.16	н/о
pH_{KCl}	<u>0.06</u>	<u>0.55</u>	<u>0.52</u>	<u>-0.31</u>	<u>-0.07</u>	<u>-0.44</u>	<u>-0.32</u>	<u>0.29</u>	<u>-0.59</u>	<u>0.31</u>	<u>0.01</u>	<u>0.54</u>	<u>0.24</u>	<u>0.47</u>	<u>0.16</u>	<u>н/о</u>
	0.20	0.26	0.57	0.31	0.03	0.01	-0.28	0.08	-0.70*	0.02	0.14	0.52	0.18	0.30	0.25	н/о
$TM_{вал.ф./подв.ф.}$	<u>0.14</u>	<u>-0.29</u>	<u>0.76*</u>	<u>0.31</u>	<u>-0.06</u>	<u>0.50</u>	<u>0.82*</u>	<u>н/о</u>	<u>0.14</u>	<u>0.52</u>	<u>0.18</u>	<u>0.30</u>	<u>0.25</u>	<u>н/о</u>	<u>н/о</u>	<u>н/о</u>
	0.15	0.27	0.41	0.32	0.08	0.37	0.77*	н/о	0.14	0.52	0.18	0.30	0.25	н/о	н/о	

Примечание. В графе 1 – валовое содержание, 2 – содержание подвижных форм.

чительно меньше ПДК и/или ОДК. На отдельных участках отмечено слабое превышение величин мирового и регионального кларков.

Установлено, что с 1993 г. увеличилось среднее содержание валовых форм всех изученных ТМ, причем наибольшее увеличение валового содержания на 34.7% было отмечено для Cd, наименьшее – на 4.9% – для Mn.

На протяжении всего периода мониторинга подвижность ТМ в почвах участков снижалась в

ряду: Cd > Pb > Zn > Co > Cu > Cr > Ni (табл. 4). Полученные показатели степени подвижности ТМ во многом согласовались с другими исследованиями, проведенными на этих почвах [7, 33]. За 26 лет изучения средние показатели степеней подвижности соединений Cd и Co в почве участков слабо увеличились, остальных ТМ – остались прежними.

В своих работах [34, 35] отмечено, что важными факторами, влияющими на уровни concentra-

ций ТМ в почвах, являются количество органического вещества в почве, реакция среды и гранулометрический состав. В нашем исследовании решили выявить взаимосвязь концентраций валовых и подвижных форм изученных ТМ с отдельными агрохимическими свойствами почвы, которую оценивали величинами коэффициентов линейной корреляции Пирсона при $P = 0.95$ (табл. 5).

Судя по рассчитанным величинам коэффициентов, более сильное (при условии, что $r \geq \pm 0.7$) влияние на концентрацию форм ТМ оказывало содержание органического вещества, менее выраженное воздействие оказывало изменение уровня $pH_{КСЛ}$ и содержание глинистых и илестых частиц.

Выявленные корреляционные связи показали, что достоверное поглощение частицами глинистой и илестой фракций было характерно только для подвижной Cu . Валовые и подвижные соединения Cd хуже остальных ТМ адсорбировались на поверхности мелкодисперсных частиц, а соединения Cr , Mn и Co , наоборот, лучше поглощались глинистыми и илестыми частицами.

Судя по рассчитанным коэффициентам корреляции, органическое вещество суглинистой дерново-подзолистой почвы не связывало подвижные соединения Zn и валовые Cd , и наоборот, эффективно участвовало в поглощении подвижных форм соединений Pb .

Нечетко выраженным характером отличалось влияние кислотности почвы на поведение форм изученных ТМ. Отмечено, что повышение обменной кислотности почвы приводило к некоторому увеличению концентраций валовых форм Zn ($r = 0.52-0.57$) и подвижных форм Co ($r = 0.52-0.54$) и более заметному снижению концентрации валовых форм Ni ($r = -0.70$ и $r = -0.59$).

Высокая достоверная взаимосвязь между изменением концентрации валовых и подвижных форм ТМ в почвах отмечена только для Cr ($r = 0.77-0.82$) и для Cd ($r = 0.76$), в остальных случаях изученная взаимосвязь была средней и слабой силы.

Расчет суммарного показателя загрязнения исследованных почв ТМ определяли по формуле: $Z_c = \sum K_{C_i} - (n - 1)$, где n – число анализируемых элементов, K_{C_i} – коэффициент концентрации i -го химического элемента, $K_{C_i} = C_i/C_{Фi}$, где C_i – фактическая валовая концентрация элемента в почве, $C_{Фi}$ – фоновая (кларковая) региональная концентрация [36].

Расчет Z_c показал, что почвы всех реперных участков имели допустимую степень загрязнения

с рассчитанными показателями $Z_c < 16$, следовательно, их можно использовать для возделывания любых культур с обязательным контролем уровня воздействия источников загрязнения почвы и доступности ТМ для культур.

ВЫВОДЫ

1. За период мониторинга реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв по средним величинам агрохимических показателей установлено увеличение обменной и гидролитической кислотности почв, снижение обеспеченности $S_{орг}$, также подвижными формами K_2O и, особенно, P_2O_5 , содержания обменных Ca , Mg и S , также показателей ЕКО и V . Оценка исследованных почв с 1993 по 2019 г. по системе ПЭИ выявила устойчивую тенденцию к его снижению на 5.3 балла.

2. Усредненная обеспеченность почв участков в течение всего периода наблюдения B и Cu соответствовала высокому и очень высокому уровням, Mo – низкому. Для $S_{подв}$ отмечено существенное снижение обеспеченности с высокого уровня в 1993 г., до низкого в 2019 г. За 26-летний период мониторинга в почвах участков отмечено увеличение среднего содержания B , Cu и Mo .

3. Концентрации валовых и подвижных форм изученных ТМ, за исключением Cr , подвижных форм Cd и Co , в почвах участков в основном соответствовали наиболее типичным показателям для данного типа почв России.

4. На всех реперных участках концентрации валовых и подвижных форм изученных ТМ были значительно меньше ПДК или ОДК. В почвах отдельных участков отмечено незначительное превышение мирового и регионального кларков.

5. За период наблюдений подвижность соединений Cd и Co слабо возросла, для остальных ТМ – осталась прежней. Наибольшей подвижностью из ТМ отличалось поведение Cd , наименьшей – Ni .

6. С 1993 г. в почвах участков увеличилось среднее содержание валовых и подвижных форм всех изученных ТМ.

7. Наиболее сильное влияние на содержание форм ТМ оказывало содержание в почве $S_{орг}$ и менее выраженное влияние – содержание частиц физической глины и величина $pH_{КСЛ}$.

8. Оценка почв по суммарному показателю загрязнения их ТМ показала, что почвы всех участков имели допустимую степень загрязнения ($Z_c < 16$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
2. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // *Почвоведение*. 2019. № 9. С. 1130–1139.
3. *Уткин А.А.* Химия минеральных удобрений: уч. пособ. Иваново: ИГСХА, 2021. 91 с.
4. *Уткин А.А.* Эффективное применение органических удобрений в сельскохозяйственном производстве: уч. пособ. Иваново: ИГСХА, 2022. 81 с.
5. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Оценка уровня плодородия и агроэкологического состояния выработанных торфяных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2021. № 9. С. 3–12.
6. *Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С.* Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агротех. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
7. *Комаров В.И.* Эколого-агрохимическая оценка содержания тяжелых металлов в агроландшафтах Владимирской области: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.—Пушкин, 2004. 20 с.
8. *Шихова Л.Н.* Содержание и динамика тяжелых металлов в почвах северо-востока европейской части России: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.—Пушкин, 2005. 46 с.
9. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 12–22.
10. *Рагимов А.О.* Эколого-функциональная роль почв в формировании уровня благополучия населения Владимирской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2015. 23 с.
11. *Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н., Карманов И.И., Ефремов В.В.* Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв. М.: Агропромиздат, 1991. 304 с.
12. *Гаврилова И.П., Касимов Н.С.* Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
13. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
14. Руководящий документ. Массовая доля кислоторастворимых форм металлов в пробах почв, грунтов и донных отложений. Методика измерений методом атомно-абсорбционной спектроскопии. РД 52.18.191-2018. Обнинск: Росгидромет, 2019. 36 с.
15. Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 52.18.289-90. М.: Росгидромет, 1990. 36 с.
16. *Пейве Я.В.* Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.
17. *Катальмов М.В.* Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 330 с.
18. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
19. *Шихова Л.Н., Егошина Т.Л.* Тяжелые металлы в почвах и растениях таежной зоны северо-востока европейской России. Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2004. 264 с.
20. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2016. № 5. С. 39–47.
21. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.
22. *Панасин В.И.* Микроэлементы и урожай. Калининград: Калининград. кн. изд-во, 2000. 276 с.
23. *Гамзиков Г.П.* Почвенная диагностика питания растений и применения удобрений на черноземных почвах // Особенности формирования и использования почв Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1982. С. 191–204.
24. *Ильин В.Б.* Химические элементы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1982. 113 с.
25. *Taylor S.R.* Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1964. V. 28. № 8. P. 1273–1285.
26. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
27. *Зырин Н.Г., Чеботарева Н.А.* К вопросу о формах соединений меди, цинка, свинца в почвах и доступности их для растений // Содержание и формы соединений микроэлементов в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 324–350.
28. *Черных Н.А., Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.
29. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / Под общей ред. М.М. Овчаренко. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.
30. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: АН СССР, 1957. 237 с.
31. *Кабанов Ф.И.* Микроэлементы и растения. М.: Просвещение, 1977. 136 с.
32. *Трифонов Т.А.* Экологический атлас Владимирской области / Под ред. Т.А. Трифоновой. Владимир: ВлГУ, 2007. 92 с.
33. *Каплунова Е.В.* Трансформация соединений цинка, свинца и кадмия в почвах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1983. 23 с.
34. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
35. *Чернова О.В., Бекецкая О.В.* Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // *Почвоведение*. 2011. № 9. С. 1102–1113.
36. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Метод. указ. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.

Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Loamy Soils of the Vladimir Region

A. A. Utkin

*D.K. Belyaev Ivanovo State Agricultural Academy
ul. Sovetskaya 45, Ivanovo 153012, Russia
E-mail: aleut@inbox.ru*

The results of long-term agrochemical and ecotoxicological studies of reference sites of sod-podzolic loamy soils of agricultural use of the Vladimir region, which were carried out to establish the level of fertility according to the main agrochemical indicators, the content of trace elements and sulfur, ecotoxicological state – according to the content of gross and mobile forms of heavy metals, are presented. The deterioration of such indicators of soil fertility as the availability of organic matter, mobile forms of phosphorus and potassium, exchange bases of calcium, magnesium, increased metabolic and hydrolytic acidity has been established. Soil fertility was assessed by calculating the soil-ecological index. The provision of soils with boron, molybdenum, copper and mobile sulfur has been determined. The concentrations of gross and mobile forms of heavy metals in the surveyed soils did not exceed acceptable levels. According to the content of the studied metals, the studied soils are slightly polluted and are not dangerous for cultivated plants and human health. According to the Pearson correlation coefficients, the peculiarities of the influence of soil properties on the concentrations of trace elements, sulfur, gross and mobile forms of metals are established.

Key words: fertility, sod-podzolic soil, heavy metals, trace elements, reference sites, Vladimir region.

УДК 631.41:631.445.24:581.5

ИЗУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ ОКУЛЬТУРЕННОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

© 2022 г. А. В. Литвинович^{1,*}, О. Ю. Павлова¹, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург—Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

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

Поступила в редакцию 11.11.2021 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Прослежены изменения растительного покрова окультуренной дерново-подзолистой иллювиально-железистой песчаной почвы, находящейся в залежи около 100 лет. Приведено описание почвенного профиля на разных этапах формирования природных экосистем. Показано, что положительные изменения (плотность сложения, содержание и запасы различных форм элементов питания), достигнутые в результате 200-летней эксплуатации почвы, по мере увеличения срока прекращения антропогенного воздействия постепенно утрачиваются. Разработаны эмпирические модели, описывающие динамику запасов различных форм соединений калия, фосфора и валового азота в процессе перехода от пашни к лесу. Приведены данные скорости утраты отдельных элементов почвенного плодородия спустя 100 лет после прекращения антропогенного воздействия. Проведено ранжирование изученных показателей по темпам потерь элементов питания за 100 лет нахождения почвы в залежи. По средней относительной скорости снижения запасов элементов питания (средний темп снижения показателей, логарифмическая производная) все изученные элементы образуют следующий по возрастанию ряд (v): валовой фосфор (0.00052) < валовой азот (0.00529) < обменный калий (0.008) < водорастворимый калий (0.012) < подвижный фосфор (0.0136) < обменный калий (0.0185).

Ключевые слова: дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, разновозрастные залежи, природные экосистемы, содержание и запасы элементов питания, эмпирические модели.

DOI: 10.31857/S0002188122060084

ВВЕДЕНИЕ

Экономическая ситуация в России в последние 25 лет привела к сокращению площади обрабатываемых земель в стране. По данным [1], почти половина пахотных угодий Северо-Западного региона Российской Федерации не используется и в большей своей части подвергается вторичному зарастанию древесно-кустарниковой растительностью. Из общей площади пахотных почв региона, составляющей ~3 млн га, зарастанию подвержено 48% площади.

Выведение в залежь сельскохозяйственных угодий характерно не только для последних 25 лет. Большинство территорий южно-таежной подзоны

за историческое время в той или иной степени подвергалось антропогенному воздействию, вследствие чего многие дерново-подзолистые почвы представляют результат эволюции старопахотных территорий в лесные угодья [2, 3].

В лаборатории мелиорации почв АФИ с 2003 г. проводят исследования направленности и скорости изменения пахотных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава, выведенных из сельскохозяйственного оборота [3–11].

Однако по-прежнему мало данных, касающихся утраты элементов минерального питания растений при длительном отсутствии антропо-

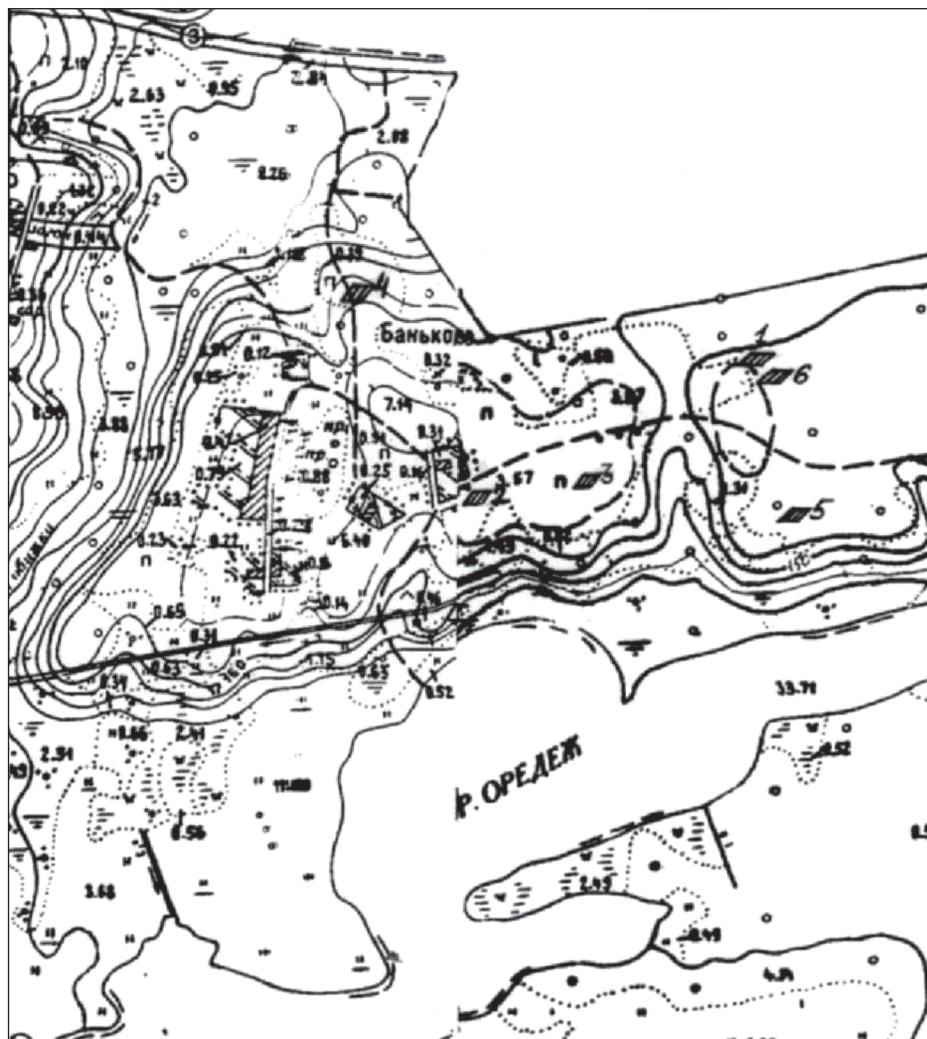


Рис. 1. Карта местности с указанием площадок отбора (М 1 : 10000): 1 – лес, 2 – пашня, 3 – залежь 10 лет, 4 – залежь 20 лет, 5 – залежь 60 лет, 6 – вторичный лес (залежь 100 лет).

генной нагрузки. Не разработаны эмпирические зависимости скорости изменения параметров почвенного плодородия окультуренных почв, долгое время находящихся в залежи.

В задачи исследования входило: проследить смену растительных сообществ окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы по мере увеличения срока нахождения в залежи; изучить строение профиля и изменение плотности сложения при отсутствии механической обработки некультивируемой почвы; определить содержание и запасы различных форм питательных элементов на разных этапах нахождения почвы в залежи; разработать эмпирические модели, описывающие утрату элементов почвенного плодородия в процессе увеличения возраста почвы без антропогенного воздействия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В Лужском р-не Ленинградской обл. провели полевое почвенное обследование и выбрали 6 базовых площадок, на которых осуществляли исследование почв. Основными критериями для выбора явилась однотипность геоморфологических условий: 1 – все исследованные почвы сформировались на плоских водораздельных пространствах одинакового гипсометрического уровня; 2 – однородность почвообразующих пород, представляющих собой хорошо сортированные флювиогляциальные (камовые) пески; 3 – однообразие растительности на выбранной площадке. Местоположение площадок, с которых производили отбор проб, изображено на рис. 1.

Материнской породой объектов исследования явились флювиогляциальные (камовые) пески. Почвообразующие породы изученных почв име-

Таблица 1. Гранулометрический состав почвообразующих пород, содержание фракций, % от массы сухой навески почвы

Угодье	Глубина отбора проб, см	Размер фракций, мм							
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01	$\frac{1-0.25}{0.25-0.05}$
1. Лес	70–100	56.3	40.1	1.35	0.55	0.91	0.81	2.27	1.40
2. Пашня	92–100	57.4	38.9	1.27	0.58	0.81	1.10	2.49	1.47
3. Залежь 10 лет	80–100	58.3	38.2	1.02	0.49	0.95	1.05	2.49	1.52
4. Залежь 20 лет	80–100	55.6	40.9	1.19	0.51	0.85	0.96	2.32	1.36
5. Залежь 60 лет	90–100	56.0	39.9	1.40	0.75	0.98	0.93	2.66	1.40
6. Вторичный лес (залежь 100 лет)	>105	55.0	41.1	1.39	0.57	0.93	1.03	2.53	1.33

ют ряд сходных характеристик, в частности: содержание песчаной фракции существенно преобладает и меняется в пределах от 95.9 до 96.5%; количество физической глины не превышает 2.7% и изменяется в пределах 2.27–2.66%, что позволило отнести почву по классификации Н.А. Качинского [12] к рыхлым пескам; об однородности песков можно также судить по отношению крупного и среднего песка к мелкому (1–0.25 мм/0.25–0.05 мм). Данное отношение в материнских породах имеет пределы изменений от 1.36 до 1.52 (табл. 1).

Основными объектами исследования явились дерново-подзолистые песчаные почвы залежей различного возраста – 10, 20, 60 и 100 лет. Для сравнения исследовали целинную (лесную) дерново-подзолистую песчаную почву и ее окультуренный аналог. Возраст прекращения антропогенного воздействия на залежных почвах определили по картографическим материалам, опросам местного населения и личным наблюдениям. Время прекращения антропогенного воздействия на залежах 60- и 100-летнего возраста установлено с точностью $\pm 3-5$ лет.

На каждом из выбранных массивов отбивали пробные площадки размером 10×10 м. На них закладывали базовый почвенный разрез, вокруг которого делали дополнительно 4 прикопки. Определение плотности сложения, содержания азота, калия и фосфора, проводили согласно существующим методам в пятикратной повторности.

Аналитические работы по установлению физико-химических показателей проводили с использованием методов, принятых в почвоведении и агрохимии [13]: плотность сложения почвы – методом режущих цилиндров, содержание различных форм калия – методом пламенной фотометрии (водорастворимый калий – в вытяжке при отношении почва : раствор = 1 : 5, обменный калий – по методу Масловой путем вытеснения 1 н.

раствором уксуснокислого аммония, необменный калий – по методике Гедройца в модификации Вадженина, валовой азот – колориметрическим методом с раствором Несслера после сжигания серно-хлорной смесью (по методу Кьельдаля), подвижные соединения фосфора – по методу Кирсанова, валовой фосфор – колориметрическим методом после сжигания серно-хлорной смесью.

Данные исследования обработаны при помощи методов математической статистики [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение растительности при смене характера использования почв. Дерново-подзолистая целинная почва, выбранная в качестве эталонной, сформирована под смешанным березово-сосновым лесом с травянисто-кустарничково-моховым наземным покровом. Растительность: смешанный лес – сосна (*Pinus sylvestris*) : береза (*Betula*) = 1 : 1; подрост – рябина (*Sorbus aucuparia*), ель (*Picea abies*); кустарничковый ярус – черника (*Vaccinium myrtillus*), травянистая растительность – осока пальчатая (*Carex digitata*) и ранняя (*Carex praecox*), марьяник дубравный (*Melampyrum nemorosum*), ситник нитевидный (*Juncus filiformis*) (20% травянистой растительности), в наземном покрове – мхи гипновые (40–50% покрытия).

Дерново-подзолистая пахотная (огородная) почва находится в культуре >200 лет, на момент изучения была занята под посадку картофеля с незначительной засоренностью (сурепка обыкновенная (*Barbarea vulgaris*), бодяк полевой (*Cirsium aryense*), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*)).

Прекращение антропогенного воздействия по истечении различного времени наложило значительный отпечаток на характер растительности. В растительном покрове залежи 10-летнего воз-

раста существенно преобладал злаковый компонент, представленный тимopheевкой луговой (*Phleum pratense*), ежой сборной (*Dactylis glomerata*), овсяницей луговой (*Festuca pratensis*) с незначительной примесью клевера красного (*Trifolium rubens*), что связано с возделыванием этой смеси многолетних трав на данном массиве. Незначительную долю в травянистом покрове занимали сорные растения: сурепка обыкновенная (*Barbarea vulgaris*), бодяк полевой (*Cirsium aryense*), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*).

Через 20 лет нахождения в залежи растительный покров претерпевал видимые изменения. Резко снижалась доля покрытия злаковыми растениями, которые представлены естественными травами: лисохвостом луговым (*Alopecurus pratensis*), овсяницей луговой (*Festuca pratensis*). Из бобовых место клевера красного (*Trifolium rubens*) занимали мышиный горошек (*Vicia cracca*) и чина луговая (*Lathyrus pratensis*), 70% покрытия составляло разнотравье: одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), манжетка обыкновенная (*Alchemilla vulgaris*), василек луговой (*Centaurea jacea*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*), звездчатка малая (*Stellaria*), черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris*), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*). В наземном покрове появлялись мхи (10%). Из древесных пород выявили подрост сосны 10–15-летнего возраста, высотой 1.5–2 м. Незначительную долю составляли растения-ацидофилы: щавель (*Rumex*), осока пальчатая (*Carex digitata*), ситник нитевидный (*Juncus filiformis*).

В последующем, учитывая подкисление почвы [10] и нарастание биомассы древесных пород, происходило изменение растительного покрова. На почве 60-летней залежи начинал формироваться изреженный смешанный березово-сосновый лес (1 : 9) с подростом из рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia*) и дуба (*Quercus*). Травянистый покров состоял из типичных растений-ацидофилов: ситника нитевидного (*Juncus filiformis*) – 70% и осоки пальчатой (*Carex digitata*) – 10%, а также разнотравья (марьянник дубравный (*Melampyrum nemorosum*), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum*), щавелек малый (*Rumex acetosella*)). Значительную долю в наземном покрове занимали мхи (30–40%).

Отсутствие обработки в течение 100 лет приводило к восстановлению типичной для района и данных геоморфологических условий растительности. Формировался вторичный хвойно-мелколиственный лес с преобладанием сосны с подро-

стом из лиственных пород, появлением кустарничков – черники (*Vaccinium myrtillus*) и типичным травяно-моховым покрытием. Доля травянистых растений (ситник нитевидный, марьянник дубравный, осока пальчатая) снижалась до 15–20%, тогда как покрытие мхами достигало >50%.

Таким образом, в растительном покрове 10-летней залежи преобладал злаковый компонент, представленный сеянными травами. Через 20 лет доля злаковых уменьшалась, появлялись растения-ацидофилы. Растительность 60-летней залежи отличалась отсутствием бобовых и злаковых трав и постепенным восстановлением леса. Характер растительности 100-летнего вторичного леса был близок к таковому на целинной почве.

Строение профиля почв. Строение профиля сравниваемых почв приведено на рис. 2. Разрез 1 (коренной лес) представлен дерново-среднеподзолистой иллювиально-железистой песчаной почвой на флювиогляциальных отложениях. Резкое расчленение профиля на генетические горизонты свидетельствовало о сопряженном развитии дернового и подзолистого процессов с явным преимуществом последнего.

Разрез 2 (пашня) представлен дерново-слабоподзолистой иллювиально-железистой песчаной почвой на флювиогляциальных песках. Данная почва находится в сельскохозяйственном использовании >200 лет. По совокупности морфологических признаков, однородной серой окраске, наличию непрочной комковатой структуры, гомогенности пахотного слоя и отсутствию резко выраженных признаков оподзоливания, данная почва может быть отнесена к категории хорошо окультуренных.

Разновозрастные залежи 10, 20, 60 и 100 лет представлены дерново-слабо (средне) подзолистыми иллювиально-железистыми почвами на флювиогляциальных отложениях.

По ряду морфологических признаков в залежных почвах происходят заметные изменения в строении профиля, связанные с усилением элювиальных процессов. Постепенно залежная почва приближается по морфологии к исходному целинному состоянию, но полного восстановления не происходит. В то же время сохраняются признаки окультуривания, хорошо заметные по мощности гумусового горизонта и четким, ровным границам между ним и последующими.

Плотность сложения почв. Плотность сложения почв в стационарных системах лесных ландшафтов является довольно консервативным свойством, мало изменяющимся во времени. Дерново-подзолистая почва в естественном состо-

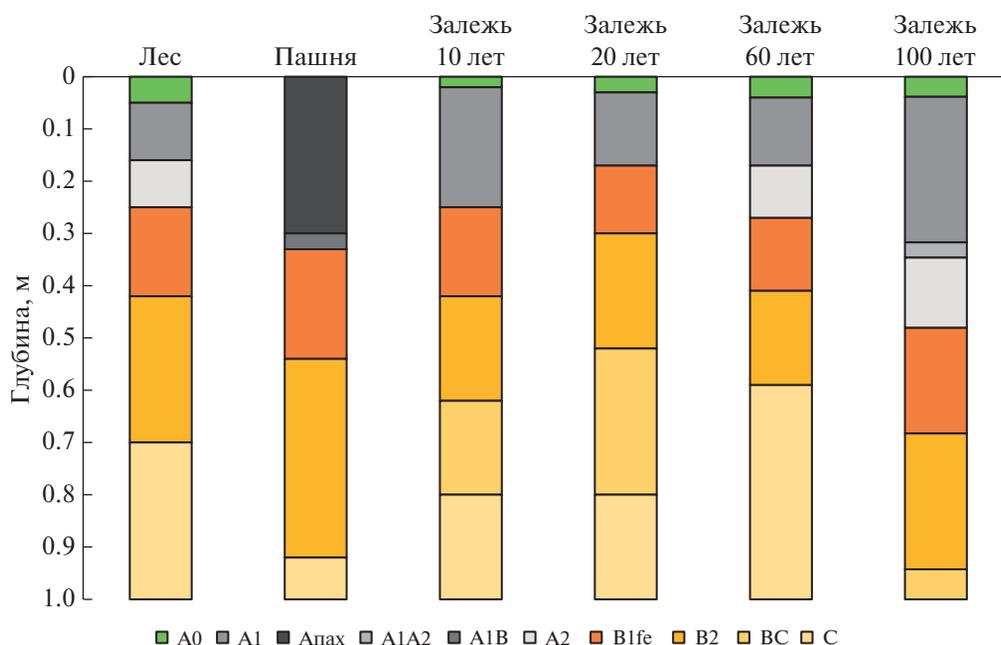


Рис. 2. Строение профиля дерново-подзолистых иллювиально-железистых почв.

янии имеет высокие показатели плотности сложения по всему профилю (от 1.43 до 1.55 г/см³), что типично для рыхлых песков, находящихся практически в раздельно-частичном состоянии (табл. 2).

При окультуривании почвы данный показатель становится более динамичным, особенно в верхних горизонтах профиля, испытывающих как механическое, так и химическое воздействие. Обработка почвы, внесение органических удобрений и химических мелиорантов приводит к уменьшению плотности сложения в пахотном слое. Невысокая плотность сложения пахотного слоя (особенно верхней его части) связана, скорее всего, еще и с тем, что отбор образцов проводили в июне, после окучивания картофеля. Плотность сложения нижних горизонтов профиля оставалась на уровне целинного аналога.

После прекращения антропогенного воздействия, в течение 10–20 лет плотность сложения слабо изменялась, хотя намечалась тенденция к незначительному уплотнению в верхней части профиля. Положительное влияние в этом случае оказывали корни травянистой растительности, способствующие разрыхлению корнеобитаемого слоя. В то же время произошло расчленение бывшего пахотного слоя по плотности. Например, амплитуда изменений плотности сложения в нижней части гумусового горизонта (17–30 см) 20-летней залежи составила от 1.29 до 1.37 г/см³, тогда как в верхней его части — от 1.22 до 1.26 г/см³. Это объясняется неглубоким проникновением

корневых систем травянистых растений, максимальное количество которых (до 80–90%) сосредоточено в слое 0–15 см.

После постепенного зарастания древесной растительностью и уменьшением доли трав в наземном покрове отмечено постепенное увеличение плотности сложения, при этом приблизительно через 100 лет после прекращения обработки в почве под вторичным лесом величины плотности сложения всех горизонтов профиля практически совпадают с плотностью горизонтов целинной лесной почвы. Например, плотность сложения верхних горизонтов почв целинного и вторичного лесов составляет 1.43 и 1.40 г/см³ соответственно.

Таким образом, несмотря на относительную консервативность данного показателя почв, следует отметить, что динамичность его значительна и существенно зависит от характера воздействия.

Содержание и запасы элементов питания. Запасы азота. Максимальные запасы азота были зафиксированы в слое 0–30 см пахотной почвы — ≈4 т/га, что можно связать с поступлением большого количества азота с органическими и минеральными удобрениями (рис. 3). Спустя 10 лет после прекращения антропогенного воздействия запасы азота снижались, однако это уменьшение было незначительным, что объясняется наличием бобового компонента в растительном покрове изученного объекта и прекращением отчуждения этого элемента урожаем. В последующие 10 лет

Таблица 2. Плотность сложения и содержание различных форм элементов питания в дерново-подзолистых песчаных почвах

Угодье	Горизонт	Глубина, см	Плотность, г/см ³	N _{вал} , %	Содержание калия, мг/кг				K _{необм} /K _{обм}	Содержание фосфора	
					водорастворимый	обменный	необменный	валовой, %		подвижный, мг/кг	
Лес	A1	5-16	1.43 ± 0.02	0.10	13 ± 0.2	47 ± 1.2	100 ± 2	2.13	0.078	18 ± 0.3	
	A2	16-25	1.48 ± 0.03	0.017	8	11	81	7.36	0.063	44	
	B1Fe	25-42	1.50 ± 0.05	0.040	11	24	175	7.29	0.070	92	
	B2	42-70	1.55 ± 0.05	Не определяли	11	19	240	12.6	Не определяли		
	C	70-100		Не определяли	15	14	301	21.5	Не определяли		
Пашня	Апах (1)	0-10	1.13 ± 0.03	0.122	46 ± 0.8	146 ± 2	213 ± 2	1.46	0.093	148 ± 1.2	
	Апах (2)	10-30	1.26 ± 0.04	0.104	57 ± 0.3	137 ± 1	196 ± 1	1.43	0.087	248 ± 1.5	
	A1B	30-33	1.50 ± 0.04	0.092	19	31	270	8.71	0.070	Не определяли	
	B1Fe	33-54	1.57 ± 0.04	Не определяли	20	19	281	14.8	Не определяли	60	
	B2	54-92	Не определяли	Не определяли	14	19	272	14.3	Не определяли		
C	92-100		Не определяли	18	21	341	16.2	Не определяли			
Залежь 10 лет	A1(1)	2-10	1.21 ± 0.03	0.123	42 ± 0.4	172 ± 1	259 ± 1.8	1.51	0.095	152 ± 1	
	A1(2)	10-25	1.26 ± 0.04	0.096	29 ± 0.2	99 ± 1	302 ± 1.5	3.05	0.081	192 ± 1	
	B1Fe	25-42	1.50 ± 0.04	0.071	20	35	195	5.57	0.075	16.0	
	B2	42-62	1.57 ± 0.04	не опр.	13	23	284	12.4	Не определяли		
	BC	62-80		не опр.	13	23	284	12.4	Не определяли		
C	80-100		не опр.	13	23	284	12.4	Не определяли			
Залежь 20 лет	A1(1)	3-17	1.24 ± 0.02	0.101	33 ± 0.06	88 ± 0.15	209 ± 0.28	2.38	0.089	128 ± 1.0	
	A1(2)	17-30	1.33 ± 0.04	0.074	28 ± 0.03	54 ± 0.07	228 ± 0.23	4.22	0.075	166 ± 2.1	
	B1Fe	30-52	1.51 ± 0.04	0.050	15	57	423	7.42	0.070	130	
	B2	52-82	1.56 ± 0.05	0.050	15	57	423	7.42	0.070	130	
	C	82-100	Не определяли	0.050	15	57	423	7.42	0.070	130	
Залежь 60 лет	A1(1)	4-17	1.35 ± 0.03	0.079	14 ± 0.5	34 ± 1.1	117 ± 3.1	3.44	0.081	39 ± 0.7	
	A1(2)	17-32	1.42 ± 0.03	0.060	10 ± 0.2	14 ± 0.04	121 ± 4.1	8.64	0.070	206 ± 0.7	
	A2	32-42	1.50 ± 0.04	0.021	10	7	153	21.9	0.060	118	
	B1Fe	42-56	1.57 ± 0.03	Не определяли	10	11	294	26.7	Не определяли		
	B2	56-74		Не определяли	10	11	294	26.7	Не определяли		
Вторичный лес (залежь 100 лет)	A1(1)	4-14	1.40 ± 0.03	0.066	15 ± 0.1	19 ± 0.5	96 ± 5.2	5.05	0.076	36 ± 0.3	
	A1(2)	14-29	1.48 ± 0.04	0.059	12 ± 0.2	21 ± 0.4	97 ± 4.4	4.62	0.068	46 ± 0.5	
	A1A2	29-32	1.48 ± 0.04	0.050	7	7	136	19.4	0.065	—	
	A2	32-46	1.52 ± 0.03	0.028	11	14	200	14.3	Не определяли		
	B1Fe	46-67	1.55 ± 0.02	0.028	11	14	200	14.3	Не определяли		
B2	67-94	1.57 ± 0.03	—	—	—	—	—	—	—		
BC	94-105	—	—	—	—	—	—	—	—		

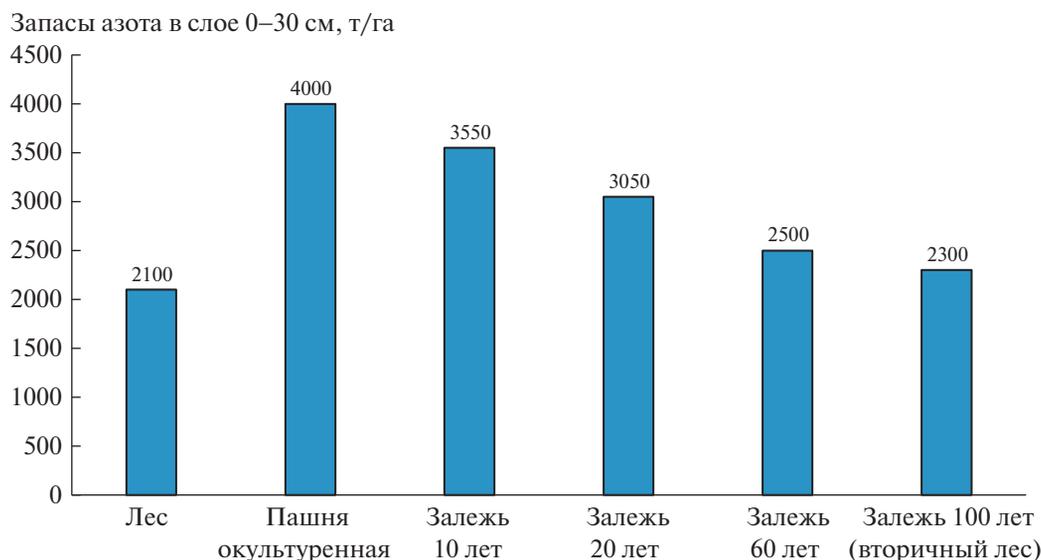


Рис. 3. Запасы азота в слое 0–30 см изученных дерново-подзолистых почв, кг/га (расчет производили без учета лесной подстилки и слоя дернины. То же на рис. 4–6).

нахождения почвы без использования запасы азота уменьшались еще на 500 кг/га. В слое 0–30 см залежной почвы 60-летнего возраста запасы азота были очень близки к таковым в целинной почве. Продолжалось снижение запасов относительно пахотной дерново-подзолистой почвы. Спустя 100 лет после прекращения использования дерново-подзолистой песчаной почвы запасы этого элемента превосходили запасы в нативной почве, что свидетельствовало о сохранении положительных последствий окультуривания даже на этом этапе. Запасы валового азота тесно коррелировали с запасами гумуса [10].

Эмпирическая модель убыли запасов азота по мере увеличения срока нахождения дерново-подзолистой окультуренной песчаной почвы в залежи приведена в табл. 3.

Содержание и формы соединений калия. Результаты свидетельствовали, что количество водорастворимых соединений калия в дерново-подзолистой целинной лесной почве было невысоким с максимумом содержания в гумусовом горизонте — 13 мг/кг (табл. 2). Максимальное содержание элемента в гумусовом горизонте объясняется поступлением калия, накопленного в лесном опаде, в нижележащий слой. Вниз по профилю концентрация калия резко уменьшалась, минимальное его количество было характерно для подзолистого горизонта A2 (16–25 см). Некоторое возрастание содержания водорастворимого калия в нижележащих горизонтах B1 и B2 связано, по-видимому, с миграцией этого элемента из верхних горизонтов.

К обменной форме калия принято относить калий диффузного слоя почвенных коллоидов, который служит основным источником питания растений. В гумусовом горизонте целинной лесной почвы он содержался в количестве 47 мг/кг. Распределение обменного калия по профилю имело элювиально-иллювиальный характер.

Под необменным калием понимается фиксированный калий, труднообменный калий слюд, их гидратированные разновидности и калий других глинистых минералов [15, 16]. Слюды и гидрослюды, содержащиеся в илстой и коллоидной фракциях, выступали основным источником питания для растений. Распределение данной формы калия по профилю лесной почвы было следующим: минимум этих форм содержался в подзолистом горизонте, несколько больше — в гумусовом горизонте. Содержание увеличивалось в иллювиальных горизонтах и в материнской породе.

По многочисленным данным, при окультуривании дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава происходит возрастание концентрации всех форм калия [7, 17]. Это связано с активным разложением органических остатков и минерализацией гумуса, а также с применением калийных удобрений. Но это увеличение незначительно, т.к. часть освобожденного калия усваивается растениями, часть фиксируется почвой. В нашем исследовании содержание водорастворимых соединений калия в пахотном слое по сравнению с содержанием в гумусово-аккумулятивном горизонте целинной почвы увеличилось в 3.5 раза.

Таблица 3. Эмпирические модели динамики процессов изменения запасов элементов питания растений (y_i , т/га) при переходе от пашни к лесу за период времени (t : 0...100 лет)

Мощность слоя, см	Эмпирическая модель	Скорость изменения (v)	p-value	Коэффициент детерминации
Запасы азота				
0–30	$\ln(y_1) = 8.21 - 0.00529t$	$v_1 = -0.00529$	$p = 0.015$	$R^2 = 0.896$
Запасы валового фосфора				
0–30	$\ln(y_2) = 0.99 - 0.00052t$	$v_2 = -0.00052$	$p = 0.03$	$R^2 = 0.82$
Запасы подвижного фосфора				
0–30	$\ln(y_3) = -0.35 - 0.0136t$	$v_3 = -0.0136$	$p = 0.018$	$R^2 = 0.88$
Запасы водорастворимого калия				
0–30	$\ln(y_4) = -2.07 - 0.012t$	$v_4 = -0.012$	$p = 0.05$	$R^2 = 0.77$
0–50	$\ln(y_5) = -1.7 - 0.01t$	$v_5 = -0.01$	$p = 0.045$	$R^2 = 0.785$
Запасы обменного калия				
0–30	$\ln(y_6) = -1.02 - 0.0185t$	$v_6 = -0.0185$	$p = 0.01$	$R^2 = 0.9$
0–50	$\ln(y_7) = -0.74 - 0.017t$	$v_7 = -0.017$	$p = 0.018$	$R^2 = 0.88$
Запасы необменного калия				
0–30	$\ln(y_8) = -0.27 - 0.008t$	$v_8 = -0.008$	$p = 0.045$	$R^2 = 0.78$
0–50	$\ln(y_9) = 0.53 - 0.006t$	$v_9 = -0.006$	$p = 0.08$	$R^2 = 0.69$

Еще одним итогом применения приемов окультуривания явилось увеличение содержания обменного калия в верхней части профиля, причем изменения затрагивали и подпахотный горизонт А1В (30–33 см). В пахотном горизонте происходило увеличение содержания необменных форм калия более чем в 2 раза. Это объясняется адсорбцией калия почвой после внесения калийных удобрений, которая увеличивается со временем вследствие перемешивания почвы и даже может приводить к достройке кристаллической решетки глинистых минералов в почвах (так называемой “аградации”) [18, 19].

В результате развития почвы в ней складывается определенное, оптимальное для данной ситуации, устойчивое соотношение между формами калия. При изменении этого равновесия, например, при внесении удобрений, превращение форм калия будет проходить в направлении восстановления первоначальных пропорций между ними [7, 20, 21]. Действительно, при окультуривании возрастает количество всех форм калия, при этом пропорции между обменным и водорастворимым калием сохраняются, однако необменных форм калия накапливается меньше.

В гумусовом горизонте целинной лесной почвы отношение $K_{необм}/K_{обм}$ равно 2.13 (табл. 3), в

пахотном горизонте окультуренной почвы – 1.43–1.46. Это указывало на смещение пропорций калийных форм в сторону накопления обменной формы калия при применении приемов окультуривания.

В почве, оставленной без использования 10 лет назад, наблюдали возрастание содержания обменной и необменной форм калия в верхнем подгоризонте гумусового слоя (2–10 см). Такое явление могло быть следствием поступления калия при отмирании биомассы корней и надземной части растений. В нижней части бывшего пахотного слоя содержание обменных форм калия снижалось относительно такового в пахотной почве, а количество необменных форм этого элемента, напротив, возрастало. В нижнем подгоризонте гумусового слоя 10-летней залежи соотношение $K_{необм}/K_{обм}$ расширялось, что свидетельствовало о начальном этапе восстановления пропорций между различными формами калия, свойственными целинной дерново-подзолистой почве. Бывший пахотный горизонт через 10 лет после прекращения использования почвы в культуре дифференцировался на 2 подгоризонта по показателям калийного состояния. В верхнем подгоризонте наблюдали некоторое увеличение содержания всех форм калия, а в нижнем происходило

перераспределение между формами калия, фиксирование части калия в необменной форме.

Спустя 20 лет после прекращения антропогенного воздействия в гумусовом слое почвы уменьшалось количество всех форм калия. Показатели $K_{\text{необм}}/K_{\text{обм}}$ увеличивались в обоих подгоризонтах слоя A1, что указывало на снижение содержания обменных форм калия доступных для растений. Вероятно, это следует объяснить преобразованием твердой фазы почвы после снятия антропогенной нагрузки. Вместе с этим, в почве 20-летней залежи содержание всех форм калия практически в 2 раза превосходило количество тех же форм в целинной почве. Травы, произраставшие на этом объекте, все еще поддерживали показатели калийного состояния почвы на достаточно благоприятном уровне.

Дальнейшее нахождение почвы в залежи приводило к еще более сильному обеднению калием всех горизонтов. И к 60-ти годам после прекращения использования дерново-подзолистой почвы ее калийное состояние, оцененное по содержанию различных форм калия, практически возвратилось в исходное состояние, свойственное целинной почве. Содержание обменного калия было даже меньше, чем в целинной почве. Особенно это было заметно в нижнем подгоризонте бывшего пахотного слоя. В данном случае это можно объяснить сменой растительности с травянистой, которая не может нормально развиваться в экстраэлювиальных условиях, на лесную, способную накапливать элементы-органогены в своей фитомассе, тем самым препятствуя их вымыванию. Вероятно, часть калия была использована древесными растениями для построения многолетней биомассы. Частично калий возвращался в почву с опадом, но практически сразу же вовлекался лесными породами снова в биологический круговорот.

В почве вторичного леса, которую не использовали в течение 100 лет, содержание водорастворимых и обменных форм калия практически совпадало с таковыми в целинной лесной почве. Можно говорить о почти полном возвращении элементов калийного фонда, которые были изучены, в исходное состояние. Исключение составляло содержание обменных соединений калия, которых в гумусовом горизонте 100-летней залежи было меньше, чем в слое A1 целинной лесной почвы. Это связано с тем, что обедненные калием почвы очень интенсивно фиксируют его. По данным [22], емкость фиксации, т.е. предельное количество калия, которое может быть необменно поглощено почвами, довольно высока. Например, в пахотном слое супесчаных почв эта вели-

чина достигала 54 кг/га. Поэтому отмечено расширение соотношения необменного калия к общему, что, видимо, происходило за счет перехода части обменных форм калия в фиксированное состояние.

Полного возврата к исходному состоянию почв залежи по содержанию и соотношению между формами калия не происходило даже спустя 100 лет после прекращения антропогенного воздействия. В дальнейшем следует ожидать медленного восстановления параметров калийного состояния залежных почв по типу зонального почвообразования.

Динамика запасов различных форм калия в слоях 0–30 и 0–50 см приведена на рис. 4, 5. Эмпирические модели запасов различных форм соединений калия представлены в табл. 3.

Содержание валовых и подвижных соединений фосфора. При сравнении содержания валового фосфора по горизонтам исследованных объектов выявлено увеличение содержания данного элемента в верхнем горизонте пахотной почвы по сравнению с гумусовым горизонтом целинного аналога (табл. 2). В почвах залежи 10-ти и 20-ти лет содержание валового фосфора удерживалось на уровне окультуренной почвы. В дальнейшем при увеличении срока нахождения почвы в залежи (60 и 100 лет) происходило снижение количества валового фосфора. Причем в почвах каждого объекта отмечена дифференциация гумусового горизонта на 2 подгоризонта с большим содержанием валового фосфора в верхнем подгоризонте и с меньшим – в нижнем. В окультуренной почве аккумуляция валового фосфора в пахотном слое происходила также в результате внесения изученного элемента с удобрениями. Распределение фосфора по профилю приобретало аккумулятивно-элювиальный характер.

Распределение подвижных соединений фосфора по профилю целинной лесной почвы носило элювиальный характер, т.е. с увеличением глубины повышалось содержание мобильного фосфора, что указывало на его миграцию вниз по профилю.

При окультуривании наблюдали значительное возрастание содержания подвижных фосфатов в пахотном слое. Это объясняется внесением извести, органических и фосфорсодержащих минеральных удобрений [23].

При прекращении антропогенного воздействия в гумусовом горизонте почв 10- и 20-летней залежи происходило снижение подвижности фосфатов, особенно в нижней его части. Можно также предположить наличие связи уменьшения

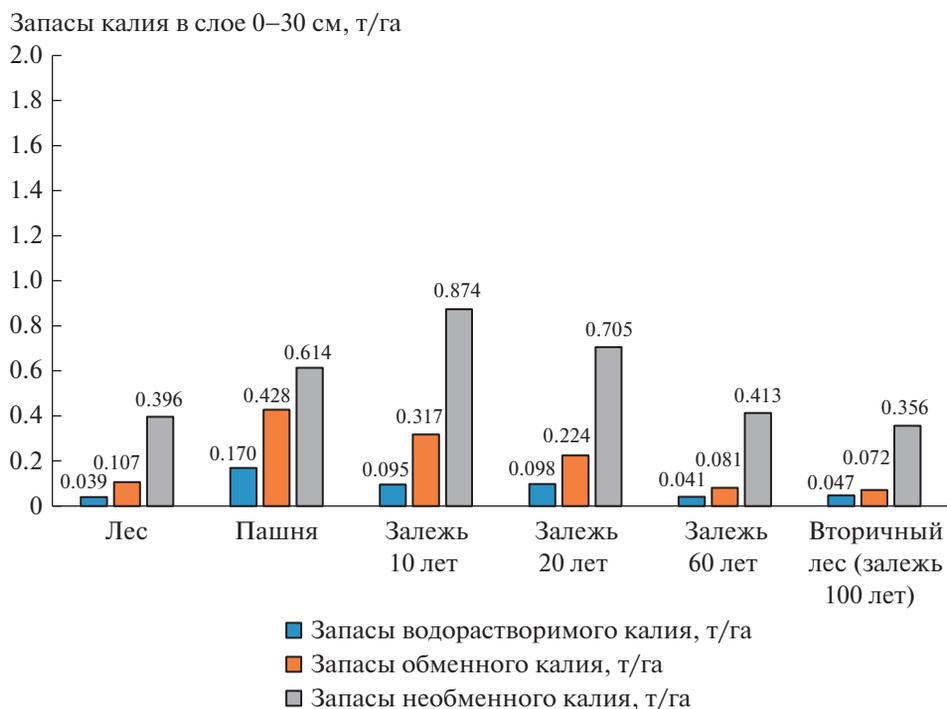


Рис. 4. Запасы водорастворимого, обменного и необменного калия в слое 0–30 см, т/га.



Рис. 5. Запасы водорастворимого, обменного и необменного калия в слое 0–50 см, т/га.

подвижности фосфатов с произрастающей в этот период времени растительностью, которая приводила к уменьшению промачивания почвенного профиля. При сплошном проективном покрытии поверхности почвы уменьшались потери почвенных фосфатов на 65, фосфора удобрения – на 97% [24].

Вниз по профилю происходило увеличение содержания доступных соединений фосфора, что связано, по-видимому, с его миграцией с нисходящим током влаги. Необходимо отметить достаточно высокую мобильность фосфатов, которая удерживалась на протяжении 10–20 лет, сравни-

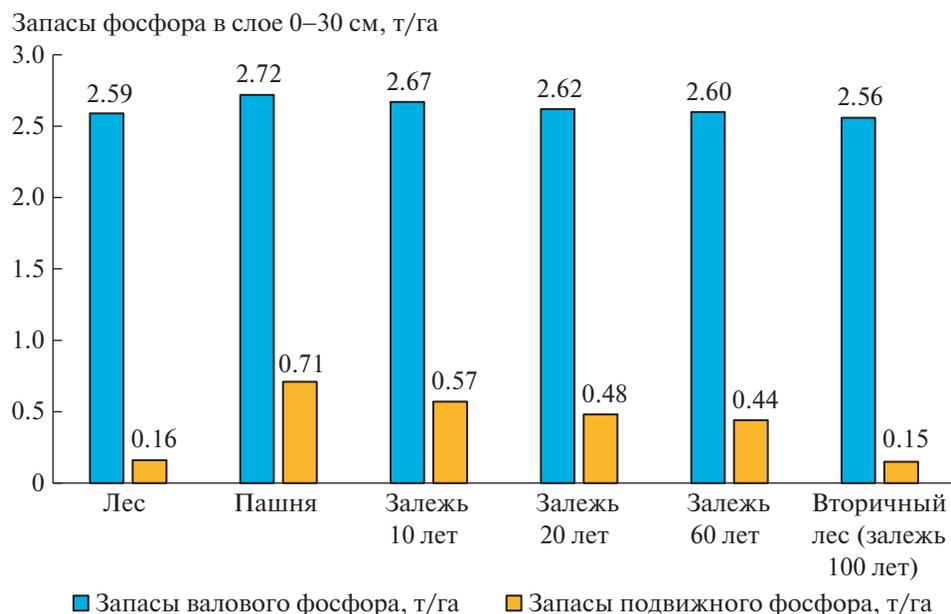


Рис. 6. Запасы валового и подвижного фосфора в слое 0–30 см, т/га.

мую с подвижностью фосфатов в пахотном слое окультуренной почвы.

В почвах, оставленных без использования ≈ 60 и 100 лет назад, отмечено существенное снижение подвижности фосфатов. Содержание лабильного фосфора приближалось к таковому в целинной лесной почве. В почве 60-летней залежи была заметна сильная миграция мобильного фосфора из верхнего подгоризонта бывшего пахотного слоя в нижний подгоризонт, где его содержание было примерно в 5 раз больше. Запасы различных форм фосфора в исследованных почвах приведены на рис. 6. Эмпирические модели динамики запасов подвижного и валового фосфора по мере увеличения срока нахождения почвы в залежи представлены в табл. 3.

Полученные данные позволили утверждать, что окультуренная дерново-подзолистая песчаная иллювиально-железистая почва при выведении из сельскохозяйственного оборота утрачивает положительные изменения, достигнутые в результате окультуривания. Изменяется плотность сложения. Нарушенное антропогенным воздействием строение профиля стремится к своему исходному состоянию. Снижаются содержание и запасы всех форм элементов питания.

Разработанные эмпирические модели изменения запасов всех форм соединений калия, фосфора и валового азота по мере увеличения возраста залежной почвы оказались статистически значимыми на высоком уровне значимости (табл. 3). По средней относительной скорости снижения

запасов элементов питания (средний темп снижения показателей, логарифмическая производная) все изученные элементы образуют следующий по возрастанию ряд (v): валовой фосфор < валовой азот < необменный калий < водорастворимый калий < подвижный фосфор < обменный калий.

Средняя относительная скорость снижения запасов валового фосфора существенно меньше по абсолютной величине, чем запасов подвижного фосфора и азота (абсолютная величина $v_2 = -0.00052$ существенно меньше, чем абсолютная величина коэффициентов $v_3 = -0.0136$ и $v_1 = -0.00529$). Средняя относительная скорость снижения запасов подвижного фосфора была близка к средней относительной скорости снижения содержания обменной формы калия и к средней относительной скорости снижения содержания водорастворимой формы калия ($v_3 = -0.0136$, $v_6 = -0.0185$, $v_4 = -0.012$). Средняя относительная скорость снижения показателя для необменной формы калия существенно меньше по абсолютной величине, чем для обменной формы калия и водорастворимой формы ($v_8 = -0.008$ и $v_9 = -0.006$ по сравнению с $v_6 = -0.0185$, $v_7 = -0.017$, $v_4 = -0.012$, $v_5 = -0.01$).

Статистически значимая взаимосвязь водорастворимой и необменной, обменной и необменной форм калия отсутствовала. Обнаружена статистически значимая на высоком уровне зна-



Рис. 7. Взаимосвязь водорастворимого и обменного калия в слое 0–30 см.

чимости взаимосвязь водорастворимой и обменной форм калия – модель (1.2.1) (рис. 7).

Эмпирическая модель взаимосвязи водорастворимого и обменного калия в слое 0–30 см имеет вид:

$$y_{1.1} = 0.0175 + 0.32y_{2.1}, \quad (1.2.1)$$

где $y_{1.1}$ – водорастворимый калий, $y_{2.1}$ – обменный калий.

Для модели (1.2.1) $p = 0.01$ (p – value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.9$.

ВЫВОДЫ

1. Отсутствие антропогенного воздействия в течение различного времени накладывало значительный отпечаток на характер растительности. В растительном покрове 10-летней залежи преобладал злаковый компонент. Через 20 лет после прекращения использования доля злаковых уменьшалась, появлялись растения-ацидофилы. Растительность 60-летней залежи характеризовалась отсутствием бобовых и злаковых трав и восстановлением леса. Характер растительности вторичного леса (100 лет без использования) был близок к таковому на целинной почве.

2. Строение профиля целинной лесной почвы обусловлено одновременным прохождением дернового и подзолистого процессов. При окультуривании создавался гомогенный пахотный слой

без видимых признаков оподзоливания. Строение профиля залежных почв с течением времени частично приобретало исходное генетическое состояние.

3. Минимальный показатель плотности сложения был характерен для пахотного слоя (1.13–1.26 г/см³). При смене растительности в течение 10–20 лет бывший пахотный слой дифференцировался по плотности на 2 подгоризонта с уплотнением нижней части. При восстановлении леса величины плотности сложения практически совпадали с плотностью горизонтов целинной почвы.

4. Максимальные запасы валового азота (~4 т/га) установлены в 0–30 см слое пахотной почвы. В процессе увеличения возраста залежной почвы запасы азота неуклонно снижались. Спустя 100 лет после прекращения использования почвы в культуре запасы этого элемента превосходили запасы в нативной почве, что свидетельствовало о сохранении положительного влияния окультуривания.

5. Количество всех форм соединений калия в дерново-подзолистой целинной почве было невелико. Вовлечение почвы в культуру приводило к увеличению содержания соединений калия в пахотном и подпахотном слоях. При этом происходило смещение пропорций между формами калия в сторону накопления обменной. В отсутствие антропогенного воздействия в течение 10 лет наблюдали возрастание содержания обменной и необменной форм, в дальнейшем со-

держание всех форм калия неуклонно снижалось. В почве вторичного леса калийное состояние практически совпадало с таковым в целинной почве как по содержанию различных соединений, так и по соотношению между ними. Установлена связь между содержанием водорастворимой и обменной формами калия.

6. Наибольшее содержание валового фосфора было характерно для верхних горизонтов пахотной почвы и почв залежей 10–20 лет. При увеличении срока нахождения почвы в залежи количество валового фосфора снижалось. Распределение подвижных соединений фосфора по профилю почв носило элювиальный характер. Окультуривание почвы способствовало увеличению содержания подвижных фосфатов в пахотном слое. Под травянистой растительностью отмечены незначительные изменения в содержании подвижных фосфатов по сравнению с пахотной почвой, тогда как при восстановлении леса происходило их резкое уменьшение.

7. Разработаны эмпирические модели, описывающие изменения запасов различных форм соединений калия, фосфора и валового азота при переходе от пашни к лесу. Проведено ранжирование изученных показателей по темпам потерь элементов питания за 100 лет нахождения почвы в залежи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.И., Янко Ю.Г.* Мелиорация, как необходимое средство развития сельского хозяйства нечерноземной зоны России // *Агрофизика*. 2019. № 1. С. 67–78.
2. *Баранова О.Ю., Номеров Г.Б., Строганова М.Н.* Изменение свойств пахотных дерново-подзолистых почв при зарастании их лесом // *Почвообразование в лесных биогеоценозах*. М.: Наука, 1989. С. 60–78.
3. *Литвинович А.В.* Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв Северо-Запада Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. 2009. № 7. С. 85–93.
4. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В.* Изменение показателей почвенного плодородия и лабильной части гумуса дерново-подзолистой песчаной почвы при интенсивном окультуривании и в условиях хозяйственного истощения // *Агрохимия*. 2003. № 4. С. 14–21.
5. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Фомина А.С.* Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой песчаной почвы при окультуривании и последующем исключении из хозяйственного оборота // *Агрохимия*. 2004. № 8. С. 13–19.
6. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф., Чернов Д.В., Фомина А.С.* Изменение кислотно-основных свойств окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы в зависимости от срока нахождения в залежи // *Почвоведение*. 2005. № 10. С. 1232–1239.
7. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Чернов Д.В.* Калийное состояние дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы при окультуривании и под залежью // *Почвоведение*. 2006. № 7. С. 876–882.
8. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Трансформация состава гумуса дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава под действием возрастающих доз извести и в постагрогенный период // *Почвоведение*. 2010. № 11. С. 1362–1369.
9. *Литвинович А.В., Дричко В.Ф., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Шабанов М.В.* Изменение кислотно-основных свойств окультуренных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава в процессе постагрогенной трансформации // *Почвоведение*. 2009. № 6. С. 680–686.
10. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Буре В.М.* Скорости изменения кислотно-основных параметров, содержания общего углерода и состава гумуса в дерново-подзолистой песчаной почве при переходе от пашни к лесу при сукцессии залежных земель // *Агрохимия*. 2015. № 11. С. 19–29.
11. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы на залежи // *Почвоведение*. 2007. № 11. С. 1323–1329.
12. *Качинский Н.А.* Физика почв. 1965. 320 с.
13. *Лабораторно-практические занятия по почвоведению*. СПб.: Проспект науки, 2021. 332 с.
14. *Буре В.М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: РАСХН, АФИ, СПбГУ, 2007. 141 с.
15. *Пчелкин В.У.* Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 336 с.
16. *Becketteaut P.H., Naefagy M.H.* Potassium-calcium exchange equilibria in soils. The location of nonspecific sites // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1967. V. 18. № 2. P. 73–77.
17. *Иванов А.И., Иванов И.А., Воробьев В.А., Лямцева Е.Г.* Изменение калийного состояния хорошо окультуренной дерново-подзолистой почвы при применении калийдефицитной системы удобрения // *Агрохимия*. 2009. № 4. С. 21–26.
18. *Niederbudde E.A., Becker N.N., Schon H.* Wanderungen von Eigenschaften einer Schwarzerde – Parabraunerde als Folge von Stallmist und Mineraldüngung // *Landwirt. Forschung*. 1977. V. 30. № 1. P. 29–45.
19. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Трансформация состава и свойств хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава. СПб.: АФИ, 2011. 108 с.

20. Якименко В.Н. Фиксация и десорбция калия некоторыми автоморфными почвами // *Агрохимия*. № 2. 1995. С. 12–18.
21. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 230 с.
22. Забавская К.М. Фиксация калия разными почвами и выделенными из них механическими фракциями // *Агрохимия*. 2007. № 7. С. 38–42.
23. Ефимов В.Н., Иванов А.И. Скрытая деградация хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв России // *Агрохимия*. 2001. № 6. С. 5–10.
24. Петербургский А.В., Никитишин В.И., Шабеев В.П. Потери питательных веществ из почвы и внесенных удобрений вследствие вымывания // *Агрохимия*. 1976. № 7. С. 144–155.

Study of Indicators of Soil Fertility of Cultivated Sod-Podzolic Sandy Soil at Different Stages of Formation of Natural Ecosystems

A.V. Litvinovich^{a,#}, A.S. Fomina^b, O.Y. Pavlova^a, A.V. Lavrishchev^b, and V.M. Bure^{a,c}

^a*Agrophysical Research Institute*

Grazhdansky prosp. 14, Sankt-Petersburg 195220, Russia

^b*Sankt-Petersburg State Agrarian University*

Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia

^c*Sankt-Petersburg State University*

Universitetskaya nab. 6–9, Saint-Petersburg 199034, Russia

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

The changes in the vegetation cover of cultivated sod-podzolic illuvial-ferruginous sandy soil located in the deposit for about 100 years have been traced. The description of the soil profile at different stages of the formation of natural ecosystems is given. It is shown that the positive changes (addition density, content and stocks of various forms of nutrition elements) achieved as a result of 200 years of soil exploitation are gradually lost as the term of cessation of anthropogenic impact increases. Empirical models describing the dynamics of stocks of various forms of potassium, phosphorus and total nitrogen compounds during the transition from arable land to forest have been developed. The data on the rate of loss of individual elements of soil fertility 100 years after the cessation of anthropogenic impact are given. The ranking of the studied indicators according to the rate of loss of batteries for 100 years of soil in the deposit was carried out. According to the average relative rate of decrease in the stocks of batteries (the average rate of decline, logarithmic derivative), all the studied elements form the following ascending series (v): gross phosphorus (0.00052) < gross nitrogen (0.00529) < non-exchangeable potassium (0.008) < water-soluble potassium (0.012) < mobile phosphorus (0.0136) < exchange potassium (0.0185).

Key words: sod-podzolic light loamy soil, deposits of different ages, natural ecosystems, content and stocks of nutrients, empirical models.

УДК 631.83:633.11:631.559:631.582(571.11)

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ ПШЕНИЦЫ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА В ЗЕРНОПАРОВОМ СЕВООБОРОТЕ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЕ КУРГАНСКОЙ ОБЛАСТИ¹

© 2022 г. О. В. Вольнкина^{1,*}, Е. В. Кириллова¹

¹Курганский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Уральского федерального аграрного научно-исследовательского центра Уральского отделения РАН
641325 Курганская обл., Кетовский р-н, с. Садовое, ул. Ленина, 9, Россия

*E-mail: volynkina.o@bk.ru

Поступила в редакцию 26.10.2021 г.

После доработки 12.12.2021 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Представлены 20-летние данные урожайности яровой мягкой пшеницы и качества зерна при ее выращивании в зернопаровом севообороте (пар и 3 пшеницы без вспашки) в 2001–2020 гг. Изменения показателей по годам свидетельствовали о сильном воздействии на них погодных условий периода вегетации растений. Урожайность зерна и его качество у пшеницы в первом поле после пара были существенно выше, чем в следующих 2-х полях. Фосфорное удобрение вносили в севообороте под каждый из 3-х посевов, азотное – только под 2-ю и 3-ю пшеницу после пара, но на первый посев это внесение оказывало последнее действие. Применение удобрений стабилизировало повышение урожайности и улучшение качества зерна, если азот вносили вместе с фосфором.

Ключевые слова: зернопаровой севооборот, яровая мягкая пшеница, урожайность, физические свойства зерна, белковость зерна, сила муки, хлебопекарные качества, поля севооборота.

DOI: 10.31857/S0002188122060138

ВВЕДЕНИЕ

Потенциал урожайности яровой мягкой пшеницы и качества ее зерна определяется генотипом сорта и условиями роста растений. Разными авторами приводится степень влияния каждого из этих факторов на многочисленные показатели качества пшеницы. Например, в работах [1, 2] показано, что такой важный показатель как содержание белка в зерне на 63–66% зависел от условий роста, накопление клейковины в зерне – на 43–38%.

По уровню качества пшеница делится на 3 группы: сильная, средней силы и слабая. Сила муки – условный термин, он отражает состояние белково-протеазного комплекса и определяет

хлебопекарное достоинство пшеницы. Сильная мука с показателем силы 200 ед. альвеографа и более содержит много белков, которые медленно поглощают воду, но в большем количестве. При этом тесто обладает высокой газодерживающей способностью, хлеб имеет большой объем, оптимальную пористость и правильную форму. Мука средней силы образует тесто с хорошими реологическими свойствами, оно упруго и эластично. Хлеб имеет форму и качество, отвечающее требованиям стандарта. Слабая мука имеет излишнюю растяжимость клейковины и образует тесто с малой упругостью и повышенной липкостью, хлеб бывает при этом обычно с низким объемом и недостаточной пористостью [3–5].

Для накопления белка в зерне пшеницы требуются оптимальные условия питания, особенно азотного [6]. Поэтому у пшеницы, размещенной после паровых полей, чаще всего качество зерна высокое [7, 8]. Запас питательных веществ в зависимости от распределения осадков в течение вегетации расходуется в большей мере на формирование урожая или качества пшеницы. В засушливые годы меньше урожай, но зерно получают с

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, рационального применения пестицидов и биопрепаратов, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

повышенной белковостью зерна, во влажные – больше сбор зерна пшеницы при худшем ее качестве [9, 10]. На богатых агрофонах при благоприятном распределении осадков и температурного режима воздуха в течение вегетации возможно сочетание высокого урожая пшеницы с качеством зерна на уровне требований к 3-му классу [6, 11]. Цель работы – изучение влияния применения удобрений на урожайность пшеницы и качество зерна в зернопаровом севообороте в центральной зоне Курганской обл.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – филиале УрФАНЦ УрО РАН – в лабораториях агрохимии и земледелия.

Стационарный опыт с 4-польным зернопаровым севооборотом (пар и 3 пшеницы без вспашки) заложен в 2000 г. на базе стационара с 4-польным зернопаровым севооборотом пар–пшеница–пшеница–овес при ежегодной вспашке, где исследования вели в течение 7-ми ротаций в 1971–1999 гг. С устранением вспашки и урожайного овса продуктивность севооборота снизилась. В Курганской и других областях с конца 1990-х гг. началось распространение новой, нетрадиционной технологии возделывания пшеницы на стерневых фонах. В настоящее время в области до 50% посевов пшеницы размещают после оставленной с осени стерни. С 2000 г. в опыте был осуществлен переход к возделыванию пшеницы без вспашки. Первую пшеницу после пара выращивают при применении 5-ти мелких обработок почвы, а следующие 2 культуры – после стерни.

Почва на участке опыта – выщелоченный чернозем, маломощный малогумусный среднесуглинистый с содержанием гумуса в контроле в слое 0–20 см – 4.5% и подвижных соединений (мг/кг): P_2O_5 – 40 (низкое), K_2O – 250–350 (высокое). Применяли фосфорное удобрение – аммофос, азотное – аммиачную селитру. Удобрения вносили перед посевом дисковой сеялкой СЗ-3,6 на глубину 4 см. Изучение состава удобрения предусматривало сравнение одностороннего фосфорного удобрения P20 и азотного в дозе N40 под 2-ю пшеницу после пара, N60 – под 3-ю пшеницу и применения тех же доз азота совместно с P20. Исследования вели в 2-х закладках с 2000 и 2001 гг. в стационарах 2 и 4. В настоящее время сохранен опыт 2, а стационар 4 законсервирован с 2019 г., но имеющиеся данные опыта 4 использованы для анализа урожайности и качества зерна пшеницы.

Площадь делянки (m^2): общая 300 (6 × 50), учетная 110 (2.2 × 50). Повторность в опыте трехкратная. Использовали сорта пшеницы: Терция в 2001–2011 гг., Зауралочка – в 2012–2020 гг. Оба сорта из среднеспелой группы, они включены в список ценных пшениц. Сев во всех 3-х полях вели стерневой сеялкой СКП-2,1 с сошником культиваторного типа. Учет урожая пшеницы проводили напрямую комбайном Samro-500 с отбором образца зерна для определения влажности и сорности бункерной массы.

Погодные условия за 20-летний период характеризовались повторением засухи в течение 8 лет при ГТК за май–август 0.30–0.80. В эти годы осадки июня снижались до 6–38 мм. Благоприятных по увлажнению было всего 5 лет, когда в главный период формирования урожая – июнь выпадало 48–122 мм осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ имеющихся данных урожайности и качества зерна пшеницы в зернопаровом севообороте показал, что положительное действие пара на продуктивность растений и белковость зерна заметно уменьшалось с удалением посева от парового поля. Например, накопление в зерне клейковины на уровне ценной пшеницы $\geq 23\%$ в 1-м посева после пара в контроле достигалось почти ежегодно за исключением 2016 г. с поражением растений стеблевой ржавчиной. Таким же было качество зерна в этом поле и на фоне последствия азотного удобрения, внесенного во 2-м 3-м посевах после пара. Внесение P20 без применения азота и в сочетании с последствием N40–60 оказало более сильное влияние на урожайность 1-й пшеницы, особенно во влажном 2017 г. при сборе зерна в этих вариантах 40 ц/га. Но этот высокий урожай пшеницы после пара ограничил достижение качества зерна до 3-го класса, что было для 1-го посева вторым случаем, когда на фоне P20 он не был отмечен (табл. 1).

Физические свойства зерна пшеницы по средним величинам показателей качества были достаточно однородными. Масса 1000 зерен была равна 29 г в 1-м и во 2-м посевах после пара и 27–28 г – в 3-м посева. В зависимости от года опыта изменчивость этого показателя была больше. Резкое снижение массы 1000 зерен до 16–18 г у 1-й пшеницы после пара наблюдали в 2016 г. из-за поражения растений стеблевой ржавчиной. Во 2-м посева после пара пшеница тоже была с низкой массой 1000 зерен (20 г) в 2014 г. в связи с неблагоприятным распределением осадков в течение вегетации. За вегетацию выпало (мм): 6 – в мае, 6 –

Таблица 1. Влияние удобрений на урожайность 1–3-й пшеницы после пара и содержание клейковины в зерне (2001–2020 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га			Клейковина, %		
	среднее	изменения	повторяемость показаний 15 ц/га и более, % лет	среднее	изменения	повторяемость показаний 23% и более, % лет
1-я пшеница после пара (10 лет)						
Контроль	18.4	10–38	55	26.4	15–34	90
N40–60	17.8	10–35	55	28.1	18–36	90
P20	20.6	11–40	73	25.5	14–31	80
N40–60P20	20.0	9–41	64	26.8	15–32	80
2-я пшеница после пара (10 лет)						
Контроль	12.8	7–24	30	21.9	12–29	40
N40–60	17.0	9–29	60	25.0	19–33	70
P20	13.4	9–25	30	21.4	12–31	50
N40–60P20	17.7	10–32	60	23.8	14–33	60
3-я пшеница после пара (9 лет)						
Контроль	9.3	6–18	11	18.2	12–27	22
N40–60	14.3	9–26	44	22.4	19–28	44
P20	10.4	6–18	22	17.7	12–29	22
N40–60P20	16.0	10–21	67	20.6	14–28	33
HCP ₀₅	1-я – 1.2, 2-я – 2.0, 3-я – 2.3			1-я – 1.1, 2-я – 1.9, 3-я – 2.2		

Таблица 2. Влияние удобрений на физические свойства зерна 1–3-й пшеницы после пара (2001–2020 гг.)

Вариант	Масса 1000 зерен, г			Натурная масса, г/л		
	среднее	изменения	повторяемость показаний 27 г и более, % лет	среднее	изменения	повторяемость показаний 750 г/л и более, % лет
1-я пшеница после пара (10 лет)						
Контроль	29.2	16–39	70	774	633–824	80
N40–60	26.6	18–36	60	781	665–825	90
P20	29.5	16–37	70	775	633–825	80
N40–60P20	29.2	18–38	70	776	640–825	80
2-я пшеница после пара (10 лет)						
Контроль	29.4	20–37	78	784	682–825	80
N40–60	29.2	20–37	78	787	681–825	90
P20	29.4	21–38	89	785	682–825	80
N40–60P20	29.3	20–36	78	788	694–825	80
3-я пшеница после пара (9 лет)						
Контроль	27.5	22–33	67	780	689–820	89
N40–60	27.9	21–34	78	784	701–824	89
P20	27.2	21–31	67	778	704–810	89
N40–60P20	28.4	21–36	78	776	679–822	89
HCP ₀₅	1-я – 1.0, 2-я – 0.7, 3-я – 0.9			1-я – 5.8, 2-я – 4.1, 3-я – 6.0		

Таблица 3. Влияние удобрений на стекловидность зерна и выход муки 1–3-й пшеницы после пара (2001–2020 гг.)

Вариант	Стекловидность, %			Выход муки, %		
	среднее	изменения	повторяемость показаний 50% и более, % лет	среднее	изменения	повторяемость показаний 70% и более, % лет
1-я пшеница после пара (10 лет)						
Контроль	47	9–92	50	71.8	59–86	60
N40–60	55	16–92	50	69.3	52–89	70
P20	49	12–82	40	70.9	65–84	60
N40–60P20	53	16–96	50	72.1	63–79	70
2-я пшеница после пара (10 лет)						
Контроль	44	10–80	20	63.7	63–78	67
N40–60	47	23–88	10	71.8	66–77	78
P20	42	16–79	10	69.0	61–77	44
N40–60P20	46	27–91	10	71.6	63–75	78
3-я пшеница после пара (9 лет)						
Контроль	30	12–50	11	71.9	65–81	71
N40–60	42	13–63	22	71.5	66–78	71
P20	33	11–56	22	70.4	63–76	43
N40–60P20	42	11–56	22	70.0	63–76	71
<i>HCP</i> ₀₅	1-я – 4.7, 2-я – 4.4, 3-я – 9.7			1-я – 4.9, 2-я – 2.65, 3-я – 3.55		

в июне, 102 – в июле и 20 – в августе. Осадки июля сопровождались массовым появлением подгона, медленно созревающего. В результате даже с проведением десикации учет урожая осенью сделать не удалось, оценку урожая и качества выполнили в снопах. В 3-м посеве после пара низкой массой 1000 зерен отличился тоже 2014 г.

Понижение натурной массы зерна пшеницы до 633–665 г/л в 1-м и 3-м посевах после пара также было связано было с распространением ржавчины и неблагоприятными условиями 2014 г. Отмечено небольшое снижение натурной массы зерна в 2013 и 2020 гг. при недостатке осадков в июне и июле, тем не менее в течение 80–90% лет опыта этот показатель соответствовал норме (750 г/л) во всех 3-х посевах (табл. 2).

Менее стекловидным зерно обычно было во влажные годы, особенно при обилии осадков в период созревания (2001 и 2020 гг.). Четко проявилась закономерность снижения частоты достижения стекловидности 50% с удалением посева от пара. Если у 1-й пшеницы повторяемость этой величины показателя составила 40–50% лет, то в следующих полях – лишь в 10–22% лет (табл. 3).

Выход муки желательнее иметь $\geq 70\%$, что повторилось в контроле для 3-х посевов в 60, 67 и

71% лет. Отмечено, что в варианте с односторонним применением фосфорного удобрения желаемый выход муки был лишь в 43–44% лет, а с добавлением к фосфору азота повышался до 70–78% лет.

Еще ярче различия в зависимости от поля севооборота были отмечены для величины силы муки. Например, в контроле сила муки 200 ед. альвеографа и более повторилась в 56% лет в 1-м посевах, а для 2-го и 3-го посевов – только в 44 и 14% лет соответственно. В 1-м посевах проявилось положительное последствие азота, примененного на 2-й и 3-й пшенице после пара, что отмечено в 78% лет при одностороннем внесении азота и в 67% лет – на фоне внесения азотно-фосфорного удобрения.

Аналогичная закономерность показана и для изменений в зависимости от поля севооборота объемного выхода хлеба из 100 г муки. Без удобрения величина этого показателя 600 мл и более отмечена в 80% лет для 1-го посева и 78 и 57% лет – для следующих посевов. Усиление азотного питания растений повышало объем хлеба в 1-м посевах при последствии азота и 3-м посевах – при применении дозы N60 (табл. 4).

Таблица 4. Влияние удобрений на силу муки и объемный выход хлеба 1–3-й пшеницы после пара (2001–2020 гг.)

Вариант	Сила муки, е.а.			Объемный выход хлеба, мл		
	среднее	изменения	повторяемость показаний 200 е.а. и более, % лет	среднее	изменения	повторяемость показаний 600 мл и более, % лет
1-я пшеница после пара (10 лет)						
Контроль	281	117–661	56	716	575–910	80
N40–60	233	65–409	78	764	615–905	100
P20	223	76–337	56	739	555–940	90
N40–60P20	235	105–410	67	734	610–875	100
2-я пшеница после пара (9 лет)						
Контроль	199	36–392	44	675	445–895	78
N40–60	176	38–254	56	688	490–995	67
P20	174	32–347	44	660	430–920	78
N40–60P20	173	41–238	67	659	445–865	67
3-я пшеница после пара (7 лет)						
Контроль	133	50–218	14	593	460–765	57
N40–60	142	54–282	14	630	410–765	71
P20	109	50–206	14	595	390–860	57
N40–60P20	126	65–263	28	609	435–750	71
<i>HCP</i> ₀₅	1-я – 59, 2-я – 44, 3-я – 26			1-я – 48, 2-я – 58, 3-я – 54		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в стационарном опыте, заложенном в центральной зоне Курганской обл., показан потенциал урожайности яровой мягкой пшеницы при ее выращивании в 4-польном зернопаровом севообороте без проведения вспашки. На удобренных фонах 3 последовательных посева севооборота характеризовались средней урожайностью зерна 18,4, 12,8, 9,3, при применении азотно-фосфорного удобрения – 20,6, 17,7, 16,0 ц/га соответственно. Накопление клейковинных белков происходило до 26, 22, 18 и 26, 23, 20%. На фоне применения одного азотного удобрения содержание клейковины в зерне было еще больше: 28, 25, 22%. Применение P20 повышало урожайность зерна лишь в 1-м посеве, а на содержание клейковины и многие другие свойства зерна в севообороте оно не оказывало положительного влияния. На качество зерна положительно влияло применение азотного и азотно-фосфорного удобрений.

На изменчивость по годам урожайности и белковости зерна влияли как погодные условия, так и удобрения. Если по показателю содержания клейковины получение ценной пшеницы (3-го класса) в посеве 1-й пшеницы после пара на фонах без удобрения и с применением азота было одинаковым в течение 90% лет, то в посеве 2-й пшеницы после пара на этих двух фонах различия

были больше – 40 и 70% лет и в посеве 3-й пшеницы – 22 и 44% лет. Стекловидность зерна на уровне 50% в контроле сильно отличалась в зависимости от поля севооборота: 50, 20, 11% лет, как и величина выхода муки 70% – 60, 67, 71% лет соответственно. Эти признаки качества зерна пшеницы менялись и в зависимости от применения удобрений, повышаясь при внесении азота и азота с фосфором.

На хлебопекарные свойства пшеницы положительное влияние азота проявилось в 1-м и 3-м посевах после пара, изменяя соответствие норме для ценной пшеницы с 80 и 57% лет в контроле до 100 и 71% лет. У 2-й пшеницы после пара эта закономерность больше относилась к изменению силы муки, чем к объемному выходу хлеба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фирюлин А.И., Кошеляев В.В.* Урожайность и качество зерна яровой мягкой пшеницы в зависимости от сорта и удобрений // Земледелие. 2007. № 3. С. 29–31.
2. *Василова Н.З., Асхадуллин Д.-л.Ф., Асхадуллин Д.-р.Ф., Багавиева Э.З., Тазутдинова М.Р., Насихова Г.Р., Хусаинова И.И.* Формирование качества зерна сортов яровой мягкой пшеницы // Достиж. науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 11. С. 42–44.

3. Пенс Дж.В., Ниммо К.К., Хенберн Ф.Н. Белки // Пшеница и оценка ее качества. М.: Колос, 1968. С. 405–456.
4. Блоксма А.Х., Глинка И. Основные понятия о свойствах теста // Пшеница и оценка ее качества. М.: Колос, 1968. С. 119–241.
5. Вакар А.Б., Колпакова В.В. Роль глиаина и глютеина в формировании качества клейковины // Проблема повышения качества зерна. Научн. тр. ВАСХНИЛ / Под ред. В. Н. Ремесло, А. А. Созинова. М.: Колос, 1977. С. 56–65.
6. Волюнкина О.В., Волюнкин В.И. Рекомендации по технологии выращивания высококачественного зерна ценных и сильных сортов яровой мягкой пшеницы в Курганской области и формированию товарных партий ценной пшеницы. Куртамыш: ООО “Куртамышская типография”, 2014. 88 с.
7. Митрофанов Д.В. Химический состав и технологические показатели качества зерна яровой мягкой и твердой пшеницы в зернопаровых севооборотах на пахотном склоне Оренбургского Зауралья // Бюл. Оренбург. Научн. центра УрО РАН. 2019. № 4. С. 3–9.
8. Абдрашитов Р.Х., Шапилова Н.А. Потенциал урожайности и качество сортов яровой пшеницы по черному пару в восточном опорном пункте на базе ОПХ “Советская Россия” Оренбургского НИИСХ // Технологические приемы возделывания зерновых культур на Южном Урале. М.: РАСХН, 2005. С. 60–74.
9. Кинчаров А.И. Научные методы повышения и стабилизации урожайности и качества продукции сельскохозяйственных культур в засушливых регионах // Сб. мат-лов Международ. научн.-практ. конф. “Научное обоснование системы повышения продуктивности и качества зерновых и кормовых культур в засушливых регионах”. Казань, 2016. С. 73–79.
10. Сандакова Г.Н. Модели погодных условий и агротехнических приемов возделывания для формирования высококачественного зерна яровой мягкой пшеницы в центральной зоне Оренбургской области // Изв. Оренбург. ГАУ. 2015. № 4 (54). С. 24–27.
11. Кошкин Е.И. Возможно ли сочетание высокой урожайности и качества урожая полевых культур // Агрохимия. 2018. № 6. С. 89–98.

Effect of Fertilizers on Wheat Yield and Grain Quality in a Cereal Fallow Rotation in the Central Zone of Kurgan Oblast

O.V. Volynkina^{a,#} and E.V. Kirillova^a

^aKurgan Research Institute of Agriculture – branch of the Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the RAS
ul. Lenina 9, Kurgan region, Ketovsky district, s. Sadovoye 641325, Russia

[#]E-mail: volynkina.o@bk.ru

20-year data on the yield of spring soft wheat and grain quality during its cultivation in the grain-pair crop rotation (pairs and 3 wheat without plowing) in 2001–2020 are presented. Changes in indicators over the years indicated a strong impact on them of the weather conditions of the growing season of plants. Grain yield and its quality in wheat in the first field after steam were significantly higher than in the next 2 fields. Phosphorus fertilizer was applied in the crop rotation for each of the 3 crops, nitrogen fertilizer – only for the 2nd and 3rd wheat after steam, but this application had an aftereffect on the first sowing. The use of fertilizers stabilized the increase in yield and improved grain quality if nitrogen was introduced together with phosphorus.

Key words: grain-steam crop rotation, spring soft wheat, yield, physical properties of grain, protein content of grain, flour strength, baking qualities, crop rotation fields.

УДК 581.14:577.175.152:631.811.1./2.

СВЯЗЬ УДЛИНЕНИЯ КОРНЯ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ С АБК-ЗАВИСИМЫМ ТРАНСПОРТОМ ЦИТОКИНИНОВ ИЗ КОРНЕЙ В ПОБЕГИ ПРИ СВЕРХОПТИМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ НИТРАТОВ И ФОСФАТОВ¹

© 2022 г. Л. Н. Тимергалина^{1,*}, Л. Б. Высоцкая¹¹Уфимский институт биологии УФИЦ РАН
450054, Уфа, просп. Октября, 69, Россия

*E-mail: leinaz@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2021 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Известно, что регуляция удлинения корней важна для усвоения растениями минеральных питательных веществ, а фитогормоны цитокинины и абсцизовая кислота (АБК) и их взаимовлияние важны для контроля удлинения корней при изменении доступности ионов. Однако их роль в регуляции ростовой реакции на сверхоптимальные концентрации нитратов и фосфатов изучена недостаточно и является предметом изучения в настоящем исследовании. Влияние сверхоптимальных концентраций нитрат- и фосфат-ионов на удлинение корней и распределение цитокининов между корнями и побегами были изучены у мутанта ячменя Az34 с дефицитом АБК и его родительского сорта Steptoe. Концентрацию цитокининов в клетках растущих кончиков корней анализировали иммуногистохимическим методом. Сверхоптимальные концентрации нитратов и фосфатов приводили к накоплению АБК и цитокининов в кончиках корней, что сопровождалось снижением содержания цитокининов в побегах и ингибированием роста корней растений сорта Steptoe. У мутанта Az34 не был обнаружен ни один из этих эффектов, что свидетельствовало о важности способности растений аккумулировать АБК для контроля этих реакций. Поскольку известно, что цитокинины ингибируют удлинение корней, влияние сверхоптимальных концентраций нитратов и фосфатов на рост корней, вероятно, связано с накоплением цитокининов, вызванным АБК-индуцированным ингибированием транспорта цитокининов от корней к побегам.

Ключевые слова: ячмень *Hordeum vulgare* L., мутант ячменя Az34, абсцизовая кислота (АБК), цитокинины, минеральное питание, удлинение корней.

DOI: 10.31857/S0002188122060114

ВВЕДЕНИЕ

Растения ведут прикрепленный образ жизни. Ограниченность места их произрастания компенсируется способностью корневой системы к быстрому росту, что очень важно для оптимизации усвоения питательных веществ. Нитраты являются преобладающей формой азота, обладают высокой подвижностью и поэтому часто выщелачиваются в нижние слои почвы. В этих условиях эффективное их усвоение зависит от быстрого удлинения корней, увеличивающего глубину укоренения [1, 2]. Однако быстрое удлинение корней не всегда выгодно, поскольку находящиеся в поверхностных слоях почвы корни позволяют полу-

чать ресурсы верхнего почвенного слоя, состоящие из немобильных фосфатов. В этом случае более выгодной стратегией становится замедление роста корней в толще почвы. Таким образом, адекватные изменения удлинения корней важны для адаптации растений к изменяющейся корневой среде, и важно понимать, как растения ощущают концентрацию ионов в почве, и как эти сигналы преобразуются в изменения длины корней.

Доступность минеральных питательных веществ влияет на концентрацию гормонов в растениях. В свою очередь гормоны растений регулируют многочисленные процессы, включая рост и развитие. Поэтому считается, что гормоны действуют как посредники в реакциях растений на доступность питательных веществ. Цитокинины

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-04-00305.

(ЦК) при этом играют особую роль как часть нитратной сигнальной системы [3, 4]. Было показано, что дефицит нитратов снижает экспрессию генов изопентенилтрансферазы (ИПТ) [5], ответственной за синтез ЦК [6], и наоборот – добавление N в среду, содержащую недостаточно N, приводило к усилению регуляции этих генов [7]. Эти реакции зависели от функции нитратных сенсоров (NRT1), называемых трансцепторами из-за их двойной функции: в качестве переносчика N и рецепторов [8]. Этот вывод был основан на экспериментах с мутантами, характеризующимися нарушением функции NRT1 и отсутствием изменений либо в экспрессии генов ИПТ [9], либо в содержании корневых ЦК [10] в условиях дефицита N.

Дефицит не только N, но также и фосфатов (P) влиял на экспрессию генов ИПТ [11] и содержание ЦК в растениях [12], вовлекая эти гормоны в реакцию растений на дефицит P. При этом основное внимание было уделено транспорту ЦК от корней к побегам, который действует как сигнал на большие расстояния и контролирует функцию побега в ответ на доступность питательных веществ [13]. Участие гормонов в ростовых реакциях корней привлекало меньше внимания. Тем не менее, снижение уровня корневых ЦК в P- и N-голодающих растениях сопровождалось ускорением роста корней [11, 12, 14]. Поскольку ЦК могут ингибировать удлинение корней [15], снижение их содержания рассматривалось как причина ускоренного роста корней в ответ на дефицит минеральных питательных веществ [16]. Это предположение было подкреплено отсутствием реакции роста корней у мутанта *nrt1-1*, у которого N-голодание не изменило содержание ЦК в корнях [10].

Действие дефицита питательных веществ на содержание гормонов и рост корней изучено хорошо, в отличие от долгосрочных эффектов сверхоптимальной концентрации минеральных питательных веществ. В одном из немногих сообщений было показано накопление ЦК в части корней, подвергнутых воздействию высоких концентраций минеральных питательных веществ, имитирующих локальное внесение удобрений, что сопровождалось ингибированием удлинения корней [14]. Однако механизм этого эффекта оставался неясным.

Абсцизовая кислота (АБК) принимает участие в регуляции реакций доступности минеральных питательных веществ наряду с ЦК. Эксперименты с растениями пшеницы, обработанными флуридоном (ингибитором синтеза АБК), и растениями ячменя с дефицитом АБК показали, что из-

менения концентрации ЦК в ответ на нехватку минеральных питательных веществ зависели от способности растений накапливать АБК [11, 16]. Однако взаимодействие АБК и ЦК в ответ на длительное действие сверхоптимальных концентраций минеральных питательных веществ не изучали.

Высокие концентрации N увеличивали содержание АБК в кончиках корней, что было связано с наблюдаемыми изменениями в росте корней [17]. Тем не менее, нелегко связать величину содержания АБК с изменениями в росте корней из-за несоответствия между результатами, полученными в экспериментах с экзогенной АБК, и экспериментами, связывающими реакцию роста корней с изменениями концентрации эндогенной АБК. Обработка АБК в основном ингибирует удлинение корней [18], в то время как при некоторых условиях накопление эндогенной АБК сопровождалось ускорением роста корней [19, 20]. Это можно объяснить, если принять во внимание взаимодействие АБК с другими гормонами. Однако это делали довольно редко – эксперименты с экзогенной АБК не позволяют строго контролировать накопление и распределение этого гормона в растениях. Использование мутантов с дефицитом АБК позволяет получить представление о механизмах ее действия. Этот подход был успешно использован в случае трансгенного арабидопсиса с дефицитом ЦК. Фенотипирование этих растений подтвердило способность ЦК стимулировать рост побегов и подавлять рост корней растений [15]. Предыдущие эксперименты с АБК-дефицитными растениями ячменя показали зависимость метаболизма ЦК и роста корней от способности P-дефицитных растений накапливать АБК [11]. Цель работы – проверка гипотезы о том, что АБК участвует в контроле роста корней и распределении ЦК между корнями и побегами, выращенными при сверхоптимальной концентрации минеральных питательных веществ. Это было достигнуто путем сравнения роста и содержания ЦК в растениях ячменя с дефицитом АБК и их родительского сорта, подвергнутых воздействию высокой (300%) концентрации раствора Хогланда–Арнона (Х–А). Использовали повышенную концентрацию всех компонентов раствора Х–А, а не отдельных ионов для того, чтобы не нарушать баланс между минеральными питательными веществами, от которого зависит их усвоение растениями [21].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Условия выращивания растений. Семена ячменя *Hordeum vulgare* L. (АБК-дефицитного мутанта

Az34 и его дикого типа сорта Steptoe) стерилизовали в 2%-ном растворе NaClO в течение 10 мин, промывали 1 ч проточной водопроводной водой, раскладывали в один слой на смоченной дистиллированной водой фильтровальной бумаге в контейнере, покрывали его алюминиевой фольгой и помещали на 1 сут для стратификации семян в холодильник при температуре 4°C. Затем контейнер оставался при комнатной температуре еще 1 сут, после чего проростки помещали на плотки из запаянных и связанных вместе стеклянных трубочек на водопроводной воде (200 семян/2 л воды), при освещении 340 мкмоль/с/м², световой период – 14 ч. В возрасте 4 сут проростки переносили на 10%- и 300%-ную питательную среду Х–А. Был выбран 10%-ный раствор, т.к. результаты предыдущих экспериментов показали, что он был оптимальным для роста растений этого возраста [20]. Через 2 сут после переноса на питательные среды Х–А растения в возрасте 6 сут были взяты для анализа гормонов и транспирации. Ростовые показатели измеряли у 8-суточных растений.

Обработка карбонилцианид-м-хлорфенилгидразоном. Для ингибирования вторичного активного трансмембранного транспорта [22] карбонилцианид-м-хлорфенилгидразон (**КЦХГ**) добавляли в питательный раствор 6-суточных растений для получения концентрации 10 мкМ. Корни и побеги отбирали для анализа гормонов через 1 ч после начала обработки КЦХГ.

Сбор ксилемного сока. Для сбора ксилемного сока побеги ячменя отрезали под водой и соединяли побеги с корнями тонкими силиконовыми трубками [16]. Сравнение скорости транспирации интактных и соединенных после разрезания трубками растений показало, что эта процедура не оказывала существенного влияния на транспирацию в течение 10 мин. После 10 мин сбора корневого экссудата трубки отсоединяли и перенесенный в пробирки корневого экссудат взвешивали, замораживали в жидком азоте и хранили при -80°C для очистки, разделения на ТСХ и определения концентрации ЦК с помощью иммуноанализа (**ИФА**). Доставку ЦК из корней в побег рассчитывали путем умножения измеренной концентрации ЦК на скорость транспирации.

Определение скорости транспирации. Транспирацию определяли гравиметрическим методом. Для этого растения помещали в пластиковые стаканы (по 10 растений в стакан), накрывали фольгой, чтобы предотвратить испарение с поверхности раствора, и взвешивали каждые 15 мин. По разнице в весе стакана рассчитывали количество

воды, потраченное на транспирацию (мг воды/растение/ч).

Экстракция и очистка гормонов. Гормоны экстрагировали из гомогенизированных тканей побегов и корней растений ячменя 80%-ным этанолом в течение ночи при 4°C. ЦК и АБК экстрагировали различными способами из аликвот водного остатка как описано в работе [11]. ЦК концентрировали на колонке C18 (Waters, Милфорд, США), промывали водой и элюировали 5 мл 80%-ного этанола, который упаривали досуха. Осадок растворяли в 20 мкл этанола и наносили на покрытые силуфолом 60 (F-254 толщиной 0.25 мм) пластины размером 5 × 20 см (Merck, Дармштадт, Германия). Разделение оснований ЦК и их производных проводили в системе растворителей: бутанол : аммиак : вода = 6 : 1 : 2. Эта процедура позволила выделить и проанализировать нуклеотид зеатина (**ZN**, Rf 0–0.1), рибозид зеатина (**ZR**, Rf 0.4–0.5), зеатин (**Z**, Rf 0.6–0.7) [23]. Затем элюаты из зон, соответствующих положению стандартов ЦК, подвергали **ИФА**.

АБК экстрагировали диэтиловым эфиром из водного остатка после его разбавления дистиллированной водой и подкисления до pH 2.5 раствором 1 н. HCl. Затем гормоны переносили из органической фазы в раствор NaHCO₃, повторно экстрагировали из подкисленной водной фазы диэтиловым эфиром, метилировали диазометаном и подвергали **ИФА** [20]. Уменьшение количества экстрагента на каждой стадии и повторная экстракция повышали селективность извлечения гормонов [24].

Иммуноанализ. **ИФА** зеатина, его рибозида и нуклеотида из растительных тканей и сока ксилемы проводили с использованием сыворотки, полученной против рибозида зеатина (**ZR**), которая, как было показано, обладает высокой специфичностью к производным зеатина [22]. Перекрестная реактивность сыворотки против **ZR** к производным других оснований ЦК (дигидрозеатина и изопентениладенина) низкая. Достоверность метода была подтверждена результатами физико-химического анализа [22].

Для **ИФА** АБК использовали соответствующие антитела. Перекрестная реактивность антител к АБК, фазеевой кислоте и ксантоксину составила 100, 0.1 и 0.001% соответственно.

ИФА проводили по протоколу, в котором конъюгат **ZR** или АБК с овальбумином абсорбируется на твердую фазу (лунки микропланшета). В каждую лунку добавляли стандарт или образец, а также специфическую сыворотку и инкубировали. Несвязанные кроличьи антитела смывали,

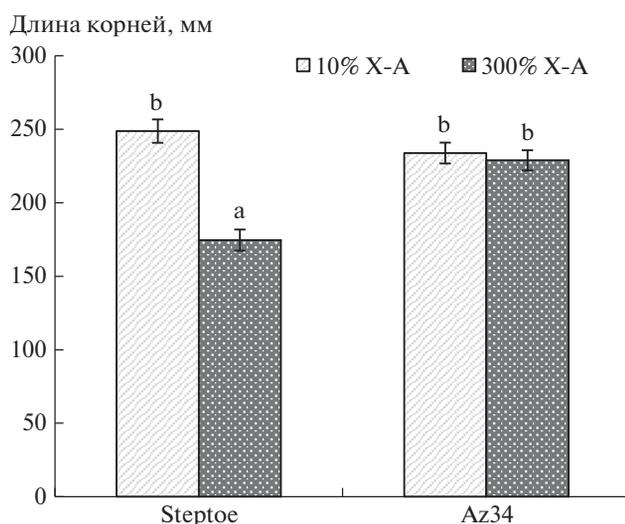


Рис. 1. Суммарная длина корней 8-суточных растений ячменя сорта Steptoe и мутанта Az34, выращенных в 10%- и 300%-ном растворе X-A. Представлены средние \pm SE. Статистически разные средние ($n = 20$) обозначены разными буквами ($P < 0.05$, ANOVA, тест Дункана). То же на рис. 2–6.

и козий анти-кроличий IgG, конъюгированный с пероксидазой, инкубировали с адсорбированным комплексом антиген–антитело. Все лунки снова промывали и добавляли раствор субстрата, содержащий *o*-фенилендиамин. Цветовую реакцию количественно измеряли на микрофотометре при длине волны 492 нм.

Иммунолокализация ЦК в кончиках корней. Для иммунолокализации ЦК конъюгировали с белками цитоплазмы, чтобы предотвратить их вымывание в процессе обезвоживания. В частности, свободные ЦК основания в тканях кончиков корней длиной 5 мм фиксировали в смеси 4% параформальдегида (Ридель–Деен, Зельце, Германия) и 0.1% глутарового альдегида (Sigma, Штайнхайм, Германия), как описано в [22]. После промывания 0.1 М фосфатным буфером (ФБ) ткани обезвоживали в серии разведений этанола. После этого ткани были погружены в метакрилатную смолу JB-4 (Electron Microscopy Sciences, Хатфилд, Пенсильвания, США). Иммунолокализацию гормонов проводили с использованием сыворотки против ZR. Гистологические срезы толщиной 1.5 мкм были получены с помощью ротационного микротомы (HM 325, MICROM Laborgerate, Германия). После нанесения блокирующего раствора (0.1 М ФБ, содержащего 0.2% желатина и 0.05% Твина-20) в течение 30 мин корневые срезы инкубировали с разбавленной кроличьей сывороткой против ZR (разведение 1 : 80) в течение ночи при 4°C. За-

тем слайды трижды промывали в 0.1 М ФБ с 0.05% Tween-20 и наносили вторичные антитела IgG против кролика, конъюгированные с Alexa Fluor 555 (Invitrogen, Рокфорд, США), в течение 3 ч при 37°C. Затем срезы снова 5 раз промывали ФБ, покрывали и затем визуализировали с помощью конфокальной микроскопии с помощью FV3000 Fluoview (FV31-HSD) (Токио, Олимп, Япония). Флуоресценцию снимали при длине волны возбуждающего лазера 561 нм и эмиссии 568 нм. Ранее специфичность и надежность использования антител при иммуногистохимической локализации гормонов были подтверждены в экспериментах с обработкой растений экзогенными гормонами [24] или с использованием трансгенных растений с индуцированной экспрессией гена *ipt*, контролирующего синтез ЦК [25] (положительный контроль). В качестве контроля использовали неиммунную кроличью сыворотку, и отсутствие иммунного окрашивания при замене сыворотки против ZR на неиммунную сыворотку подтвердило надежность метода. Среднюю интенсивность флуоресценции изображений, полученных с помощью конфокального микроскопа, оценивали с помощью программного обеспечения ImageJ (Национальные институты здравоохранения, Бетесда, Мэриленд, США <https://imagej.nih.gov/ij>). Флуоресценцию выражали в произвольных единицах, при этом максимальную окрашивающую флуоресценцию принимали за 100%, минимальную – за 0%.

Статистический анализ. Данные были обработаны с использованием программного обеспечения Statistica версии 10 (Statsoft, Москва, Россия). На рисунках и таблицах данные представлены в виде среднего со стандартной ошибкой (SE). Значимость различий оценивали с помощью ANOVA с последующим тестом Дункана ($p < 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Количество первичных корней было одинаковым у растений ячменя обоих генотипов (7–9 шт./растение) и не зависело от концентрации минеральных питательных веществ в растворе. Однако корни растений сорта Steptoe, выращенных на 300%-ном растворе X-A, были короче, чем у растений того же генотипа, выращенных на 10%-ном растворе (рис. 1). Между тем, не было никакой существенной разницы в длине корней растений Az34, выращенных на растворах с различной концентрацией минеральных питательных веществ.

Концентрация ЦК (выраженная в нг/г сырой массы) (рис. 2) и их содержание, рассчитанное на

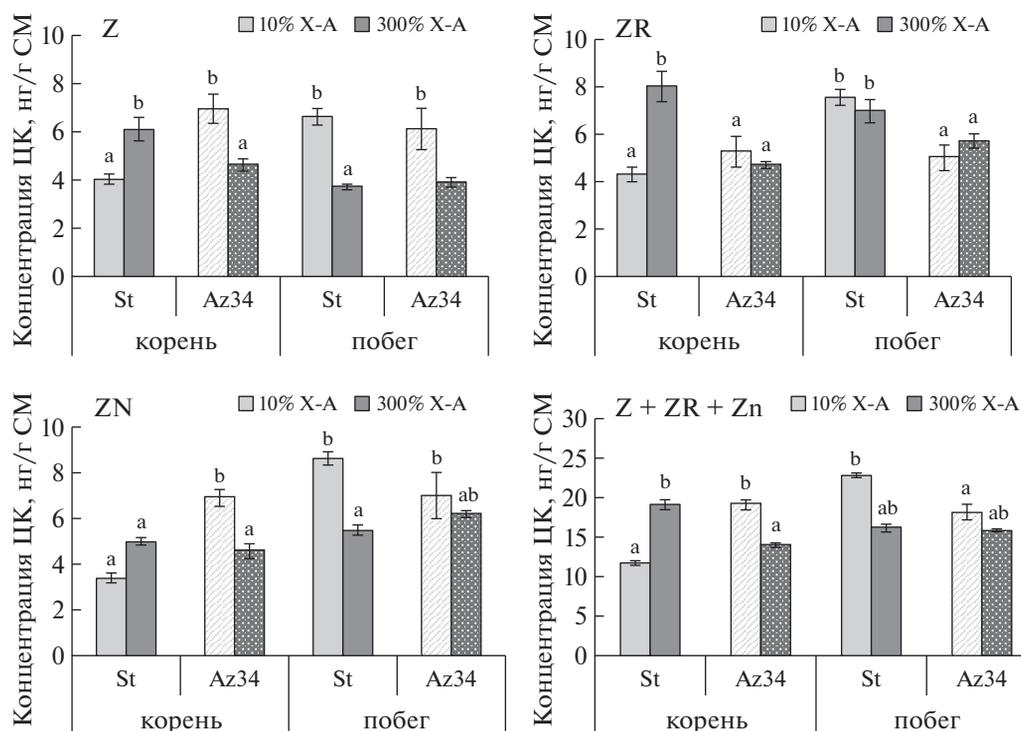


Рис. 2. Концентрация (нг/г сырой массы (СМ)) Z, ZR, ZN в корнях и побегах 6-суточных растений ячменя дикого типа (St) и мутанта Az34, выращенных в 10%- и 300%-ном растворе X–A, $n = 9$.

орган (табл. 1) в корнях растений сорта Steptoe на 300%-ном X–A были больше, чем на 10%-ном X–A. Концентрация Z и ZR также была больше в корнях растений, получавших 300%-ный раствор X–A, по сравнению с 10%-ным раствором X–A, наибольшее увеличение обнаружено в форме ZR. Противоположная картина была обнаружена в побегах растений сорта Steptoe, где концентрация ЦК была больше при более низкой концентрации питательных веществ (рис. 2). В отличие от сорта Steptoe, у растений Az34 на 300%-ном X–A уровень гормона не увеличивался в корнях и не снижался в побегах. Количество Z и ZN было даже снижено при высокой концентрации питательных веществ.

У растений сорта Steptoe при сверхоптимальной концентрации минеральных питательных веществ соотношение содержания ЦК в корне к содержанию ЦК в побеге увеличивалось примерно в 1.5 раза (с 0.18 до 0.28), в то время как для Az34 была выявлена противоположная закономерность.

Обработка растений сорта Steptoe протонофром карбонилцианид-*m*-хлорфенилгидразоном (КЦХГ) предотвращала накопление цитокинина в корнях растений, выращенных в 300%-ном растворе X–A (рис. 3).

Измерение концентрации ЦК в ксилемном соке показало в 1.6 раза более низкий уровень ZR в растениях сорта Steptoe, выращенных на 300%-ном растворе X–A по сравнению с 10%-ным раствором X–A (рис. 4).

По данным проведенных ранее экспериментов, процедура отбора проб ксилемного экссудата

Таблица 1. Содержание цитокининов (нг/орган) в побегах и корнях растений ячменя

Генотип	Среда	Z	ZR	ZN	Z + ZR + ZN
Корни					
St	10% X–A	0.26 ^a	0.28 ^a	0.22 ^a	0.77 ^a
	300% X–A	0.34 ^b	0.46 ^b	0.29 ^b	1.10 ^b
Az34	10% X–A	0.31 ^b	0.23 ^a	0.31 ^b	0.85 ^{ab}
	300% X–A	0.22 ^a	0.22 ^a	0.22 ^a	0.65 ^a
Побеги					
St	10% X–A	1.26 ^b	1.44 ^b	1.65 ^b	4.35 ^a
	300% X–A	0.88 ^a	1.65 ^b	1.30 ^{ab}	3.82 ^b
Az34	10% X–A	1.00 ^{ab}	0.82 ^a	1.15 ^a	3.00 ^a
	300% X–A	0.81 ^a	1.19 ^{ab}	1.29 ^{ab}	3.29 ^a

Примечание. Статистически разные средние показатели для каждого метаболита цитокинина ($n = 9$) обозначены разными буквами ($P < 0.05$, ANOVA, тест Дункана). То же в табл. 2.

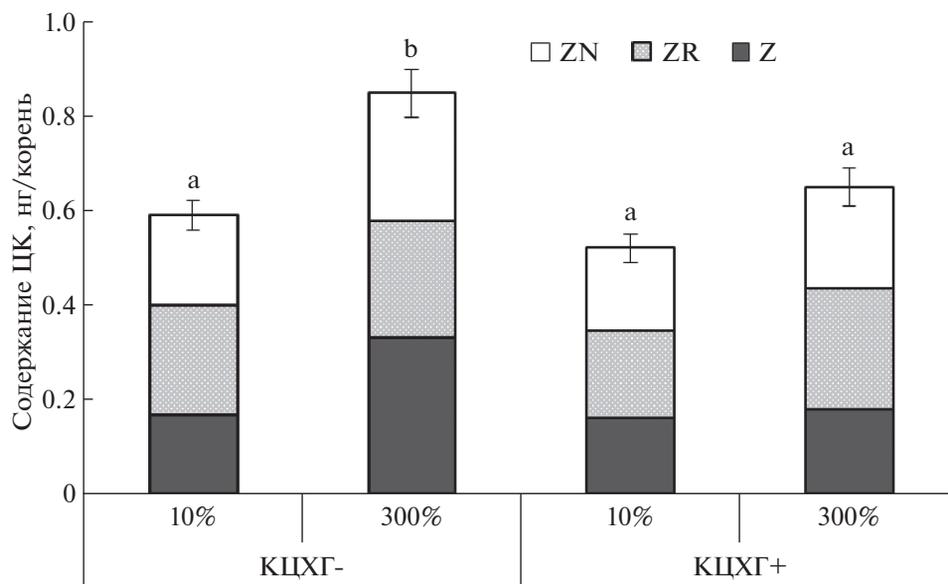


Рис. 3. Суммарное содержание ЦК (Z, ZR и ZN, нг/орган) в корнях 6-суточных растений ячменя сорта Steptoe, выращенных в 10%- и 300%-ном растворе X–A через 1 ч после обработки КЦХГ, $n = 9$.

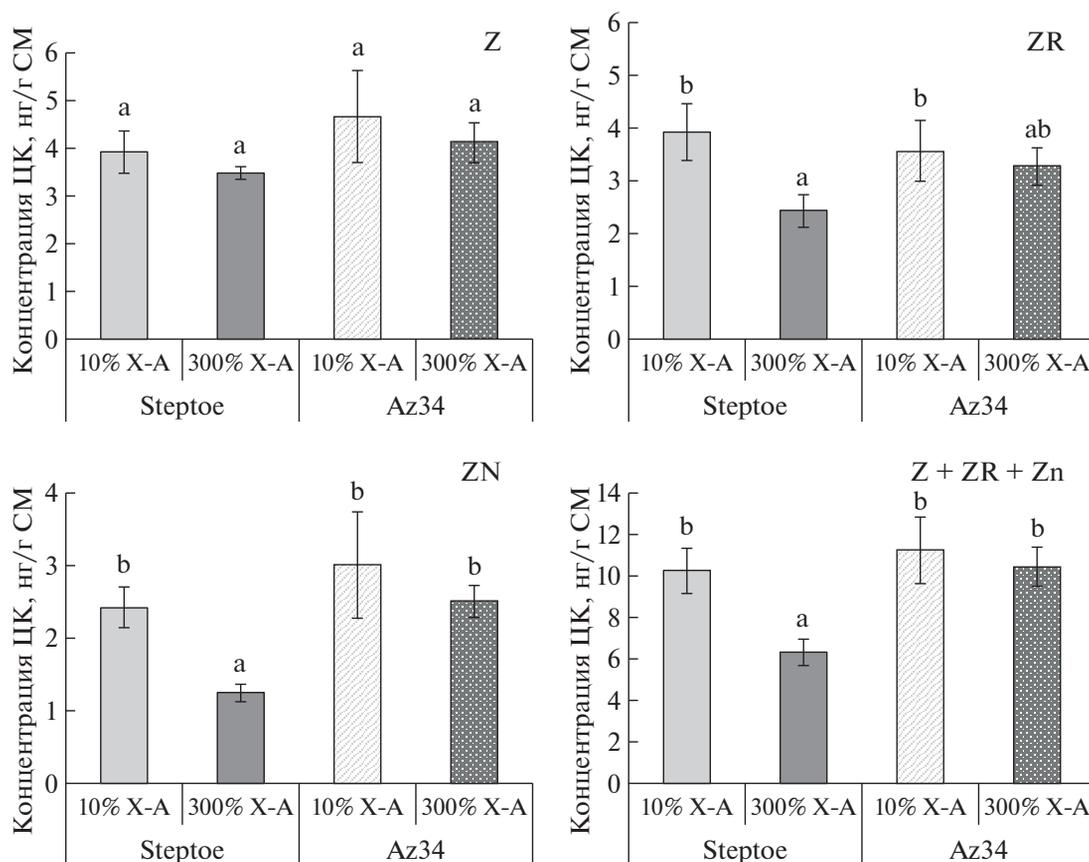


Рис. 4. Концентрация (нг/г сырого массы (СМ)) Z, ZR, ZN в ксилемном экссудате 6-суточных растений ячменя сорта Steptoe и мутанта Az34, выращенных в 10%- и 300%-ном растворе X–A, $n = 9$.

Таблица 2. Транспирация и доставка ЦК из корней в побеги у 6-суточных растений ячменя сорта Steptoe (St) и его мутанта (Az34), растущих на 10%- и 300%-ном растворе X–A

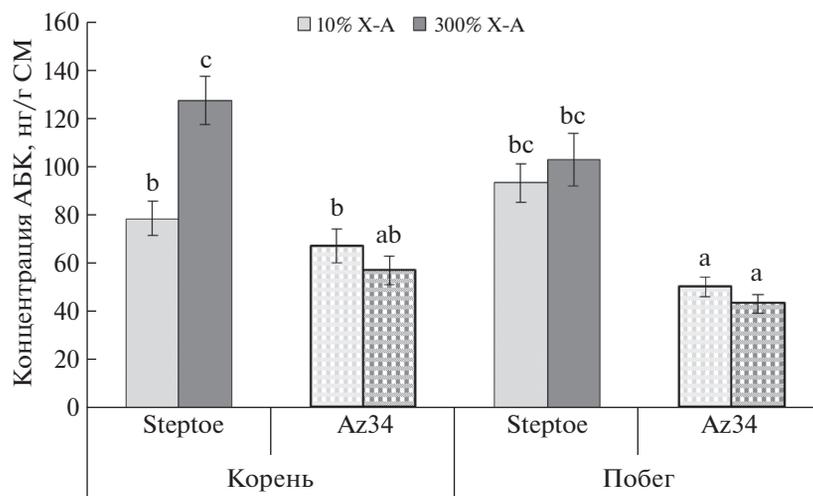
Генотип и среда	Транспирация, мг H ₂ O/ч/растение	Доставка, нг ЦК/ч/растение		
		Z	ZR	ZN
St, 10% X–A	51.6 ± 2.8 ^a	0.20 ± 0.01 ^b	0.20 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.02 ^b
St, 300% X–A	47.7 ± 1.9 ^a	0.17 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.01 ^a
Az34, 10% X–A	61.5 ± 2.7 ^b	0.29 ± 0.02 ^c	0.22 ± 0.03 ^b	0.18 ± 0.01 ^c
Az34, 300% X–A	60.5 ± 2.5 ^b	0.25 ± 0.01 ^{bc}	0.20 ± 0.2 ^b	0.15 ± 0.01 ^{bc}

в течение 10 мин не влияла на скорость транспирации [16]. У растений сорта Steptoe на 300%-ном X–A наблюдали снижение транспирации на 10% (табл. 2). Расчет доставки ЦК производили путем умножения концентрации ЦК в ксилемном соке на скорость транспирации. Обнаружили еще большее (в 1.8 раза) снижение доставки ZR от корней к побегам растений сорта Steptoe, выращенных на 300%-ном растворе X–A по сравнению с 10%-ным раствором. У растений мутанта Az34 концентрация ЦК в ксилемном соке и транспирация при различных уровнях питательных веществ не изменились, что отразилось в неизменной доставке ЦК от корней к побегам.

Как и ожидалось, концентрация АБК была меньше у мутанта Az34, чем у растений сорта Steptoe. Концентрация АБК в корнях была больше у растений Steptoe, выращенных на 300%-ном растворе X–A, по сравнению с 10%-ным раствором, в то время как у растений Az34, выращенных на любом уровне питательных веществ, не было обнаружено существенной разницы в содержании АБК в корнях (рис. 5).

Иммуногистохимическое исследование срезов корней показало повышенную флуоресценцию в случае растений сорта Steptoe, выращенных на 300%-ном X–A по сравнению с 10%-ным X–A (рис. 6а), в то время как у мутанта Az34 не было обнаружено различий во флуоресценции корней растений, выросших при разных уровнях минеральных питательных веществ (рис. 6б). Специфичность метода была подтверждена отсутствием флуоресценции контрольных срезов, обработанных неиммунной сывороткой (рис. 6в, г). Статистическая значимость различия между участками флуоресценции была подтверждена результатами оценки средней интенсивности флуоресценции изображений, полученных с помощью конфокального микроскопа с программным обеспечением ImageJ (рис. 6д).

Укорочение корней растений сорта Steptoe, выращенных на 300%-ном растворе X–A, сопровождалось и, вероятно, было связано с накоплением ЦК, обнаруженных как в целых корнях (рис. 1, табл. 1), так и в их кончиках (рис. 6). Эти результаты согласовались с известным эффектом –

**Рис. 5.** Концентрация АБК в корнях и побегах 6-суточных растений ячменя сорта Steptoe и мутанта Az34, выращенных в 10%- и 300%-ном растворе X–A, n = 9.

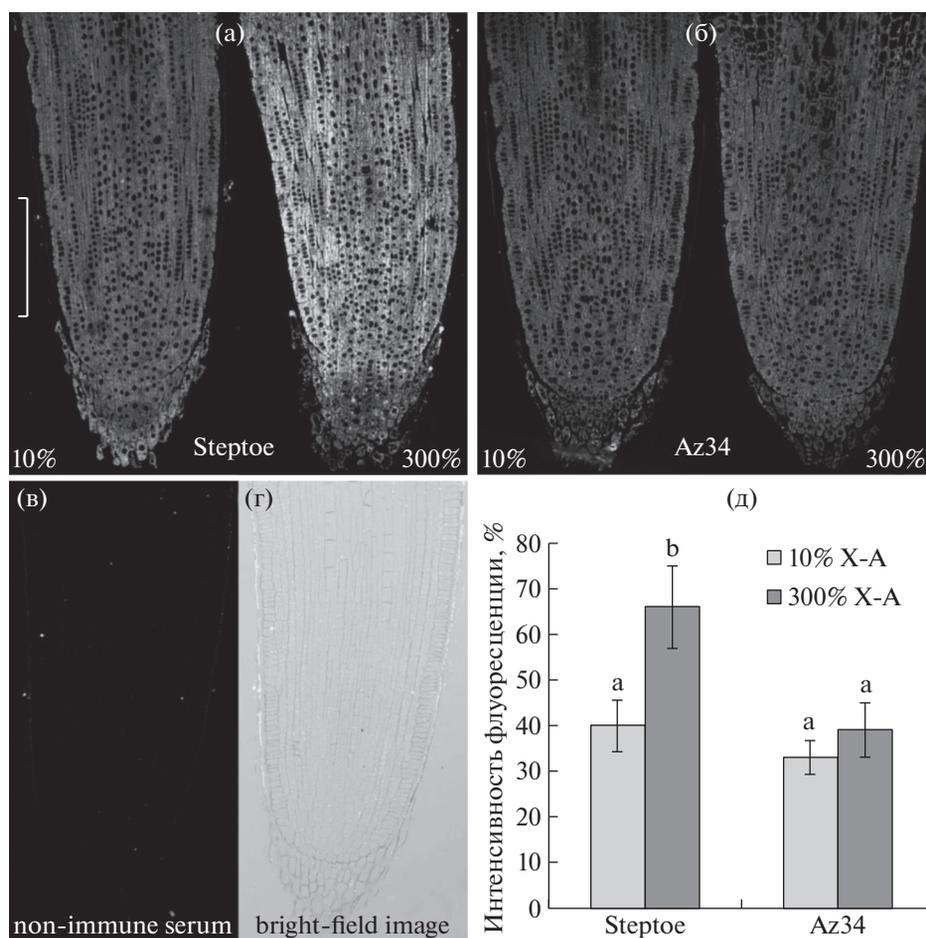


Рис. 6. Локализация цитокининов в кончиках корней растений сорта Steptoe (а) и мутанта Az34 (б), выращенных в 300%- или 10%-ном растворе X–А. Иммуногистохимический контроль с использованием неиммунной сыворотки (в) и изображение кончиков корней в проходящем свете (г). Флуоресценция цитокининов (среднее \pm SE, условные единицы, максимальная флуоресценция принята за 100%, минимальная – за 0%) (д). Шкала 200 мкм, $n = 8$.

ингибирующим действием ЦК на рост корней [26]. Взаимосвязь между ними подтверждена данными о том, что 300%-ный X–А не влиял на длину корня растений мутанта Az34, что, вероятно, было связано с отсутствием у них накопления ЦК. Усиление окрашивания на ЦК, обнаруженное в кончиках корней, выросших на 300%-ном X–А, очень важно для объяснения замедления роста корня, поскольку процесс роста происходит именно в этой его части. Иммуногистохимический метод показал более высокое содержание ЦК как в делящихся, так и в удлиняющихся клетках корня, что соответствовало способности ЦК ингибировать как деление [27], так и удлинение клеток корня [28], что приводило к торможению их роста. Аналогичные результаты были получены ранее в опытах с разделенной корневой системой, помещенной в контейнеры с разной концентрацией ионов, которые показали накопление ЦК в корнях, контактирующих с концентрирован-

ном раствором, что сопровождалось ингибированием их роста [14]. Однако механизм накопления ЦК в этих экспериментах оставался неясным. Настоящий эксперимент показал, что это могло быть связано с ингибированием экспорта ЦК из корней. Обнаружили накопление ЦК в корнях богатых питательными веществами растений сорта Steptoe одновременно со снижением уровня ЦК в их побегах. Кроме этого, пониженная концентрация ЦК, обнаруженная в ксилемном соке этих растений, могла служить прямым доказательством снижения транспорта ЦК из корней. Доставка ЦК от корней к побегам растений ячменя на 300%-ном растворе X–А снижалась даже в большей степени, чем их концентрация, из-за более низкой скорости транспирации (табл. 1). Снижение транспирации этих растений можно объяснить пониженной концентрацией ЦК, обнаруженных в их побегах, поскольку известно, что эти гормоны поддерживают транспирацию [29].

Обычно снижение доставки гормонов от корней к побегам объясняется ингибированием их синтеза в корнях [7]. Однако оно не может быть применено в нашем случае, поскольку накопление ЦК, обнаруженных в корнях растений сорта Steptoe на 300%-ном растворе, свидетельствовало против этого. Открытие переносчиков ЦК [30] позволило объяснить механизм прямой регуляции доставки ЦК от корней к побегам. Ранее было показано, что ингибирование вторичного активного трансмембранного транспорта обработкой протонофором КЦХГ приводило к снижению концентрации ЦК в корнях [24]. В настоящих экспериментах добавление КЦХГ предотвращало накопление ЦК в корнях растений сорта Steptoe на 300%-ной среде X–A, что предполагало участие вторичного активного процесса захвата ЦК клетками корня в накоплении этого гормона в растениях ячменя, выращенных на 300%-ном X–A.

Важно отметить, что ни накопление ЦК в корнях, ни ингибирование их удлинения не обнаружено у мутантов ячменя с дефицитом АБК (рис. 1, 2). Концентрация АБК была меньше в растениях мутанта Az34, чем в растениях сорта Steptoe, и, в отличие от их родительского сорта, концентрация АБК не увеличивалась в корнях растений ячменя на 300%-ной среде X–A (рис. 5). Эти результаты свидетельствовали о важности способности растений накапливать АБК для регуляции корневых ЦК и реакций роста. Есть данные, что высокие концентрации N увеличивают концентрацию АБК в корнях растений кукурузы, что связано с высвобождением свободной АБК из ее конъюгатов [31]. Не исключено, что этот механизм действовал и в настоящем эксперименте. Однако отсутствие значительного накопления АБК в растениях мутанта Az34 со сниженной активностью альдегидоксидазы АБК [32] предполагает участие синтеза АБК в накоплении этого гормона в ответ на сверхоптимальные концентрации минеральных питательных веществ. Было показано, что удаление P из питательного раствора приводило к снижению концентрации ЦК в кончиках корней из-за индуцированного АБК подавления гена HvIPT-1, участвующего в контроле синтеза ЦК корнями растений ячменя [11]. Этот механизм вряд ли будет работать в корнях растений ячменя на 300%-ном X–A, поскольку под действием сверхоптимальной концентрации минеральных питательных веществ концентрация ЦК увеличивалась, а не снижалась. Известно, что N усиливает регуляцию генов IPT как у арабидопсиса, так и у кукурузы [7], и очевидно, что этот эффект преодолевал возможную АБК-индуцированную понижающую регуляцию генов в растениях Steptoe,

растущих на сверхоптимальной питательной среде, что приводило к высокой концентрации цитокининов в корнях растений. Повышенная концентрация АБК, сопровождавшаяся снижением концентрации ЦК, была обнаружена в побегах растений, подвергавшихся воздействию как дефицита N, так и их сверхоптимальной концентрации [33], и эти эффекты, скорее всего, отражают не простое совпадение, а действие АБК на синтез ЦК и их транспорт от корней к побегам. АБК, вероятно, будет действовать по-другому в растениях, богатых питательными веществами, по сравнению с растениями, испытывающими недостаток питательных веществ, ингибируя транспорт ЦК от корней к побегам, что приводит к накоплению ЦК в корнях и ингибированию их удлинения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение эффектов сверхоптимальной концентрации минеральных питательных веществ на мутанте ячменя с дефицитом АБК и его родительском сорте показало зависимость роста корней и цитокининовых реакций от способности растений продуцировать АБК. В растениях сорта Steptoe, способных накапливать АБК, сверхоптимальная концентрация минеральных питательных веществ приводила к снижению экспорта ЦК из корней в побеги, массовому накоплению ЦК в корнях и их повышенному содержанию в растущих кончиках корней, что ингибировало их удлинение. Все эти эффекты отсутствовали у растений ячменя с дефицитом АБК.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП “Агидель”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li X., Zeng R., Liao H.* Improving crop nutrient efficiency through root architecture modifications // *J. Integr. Plant Biol.* 2016. V. 58. P. 193–202.
2. *Lynch J.P.* Root phenotypes for improved nutrient capture: An underexploited opportunity for global agriculture // *New Phytol.* 2019. V. 223. P. 548–564.
3. *Forde B.G.* Local and long-range signaling pathways regulating plant responses to nitrate // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2002. V. 53. P. 203–224.
4. *Ruffel S., Krouk G., Ristova D., Shasha D., Birbaum K.D., Coruzzi G.M.* Nitrogen economics of root foraging: Transitive closure of the nitrate-cytokinin relay and distinct systemic signaling for N supply vs. demand // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. V. 108. P. 18524–18529.
5. *Hirose N., Takei K., Kuroha T., Kamada-Nobusada T., Hayashi H., Sakakibara H.* Regulation of cytokinin biosynthesis, compartmentalization, and translocation. // *J. Exp. Bot.* 2008. № 59. P. 75–83.

6. Takei K., Sakakibara H., Sugiyama T. Identification of genes encoding adenylate isopentenyltransferase, a cytokinin biosynthesis enzyme, in *Arabidopsis thaliana* // J. Biol. Chem. 2001. V. 276. P. 26405–26410.
7. Takei K., Ueda N., Aoki K., Kuromori T., Hirayama T., Shinozaki K., Yamaya T., Sakakibara H. AtIPT3 is a key determinant of nitrate-dependent cytokinin biosynthesis in *Arabidopsis* // Plant Cell Physiol. 2004, № 45.
8. Gojon A., Krouk G., Perrine-Walker F., Laugier E. Nitrate transceptor(s) in plants // J. Exp. Bot. 2011. № 62. P. 2299–2308.
9. Wang R., Xing X., Wang Y., Tran A., Crawford N.M. A genetic screen for nitrate regulatory mutants captures the nitrate transporter gene NRT1.1 // Plant Physiol. 2009. V. 151. P. 472–478.
10. Korobova A.V., Akhiyarova G.R., Fedyaev V.V., Farkhutdinov R.G., Veselov S.Y., Kudoyarova G.R. Participation of nitrate sensor NRT1.1 in the control of cytokinin level and root elongation under normal conditions and nitrogen deficit // Mosc. Univ. Biol. Sci. Bull. 2019. № 74. P. 221–226.
11. Vysotskaya L., Akhiyarova G., Feoktistova A., Akhtyamova Z., Korobova A., Ivanov I., Dodd I., Kuluev B., Kudoyarova G. Effects of phosphate shortage on root growth and hormone content of barley depend on capacity of the roots to accumulate ABA // Plants. 2020. № 9. P. 1722.
12. Vysotskaya L.B., Trekozova A.W., Kudoyarova G.R. Effect of phosphorus starvation on hormone content and growth of barley plants // Acta Physiol. Plant. 2016. V. 38. P. 108.
13. Kudoyarova G.R., Dodd I.C., Veselov D.S., Rothwell S.A., Veselov S.Y. Common and specific responses to availability of mineral nutrients and water // J. Exp. Bot. 2015. V. 66. P. 2133–2144.
14. Korobova A.V., Ivanov I.I., Akhiyarova G.R., Veselov D.S., Kudoyarova G.R., Veselov S.Y. Influence of macroelements' uneven distribution on the content of hormones and extension of the roots in wheat plants // Russ. J. Plant Physiol. 2019. V. 66. P. 748–755.
15. Werner T., Motyka V., Laucou V., Smets R., Van Onckelen H., Schmulling T. Cytokinin-deficient transgenic *Arabidopsis* plants show multiple developmental alterations indicating opposite functions of cytokinins in the regulation of shoot and root meristem activity // Plant Cell. 2003. V. 15. P. 2532–2550.
16. Vysotskaya L.B., Korobova A.V., Veselov S.Y., Dodd I.C., Kudoyarova G.R. ABA mediation of shoot cytokinin oxidase activity: Assessing its impacts on cytokinin status and biomass allocation of nutrient deprived durum wheat // Funct. Plant Biol. 2009. V. 36. P. 66–72.
17. Harris J.M., Ondzighi-Assoume C.A. Environmental nitrate signals through abscisic acid in the root tip // Plant Signal. Behav. 2017. V. 12. e1273303.
18. Li X., Chen L., Forde B.G., Davies W.J. The biphasic root growth response to abscisic acid in *Arabidopsis* involves interaction with ethylene and auxin signalling pathways // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. P. 1493.
19. Spollen W.G., Lenoble M.E., Samuels T.D., Bernstein N., Sharp R.E. Abscisic acid accumulation maintains maize primary root elongation at low water potentials by restricting ethylene production // Plant Physiol. 2000. V. 122. P. 967–976.
20. Vysotskaya L.B., Korobova A.V., Kudoyarova G.R. Abscisic acid accumulation in the roots of nutrient-limited plants: Its impact on the differential growth of roots and shoots // J. Plant Physiol. 2008. V. 165. P. 1274–1279.
21. de Groot C.C., Marcelis L.F.M., van den Boogaard R., Kaiser W.M., Lambers H. Interaction of nitrogen and phosphorus nutrition in determining growth // Plant Soil 2003. V. 248. P. 257–268.
22. Arkhipova T.N., Melentiev A.I., Martynenko E.V., Kudoyarova G.R., Veselov S.U. Ability of bacterium *Bacillus subtilis* to produce cytokinins and to influence the growth and endogenous hormone content of lettuce plants // Plant Soil. 2005. V. 272. P. 201–209.
23. Veselov S.U., Kudoyarova G.R., Egutkin N.L., Gyuli-Zade 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. Plant. 1992. V. 86. P. 93–96.
24. Kudoyarova G.R., Korobova A.V., Akhiyarova G.R., Arkhipova T.N., Zaytsev D.Y., Prinsen E., Egutkin N.L., Medvedev S.S., Veselov S.Y. Accumulation of cytokinins in roots and their export to the shoots of durum wheat plants treated with the protonophore carbonyl cyanide *m*-chlorophenylhydrazone (CCCP) // J. Exp. Bot. 2014. V. 65. P. 2287–2294.
25. Vysotskaya L.B., Akhiyarova G.R., Sharipova G.V., Dedova M.A., Veselov S.Y., Zaitsev D.Y., Kudoyarova G.R. The influence of local IPT gene induction in roots on content of cytokinins in cells of tobacco leaves // Cell Tissue Biol. 2015. № 9. P. 127–132.
26. Werner T., Nehnevajova E., Köllmer I., Novák O., Strnad M., Krämer U., Schmülling T. Root-specific reduction of cytokinin causes enhanced root growth, drought tolerance, and leaf mineral enrichment in *Arabidopsis* and tobacco // Plant Cell. 2010. V. 22. P. 3905–3920.
27. Ivanov V.B., Filin A.N. Cytokinins regulate root growth through its action on meristematic cell proliferation but not on the transition to differentiation // Funct. Plant Biol. 2017. V. 45. P. 215–222.
28. Růžička K., Šimášková M., Duclercq J., Petrášek J., Zažimálová E., Simon S., Friml J., Van Montagu M.C.E., Benková E. Cytokinin regulates root meristem activity via modulation of the polar auxin transport // Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2009. V. 106. P. 4284–4289.
29. Farber M., Attia Z., Weiss D. Cytokinin activity increases stomatal density and transpiration rate in tomato // J. Exp. Bot. 2016. V. 67. P. 6351–6362.

30. *Duran-Medina I., Diaz-Ramirez D., Marsch-Martinez N.* Cytokinins on the Move // *Front. Plant Sci.* 2017. № 8. P. 146.
31. *Ondzighi-Assoume C.A., Chakraborty S., Harris J.M.* Environmental nitrate stimulates abscisic acid accumulation in *Arabidopsis* root tips by releasing it from inactive stores // *Plant Cell* 2016. V. 28. P. 729–745.
32. *Walker-Simmons M., Kudrna D.A., Warner R.L.* Reduced accumulation of ABA during water stress in a molybdenum cofactor mutant of barley // *Plant Physiology*. 1989. V. 90. P. 728–733.
33. *Wilkinson S., Hartung W.* Food production: Reducing water consumption by manipulating long-distance chemical signalling in plants // *J. Exp. Bot.* 2009. V. 60. P. 1885–1891.

Effect of Supra-Optimal Nitrates and Phosphates Concentrations on the Process of Barley Roots Elongation Associated with the ABA-Dependent Transport of Cytokinins from the Roots

L. N. Timergalina^{a,#} and L. B. Vysotskaya^a

^a*Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
prosp. Octyabrya 69, Ufa 450054, Russia*

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

Regulation of roots elongation is important for assimilation of mineral nutrients by plants. Phytohormones – cytokinins (CK) and abscisic acid (ABA) and their interaction are important for root elongation control while ion availability changes. However, their role in regulating the growth response to supra-optimal concentrations of nitrates (N) and phosphates (P) has not been sufficiently studied and it is the subject of this study. The effect of supra-optimal concentrations of N and P ions on root elongation and CK distribution between roots and shoots was studied in ABA deficient barley mutant Az34 and its parent variety Steptoe. The CK concentration in the cells of the growing root tips was analyzed by immunohistochemical method. Supra-optimal concentrations of N and P led to the ABA and CK accumulation in the root tips, which was accompanied by a decrease in the CK content in shoots and inhibition of root growth in Steptoe plants. None of these effects were detected in Az34, which indicates the importance of the ability of plants to accumulate ABA to control these reactions. Since CK are known to inhibit root elongation, the effect of supra-optimal concentrations of N and P on root growth is probably due to the accumulation of CK caused by ABA-induced inhibition of CK transport from roots to shoots.

Key words: barley *Hordeum vulgare* L., barley mutant Az34, root elongation, abscisic acid (ABA), cytokinins, mineral nutrition.

УДК 631.811.98:631.559:633.11“324”:631.814:631.816.2

ВЛИЯНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА РАСТЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ФОНЕ РАННЕВЕСЕННЕЙ АЗОТНОЙ ПОДКОРМКИ

© 2022 г. Э. С. Давидянц

Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр
356241 Ставропольский край, Михайловск, ул. Никонова, 49, Россия

E-mail: ei_davidyants@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022 г.

После доработки 01.03.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

В полевых опытах изучали эффективность регуляторов роста растений (*PPP*) в посевах озимой пшеницы сорта Борвий при выращивании на черноземе обыкновенном карбонатном в условиях зоны неустойчивого увлажнения Ставропольского края. Установлено, что обработка растений озимой пшеницы в фазе колошения препаратами Биосил, Альфастим (д.в. тритерпеновые кислоты), Райкат Старт, Аминокат и Атланте Плюс (д.в. композиции БАВ в комплексе с макро- и микроэлементами) на фоне ранневесенней корневой азотной подкормки в дозе N30 повышала биологическую урожайность зерна в среднем за 3 года на 27.0–69.0 г/м² (на 6.4–16.3%), число зерен в колосе на 3.1–10.2%, массу зерна с одного колоса – на 3.7–10.2% по сравнению с контролем. В вариантах с применением *PPP* формировалось более качественное зерно: содержание белка и клейковины превышало эти показатели в контроле в среднем за 3 года соответственно на 0.6–1.4 и 1.1–2.4%, группа качества клейковины при этом практически не изменялась. Наибольший эффект *PPP* на урожайность зерна и его качество отмечен в засушливый вегетационный сезон 2020 г., что было обусловлено, по-видимому, антистрессовыми свойствами препаратов.

Ключевые слова: регуляторы роста растений, препараты Биосил, Альфастим, Райкат Старт, Аминокат, Атланте Плюс, озимая пшеница, качество зерна.

DOI: 10.31857/S0002188122060047

ВВЕДЕНИЕ

Современные экологически безопасные регуляторы роста растений (*PPP*) являются важными составляющими технологии возделывания озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Физиологическая активность *PPP* проявляется в низких концентрациях и реализуется в повышении эффективности использования питательных веществ, стимулировании ростовых и метаболических процессов, увеличении адаптивности растений к неблагоприятным условиям среды [1–4].

В связи с аридизацией климата в южных регионах России, включая Ставрополье, необходимость использования *PPP* для повышения устойчивости растений к стрессовым факторам значительно возрастает. В Ставропольском крае проблема повышения качества зерна стоит особенно остро в связи с наблюдаемой в последние годы тенденцией к снижению в нем белка и клейковины. Для преодоления этой негативной тенденции предлагается более широкое использование удобрений и *PPP* нового поколения [5]. Ран-

невесенняя корневая азотная подкормка озимой пшеницы, выращиваемой на черноземе обыкновенном, является действенным фактором повышения урожайности зерна [6]. Совмещение азотных подкормок с применением фиторегуляторов в посевах этой культуры позволяет более эффективно использовать азот и существенно улучшить качественные показатели зерна [7].

Эффективность *PPP* на основе тритерпеновых соединений – препаратов Силк, Новосил, Биосил и др. при возделывании озимой пшеницы показана во многих исследованиях [8–14]. Тритерпеновые кислоты являются также действующими веществами нового многокомпонентного *PPP* полифункционального действия – препарата Альфастим [15].

В последние годы также создан ряд препаратов, которые представляют собой композиции физиологически активных веществ. К их числу относятся препараты, разработанные компанией “Atlantika Agricola” (Испания), – Райкат Старт, Аминокат и Атланте Плюс [16].

Особенности действия такого рода *PPP* на продуктивность озимой пшеницы в зависимости от применения минеральных удобрений, почвенно-климатических условий региона и генотипа новых сортов недостаточно изучены. Цель работы – изучение влияния *PPP* многофункционального действия на величину, структуру и качество урожая озимой пшеницы, возделываемой на черноземе обыкновенном карбонатном в условиях зоны неустойчивого увлажнения Ставропольского края на фоне ранневесенней азотной подкормки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые эксперименты проводили в 2019–2021 гг. на опытном поле ГУП “Незлобненская семеноводческо-технологическая станция”, находящемся в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края. Почва опытного участка – чернозем обыкновенный карбонатный среднесильный среднесуглинистый с содержанием гумуса 3.2%. В пахотном слое почвы содержание подвижного фосфора и подвижного калия по Мачигину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91) [17] составило 14.2–21.8 и 389 мг/кг соответственно.

В качестве объектов исследования использовали новый районированный сорт озимой пшеницы Борвий селекции Одесского селекционно-генетического института и Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра [18], а также *PPP* – препараты Биосил, Альфастим, Райкат Старт, Аминокат и Атланте Плюс.

Биосил представляет собой экстракт из хвои пихты сибирской, (*Abies sibirica* Ledeb.), действующими веществами которого являются тритерпеновые кислоты (100 г/л) [19].

Альфастим содержит (г/л): тритерпеновые кислоты из хвои пихты сибирской – 100, аминокислоты – 50, карбогидраты – 50, ауксино-цитокениновый комплекс – 10, мембранно-активные вещества и витамины (В₁, В₇, РР) [15].

Препарат Райкат Старт получен на основе растительных экстрактов, в том числе экстракта морских водорослей, содержит (%): полисахариды – 15.0, аминокислоты – 4.0, цитокинины – 0.05, макро- и микроэлементы в хелатной форме (%): N – 4.0, P₂O₅ – 8.0, K₂O – 3.0, Fe – 0.1, Zn – 0.02, В – 0.03. В состав препарата Аминокат также входит экстракт морских водорослей, макро- и микроэлементы. Содержание аминокислот составляет (%): 10.0, включая глутаминовую кислоту – 2.4, лизин – 1.4, глицин – 1.2. Препарат Атланте Плюс содержит фосфор (18%), калий (16%) в форме гипосульфита калия (KН₂РO₄), салициловую кислоту и бетаины. Эти соединения придают препарату иммунопротекторные свойства [16].

Схема опыта включала варианты обработки растений в фазе колошения препаратами Биосил (30 г/га), Альфастим (40 г/га), Райкат Старт (0.5 л/га), Аминокат (0.5 л/га), Атланте Плюс (0.5 л/га) и контроль (без обработки). Препараты использовали в рекомендуемых концентрациях. Обработку проводили путем опрыскивания растений ручным опрыскивателем, норма расхода рабочего раствора 50 мл/м². В фазе весеннего кущения проводили корневую азотную подкормку в виде N_{aa}30.

Опыт размещали после предшественника – зернобобовых культур в трехкратной повторности, расположение вариантов систематическое. Посев осуществляли в оптимальные сроки рядовым способом из расчета 4.5 млн всхожих семян/га. Агротехника выращивания культуры – общепринятая для данной зоны региона. Учетная площадь делянки 1 м².

Биологический урожай определяли сноповым методом в фазе полной спелости с последующим учетом структуры урожая. Отдельные элементы структуры урожая оценивали по 25 продуктивным побегам в каждом варианте. Массу 1000 зерен определяли по ГОСТ 12042-80 [20]. Показатели качества зерна определяли по ГОСТ Р 54478-2011 [21], индекс деформации клейковины – на приборе ИДК 3М (ООО “Плаун-системы”, Россия).

Статистическую обработку полученных данных проводили методом дисперсионного анализа [22].

Метеоусловия в годы исследований различались. Наиболее благоприятным для роста, развития и формирования урожая озимой пшеницы был вегетационный сезон 2020/2021 гг. Согласно данным Ставропольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, за этот вегетационный период (октябрь–июль) выпало 463.6 мм осадков при климатической норме 456.2 мм, при этом среднесуточная температура превысила среднесуточные показатели на 1.4°C. ГТК (апрель–июль) составил 1.04.

Суммарное количество осадков за период вегетации озимой пшеницы 2018/2019 гг. составило 327.6 мм (71.8% от нормы), среднесуточная температура была выше нормы на 1.9°C. Если в мае и июне во время прохождения растениями фаз колошения и налива зерна отмечали дефицит осадков, то в первой половине июля перед уборкой урожая выпало 53.2 мм (90.9% от нормы), что оказало негативное влияние на качество зерна.

Наиболее засушливым был вегетационный сезон 2019/2020 гг., в течение которого выпало 317.8 мм (69.7% от нормы), а среднесуточная температура была на 2.4°C выше среднесуточных показателей.

Таблица 1. Влияние регуляторов роста на биологический урожай озимой пшеницы

Вариант	Биологический урожай, г/м ²				Прибавка к контролю	
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	среднее	г/м ²	%
Контроль	434	319	514	422	—	—
Биосил	544	405	525	491	69.0	16.3
Альфастим	513	348	537	466	43.6	10.3
Райкат Старт	516	358	529	468	45.2	10.7
Аминокат	438	378	573	463	40.4	9.6
Атланте Плюс	475	358	515	449	27.0	6.4
<i>HCP</i> _{0.5}	29	25	22	—	—	—

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биологический урожай озимой пшеницы в вариантах опыта за годы исследования существенно варьировал в зависимости от погодных условий, коэффициент вариации (*V*) составил 15.4–26.3%. Максимальный уровень биологического урожая

зерна отмечали в наиболее благоприятном по водообеспеченности 2021 г., он составил в среднем в опыте 532 г/м², минимальный — в наиболее засушливом 2020 г. (360.8 г/м²). Изученные *PPP* способствовали увеличению урожая озимой пшеницы во все годы исследования. Наибольший эф-

Таблица 2. Влияние регуляторов роста на элементы структуры урожая озимой пшеницы

Вариант	Масса колоса, г	Число зерен в колосе, шт.	Масса зерна с одного колоса	Масса 1000 зерен
			г	
2019 г.				
Контроль	1.39	31.9	1.05	32.8
Биосил	1.50	35.8	1.15	32.2
Альфастим	1.48	33.9	1.12	32.9
Райкат Старт	1.45	33.5	1.10	32.8
Аминокат	1.42	32.5	1.07	33.0
Атланте Плюс	1.43	32.9	1.08	32.8
<i>HCP</i> ₀₅	0.10	1.1	0.07	—
2020 г.				
Контроль	0.93	22.4	0.69	30.9
Биосил	1.20	26.6	0.87	32.7
Альфастим	1.09	24.3	0.79	32.9
Райкат Старт	1.14	25.5	0.82	32.4
Аминокат	1.15	25.9	0.83	32.8
Атланте Плюс	1.04	23.5	0.75	31.9
<i>HCP</i> ₀₅	0.15	1.8	0.10	1.4
2021 г.				
Контроль	1.88	33.8	1.51	44.8
Биосил	1.91	34.8	1.54	44.2
Альфастим	1.92	34.9	1.55	44.5
Райкат Старт	1.91	34.7	1.54	44.5
Аминокат	1.94	35.0	1.56	44.4
Атланте Плюс	1.89	34.4	1.52	44.3
<i>HCP</i> ₀₅	0.09	1.0	0.06	—

Таблица 3. Влияние регуляторов роста на показатели качества зерна озимой пшеницы

Вариант	Содержание в зерне, %		Показатель ИДК, ед. прибора	Группа качества клейковины
	белка	сырой клейковины		
2019 г.				
Контроль	12.6	22.7	67	I
Биосил	13.4	23.8	73	I
Альфагим	12.4	22.0	62	I
Райкат Старт	12.9	23.0	66	I
Аминокат	14.0	25.0	68	I
Атланте Плюс	14.2	25.2	80	II
<i>HCP</i> ₀₅	0.5	1.2	3	
2020 г.				
Контроль	14.8	25.1	95	II
Биосил	17.1	29.0	98	II
Альфагим	16.7	28.4	95	II
Райкат Старт	15.6	26.6	99	II
Аминокат	14.9	25.4	101	II
Атланте Плюс	16.4	27.8	102	II
<i>HCP</i> ₀₅	0.8	1.5	4	
2021 г.				
Контроль	15.1	26.2	60	I
Биосил	16.3	28.2	77	I
Альфагим	16.1	27.8	73	I
Райкат Старт	16.0	27.6	74	I
Аминокат	16.2	28.0	77	I
Атланте Плюс	15.8	27.4	65	I
<i>HCP</i> ₀₅	0.7	1.4	4	

фekt от их применения отмечен в условиях 2020 и 2019 гг., прибавка урожая зерна относительно контроля составила 28.7–85.3 г/м² (9.0–26.7%) и 41.0–110.4 г/м² (9.4–25.4%) соответственно (табл. 1). Менее выраженный характер носило действие *PPP* на урожай зерна в более благоприятном по водообеспеченности 2021 г. В условиях этого года увеличение урожайности зерна при применении *PPP* составило по отношению к контролю 11.3–58.8 г/м² (2.2–11.4%), причем статистически значимое повышение урожая установлено в вариантах с применением препаратов Аминокат и Альфагим, в других опытных вариантах прибавка урожая была небольшой. В среднем за 3 года биологический урожай при применении *PPP* повысился относительно контроля на 27.0–69.0 г/м², что составило 6.4–16.3%, при этом наибольшая прибавка урожая отмечена при обработке растений препаратом Биосил, наименьшая – при использовании Атланте Плюс.

В среднем за 3 года при применении *PPP* наблюдали увеличение массы колоса на 3.6–10.0, числа зерен в колосе – на 3.1–10.2, массы зерна с одного колоса – на 3.7–10.2%, при этом масса 1000 зерен существенно не изменялась (табл. 2). Увеличение этого показателя (на 3.2–6.5%) в опытных вариантах по сравнению с контролем отмечено лишь в 2020 г. В условиях 2021 г. отмечена лишь тенденция к увеличению основных элементов продуктивности колоса.

На накопление белка в зерне значительное влияние оказывают метеорологические условия [5]. В 2019 г. вследствие значительного выпадения осадков и повышенного уровня влажности в период налива и созревания зерна содержание белка и клейковины в зерне контрольного варианта было невысоким и по этим показателям зерно, согласно ГОСТ 9353-2016 [23], отнесено к 4-му классу. Обработка растений *PPP* увеличила в зерне содержание белка на 0.8–1.6 и клейковины на 1.4–2.8 абс.%, вследствие чего классность зерна повысилась до уровня 3-го класса (табл. 3).

Лучшее зерно по содержанию белка, количеству и качеству клейковины сформировалось в условиях 2021 г., когда гидротермические условия были близки к среднегодовым. Использование *PPP* позволило повысить в зерне содержание белка на 0.7–1.2, клейковины – на 0.8–2.0%. Влияние исследованных препаратов на качество зерна озимой пшеницы проявилось в большей степени в 2020 г. – повышение белка в зерне составило по отношению к контролю 0.8–2.3, клейковины – 1.5–3.9%. В среднем за 3 года при применении *PPP* наблюдали увеличение этих показателей в зерне на 0.6–1.4 и 1.1–2.4% соответственно. Наибольшее действие на качество зерна озимой пшеницы оказали препараты Биосил и Атланте Плюс. В отдельные годы значительный эффект влияния на качество зерна продемонстрировали также препараты Аминокат и Альфастим.

В литературе имеются данные о повышении урожайности и качества зерна озимой пшеницы в результате предпосевной обработки семян сорта Багира препаратом Альфастим и ее сочетании с некорневым применением органо-минеральных удобрений Полидон РК и Полидон N в фазах осеннего и весеннего кушения [24], двукратной обработки растений озимой пшеницы сорта Гром препаратами Биосил и Альфастим в фазах весеннего кушения – выхода в трубку и колошения и сочетании этих обработок с внесением различных доз азотных подкормок [25], предпосевной обработки семян озимой пшеницы сорта Багира препаратом Райкат Старт, обработки растений препаратами Аминокат и Атланте Плюс в фазах весеннего кушения и колошения соответственно, а также сочетания некорневого использования этих препаратов с обработкой семян препаратом Райкат Старт [26].

Наши опыты показали достаточно высокую эффективность изученных *PPP* на урожай и качество зерна озимой пшеницы сорта Борвий при их применении в период вегетации растений озимой пшеницы в фазе колошения на фоне ренневесенней азотной подкормки N30.

ВЫВОДЫ

1. В полевых опытах, проведенных в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края на черноземе обыкновенном карбонатном на фоне внесения азота в дозе N30 при обработке растений озимой пшеницы сорта Борвий в фазе колошения препаратами Биосил, Альфастим, Райкат Старт, Аминокат и Атланте Плюс установлено увеличение биологического урожая зерна в среднем за 3 года на 27.0–69.0 г/м² (на 6.4–16.3%), массы колоса – на 3.6–10.0, числа зерен в колосе – на 3.1–10.2,

массы зерна с одного колоса – на 3.7–10.2% по сравнению с контролем.

2. Качественные показатели зерна при применении регуляторов роста растений (*PPP*) превосходили контрольный вариант в среднем за 3 года по содержанию белка на 0.6–1.4, сырой клейковины – на 1.1–2.4%, группа качества клейковины при этом практически не изменялась. В неблагоприятных условиях формирования качества зерна (2019 г.) использование *PPP* позволило повысить классность зерна.

3. Величина урожая озимой пшеницы, его качество и эффективность действия *PPP* существенно зависели от метеорологических факторов. Максимальный урожай зерна с наиболее высоким качеством сформировался в благоприятном по водобеспеченности 2021 г. при гидротермических условиях, близких к среднегодовым (ГТК за период апрель–июль = 1.04). Наибольший эффект *PPP* на урожай зерна и его качество, напротив, проявился в засушливый сезон 2020 г., когда количество осадков за вегетационный период составило лишь 69.7% от климатической нормы, что свидетельствовало об антистрессовом действии *PPP* на растения в условиях водного дефицита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прусакова Л.Д., Малеванная Н.Н., Белопухов С.Л., Вакуленко В.В. Регуляторы роста растений с антистрессовыми и иммунопротекторными свойствами // *Агрохимия*. 2005. № 11. С. 76–86.
2. Калмыкова Т.С., Лукаткин А.С. Эффективность регуляторов роста растений при действии абиотических стрессовых факторов // *Агрохимия*. 2012. № 1. С. 83–94.
3. Шаповал О.А., Можарова И.П., Коршунов А.А. Регуляторы роста растений в агротехнологиях // *Защита и карантин раст.* 2014. № 6. С. 16–20.
4. Рябчинская Т.А., Зимина Т.В. Средства, регулирующие рост и развитие растений, в агротехнологиях современного растениеводства // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 62–92.
5. Давидяц Э.С., Ерошенко Ф.В. Состояние, тенденции и пути оптимизации производства качественного зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2017. Т. 31. № 6. С. 21–26.
6. Донцов А.Ф., Есаулко А.Н., Сигида М.С., Шевченко Д.А. Изучение доз и способов ранневесенней азотной подкормки озимой пшеницы на черноземе обыкновенном // *Агротехн. вестн.* 2012. № 6. С. 22–24.
7. Ерошенко Ф.В., Ерошенко А.А., Симатин Т.В., Шестакова Е.О., Давидяц Э.С., Сторчак И.Г., Семенов О.В. Азотные подкормки растений озимой пшеницы в условиях Ставропольского края // *Земледелие*. 2017. № 8. С. 18–20.

8. Лазарев В.И., Казначеев М.Н. Силк – эффективный стимулятор роста озимой пшеницы // Главный агроном. 2004. № 9. С. 42.
9. Давидянц Э.С. Рострегулирующее действие экстракта *Silphium perfoliatum* L. при выращивании озимой пшеницы // Агрохимия. 2004. № 11. С. 54–57.
10. Давидянц Э.С. Применение регуляторов роста три-терпеновой природы при выращивании озимой пшеницы // Агрохимия. 2006. № 8. С. 30–33.
11. Оконов М.М., Халгаева К.Э., Унканжинов Г.Д. Урожайность и качество зерна озимой пшеницы при использовании бинорама, биосила и бишофита на фоне минеральных удобрений // Плодородие. 2012. № 1. С. 15–16.
12. Тюкина Е.В., Савельев А.С., Бочкарев Д.В., Смолен Н.В. Влияние регуляторов роста и фунгицидов на содержание сахарозы в узлах кущения и урожайность озимой пшеницы // Нива Поволжья. 2013. № 2 (27). С. 66–71.
13. Авдеенко А.П. Влияние удобрений и стимуляторов роста на влагообеспеченность посевов и продуктивность озимой пшеницы // Международ. науч.-исслед. журн. Сел.-хоз. науки. 2015. № 8(39), Ч. 4. С. 6–8.
14. Жеруков Т.Б., Кишев А.Ю., Тутукова Д.А. Влияние минеральных удобрений и регуляторов роста растений на технологические показатели качества зерна озимой пшеницы // Усп. совр. естествознан. 2019. № 12 (2). С. 211–217.
15. Альфастим. URL: <https://polydonagro.com/alfastim> (дата обращения 16.12.2021).
16. Atlantica Agricola. URL: <https://agroplus-group/catalog> (дата обращения 16.12.2021).
17. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. М.: Изд-во стандартов, 1992. 8 с.
18. Сорты и гибриды сельскохозяйственных культур селекции ФГБНУ “Северо-Кавказский ФНАЦ” и его сети: каталог. 10-е изд., доп. Ставрополь, 2020. 165 с.
19. Тареев А.И., Багдасаров В.Р., Казаченко А.А. Способ регулирования роста и развития зерновых культур: Пат. 2225100, РФ // Б.И. 2004. № 7.
20. ГОСТ 12042-80. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения массы 1000 зерен. Сб. ГОСТов. М.: Изд-во стандартов, 2004. 4 с.
21. ГОСТ Р 54478-2011. Межгосударственный стандарт. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. М.: Стандартинформ, 2012. 19 с.
22. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований), 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
23. ГОСТ 9353-2016. Межгосударственный стандарт. Пшеница. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.
24. Семенюк О.В. Эффективность применения жидких органо-минеральных удобрений Полидон и стимулятора роста Альфастим на посевах озимой пшеницы // Земледелие. 2017. № 1. С. 44–46.
25. Макаров А.А., Мамсиров Н.И., Иванова З.А., Тхазеллова Ф.Х. Продуктивность и технологические качества озимой пшеницы сорта Гром в зависимости от применения регуляторов роста и азотных подкормок // Новые технологии. 2021. Т. 17. № 4. С. 111–125.
26. Симатин Т.В., Ерошенко Ф.В. Эффективность комплексных физиологически активных веществ на посевах озимой пшеницы в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края // Аграрн. вестн. Урала. 2018. № 9 (176). С. 14–19.

Influence of Plant Growth Regulators on the Yield and Grain Quality of Winter Wheat against the Background of Early Spring Nitrogen Fertilization

E. S. Davidyants

*North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center
ul. Nikonova 49, Stavropol krai, Mikhailovsk 356241, Russia*

E-mail: ei_davidyants@mail.ru

In a three-year field experiment, it was studied the effectiveness of plant growth regulators (PGR) on winter wheat crops (variety Borviy) when grown on ordinary calcareous chernozem in the conditions of the zone of unstable moisture in the Stavropol Territory. It has been established that the treatment of vegetative plants of winter wheat with Biosil, Alfastim (a.s. triterpene acids), Raykat Start, Aminokat, and Atlante Plus (a.s. BAS compositions in combination with macro- and microelements) in the heading phase against the background of early spring root nitrogen fertilization at a dose of N30 increased the biological grain yield on average over 3 years by 27.0–69.0 g/m² (6.4–16.3%), the number of grains per ear by 3.1–10.2%, the weight of grain from one ear – by 3.7–10.2% compared to control. In the variants with the use of PGR, a higher quality grain was formed, in which the content of protein and gluten exceeded these indicators in the control on average over 3 years by 0.6–1.4 and 1.1–2.4%, respectively, while the gluten quality group practically did not change. The greatest effect of PGR on grain yield and quality was noted in the dry growing season of 2020, which is apparently due to the anti-stress properties of the preparations.

Key words: plant growth regulators, preparations Biosil, Alfastim, Raykat Start, Aminokat, Atlante Plus, winter wheat, grain quality.

УДК 58.039:581.142:577.15:633.11

РОСТОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И МЕТАБОЛИЗМ ПРОРАСТАЮЩИХ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ (*Triticum aestivum* L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДОЗЫ ЭКСТРАКТА ИЗ ОТРАБОТАННОГО СОЛОМЕННОГО СУБСТРАТА ВЕШЕНКИ (*Pleurotus ostreatus*)

© 2022 г. С. С. Тарасов^{1,*}, Е. В. Михалёв¹, Е. К. Крутова¹, И. А. Шестеркина¹¹Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия
603022 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 97, Россия

*E-mail: tarasov_ss@mail.ru

Поступила в редакцию 28.09.2021 г.

После доработки 15.12.2021 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Исследовали влияние экстракта, приготовленного на основе отработанного соломенного субстрата вешенки (далее экстракт), на ростовые процессы, уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ), окислительной модификации белков (ОМБ), активность тиоловой протеиназы и экспрессию ее гена (*CP*). Показано стимулирующее действие 10%-ного экстракта и ингибирующее влияние 100%-ного экстракта на ростовые процессы прорастающих семян и проростков пшеницы. Выявлено усиление процессов ПОЛ, активности тиоловой протеиназы и экспрессия гена *CP*, при этом уровень ОМБ не изменялся. В семенах, прораставших на 100%-ном экстракте, содержание продукта ПОЛ не отличалось от контроля, а уровень ОМБ был повышен, при этом активность и экспрессия гена цистеиновой протеиназы была подавлена относительно контроля.

Ключевые слова: регуляторы роста и развития растений, органические удобрения, прорастание семян, пшеница, окислительная модификация белков, перекисное окисление липидов, экспрессия генов, тиоловые протеиназы.

DOI: 10.31857/S0002188122060102

ВВЕДЕНИЕ

Переработка грибных отходов – не только важный технологический процесс, дающий повышение эффективности производства, но и вносящий существенный вклад в экологизацию промышленности и сельского хозяйства. По сути, рациональное использование отходов грибоводства делает аграрное производство полностью замкнутым и безотходным [1]. Основным направлением в использовании отходов грибного производства является получение удобрений и биостимуляторов [2–4]. Вешенка занимает одно из лидирующих мест в мировом производстве грибов [5], а следовательно, от ее производства остается и много отходов в виде отработанного субстрата, на котором она произрастала. Отработанный субстрат вешенки может быть переработан в виде органических удобрений и регуляторов роста и развития растений.

Органические удобрения занимают особое место в севообороте культурных растений, они играют важную биосферную роль, являясь источником органо-минеральных компонентов не

только для продуцентов, но и источником питания для редуцентов, которые играют важнейшую роль в поддержании баланса в агроэкосистемах [6]. С хозяйственной точки зрения органические удобрения и регуляторы роста и развития способствуют увеличению урожая [7–9], позволяют поддерживать естественное плодородие почв [10, 11], управлять процессами онтогенеза растений [12, 13], способствуют адаптации к стрессовым воздействиям [14], увеличивают количество полезных веществ в растениях [15], а также могут обладать протекторным действием от инфекций [16].

Основными функциональными компонентами органических удобрений и регуляторов роста и развития являются: разлагающееся органическое вещество, свободные аминокислоты, гуминовые вещества (гуминовые и фульвокислоты, гуматы), карбоновые, жирные кислоты, фитогормоны, простые сахара, минеральные компоненты и ряд других веществ в зависимости от их природы [17, 18].

Несмотря на физиологическую, экологическую и хозяйственную важность органических

Таблица 1. Нуклеотидная последовательность праймеров для проведения ПЦР

№	Ген	Тип праймера	Последовательность 5'–3'	Номер NCBI
1	CP	Прямой Обратный	CTCTCCGTCTTCAAGGCCAA TCTTGAGCCCCAGGAAGGTC	AY841792.2
2	Актин	Прямой Обратный	CTTCGTTTGGATCTCGCTGG GCCAATCGTGATGACCTGAC	KC775780.1

удобрений и регуляторов роста и развития современная фундаментальная наука уделяет пока недостаточное внимания изучению их влияния на метаболизм растений.

Слабо изученным остается влияние органических удобрений и регуляторов роста и развития в разных концентрациях на процессы окислительной деструкции биомолекул растений, в том числе на процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ) и окислительной модификации белков (ОМБ). Мало данных также и о влиянии регуляторов роста и развития на гидролиз органического вещества при прорастании семян.

Наиболее удобным объектом, для изучения являются прорастающие семена пшеницы, что обусловлено их быстрой энергией прорастания, положительной реакцией на внесение органических удобрений, а также важным стратегическим значением культуры в хозяйственной деятельности человека [19].

Исходя из всего вышесказанного, цель работы – исследование влияния различных доз экстракта из отработанного соломенного субстрата вешенки (далее экстракт) на ростовые показатели, уровень ПОЛ, ОМБ, активность цистеиновой протеиназы и экспрессию гена *CP* в прорастающих семенах пшеницы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования использовали семена пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Экада-70. Семена замачивали в растворах экстракта с концентрацией 10 и 100%, контролем служили семена, замоченные в водопроводной воде.

Экстракт получали путем высушивания отработанного субстрата с последующей экстракцией в воде. Для этого 10 г сухого вещества заливали 200 мл воды, экстрагировали в течение 6 ч при комнатной температуре, постоянно перемешивая на шейкере. По окончании обработки семян, в них определяли уровень ПОЛ путем определения содержания малонового диальдегида (МДА), уровень ОМБ путем определения производных 2,4-денитрофенилгидразина (2,4-ДНФГ), активность кислой протеиназы и экспрессию ее гена (*CP*). Содержание МДА проводили согласно ме-

тодике, основанной на его способности реагировать с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) с образованием окрашенных производных [20], продукты ОМБ определяли по методике, основанной на способности окисленных белков взаимодействовать с 2,4-ДНФГ [21] с авторской модификацией, применимой к растительным объектам. Растительный материал массой 1 г растирали в фарфоровой ступке с 9 мл фосфатного буфера pH 7.2, полученный гомогенат центрифугировали 15 мин при 3000 g, супернатант использовали для анализа. Активность протеиназы определяли по методике Ансона [22]. Экспрессию гена *CP* в прорастающих семенах определяли полуколичественно с помощью полимеразной цепной реакции по конечной точке, с последующей визуализацией в агарозном геле [23]. Для этого 0.05 г растительного материала гомогенизировали с использованием набора для выделения тотальной РНК (ExtractRNA “Евроген”, Россия). кДНК синтезировали, используя набор для обратной транскрипции ОТ-1 с M-MLV обратной транскриптазой и случайными (random) гексапраймерами (“Синтол”, Россия). В качестве референсного гена использовался ген актина. Подпор праймеров проводили по кодирующему (*CDS*) участку гена в программе Primer-BLAST (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast>). Полученные олигонуклеотиды представлены в табл. 1. Количественную оценку ампликонов проводили путем анализа агарозного геля и выражали в условных единицах (отн. ед.) [24].

Ростовые показатели оценивали общепринятыми методами, определяли энергию прорастания, лабораторную всхожесть, морфометрию проростков (длину корней и побегов), общую массу и массовую долю сухого вещества.

Данные обработаны статистическими методами, рассчитывали среднее арифметическое (*M*) и стандартные отклонения (*σ*) с использованием программы Microsoft Excel 2010. Достоверность различий оценивали по параметрическому *t*-критерию Стьюдента и непараметрическому критерию Крускалла–Уоллиса [25].

Таблица 2. Всхожесть и энергия прорастания семян пшеницы в зависимости от дозы экстракта

Вариант	3-и сут (энергия прорастания)	7-е сут (всхожесть)
	всхожесть, %	
ПК	86.4 ± 1.4	98.0 ± 0.3
П10	95.4 ± 0.4*	98.4 ± 0.2
П100	78.2 ± 2.2*	91.2 ± 0.6*

Примечание. ПК – контроль, П10, П100 – варианты прораставших семян в 10%- и 100%-ном растворах экстракта отработанного соломенного субстрата вешенки. То же в табл. 3, на рис. 1–4.

* $P \leq 0.05$ относительно контроля по t -критерию Стьюдента. То же в табл. 3, на рис. 1–4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения воздействия экстракта на содержание продуктов ПОЛ, ОМБ, активность тиоловой протеиназы и экспрессию ее гена в прорастающих семенах пшеницы время инкубации было ограничено 24 ч, именно через 24 ч максимально запускаются исследованные физиологические процессы в период раннего прорастания семян [26–28]. Выбор концентраций экстракта был обусловлен имеющимися в литературе данными о ростактивирующем и ингибирующем действии компонентов органических удобрений и регуляторов роста и развития растений [29], и поэтому были исследованы высокие – 100% и низкие – 10% дозы экстракта.

Результаты показали неоднозначное действие исследованных доз экстракта как на ростовые процессы, так и на физиолого-биохимические показатели прораставших семян и проростков пшеницы. Показан как статистически значимый ($P \leq 0.05$) эффект 10- и 100%-ной дозы экстракта, так и в некоторых случаях его отсутствие ($P \geq 0.05$).

Проведенный эксперимент показал существенное влияние дозы экстракта на показатели энергии прорастания и всхожести семян пшеницы. Зафиксировано ингибирующее влияние 100%-ного экстракта на всхожесть и энергию прорастания семян, а 10%-ный экстракт, напротив, оказал стимулирующие действие (табл. 2). Установлено увеличение средней массы растений, длины корней и побегов проростков. Под

действием 100%-ного экстракта зафиксировано уменьшение длины побега недельных проростков пшеницы (табл. 3).

Содержание сухого вещества в проростках статистически значимо не отличалось во всех исследованных вариантах ($P \geq 0.05$). В суточных семенах, прораставших на 10%-ном экстракте, отмечено меньшее содержание сухого вещества по отношению к контролю. В семенах, культивируемых на 100%-ном экстракте, содержание сухого вещества было, напротив, больше, чем в контрольных образцах (рис. 1).

В семенах, которые прорастали в 10%-ном экстракте, зафиксировано увеличенное содержание МДА по сравнению с контролем ($P \leq 0.05$). Содержание исследованного продукта ПОЛ в семенах, культивируемых с использованием 100%-ного экстракта, статистически значимо не отличалось от аналогичных показателей в контроле ($P \geq 0.05$) (рис. 2а). Результаты исследования суммарного содержания всех фракций, образовавшихся в процессе ОМБ, показало картину, отличную от таковой по содержанию продуктов ПОЛ. В прораставших семенах пшеницы при применении 10%-ного экстракта отмечено отсутствие достоверного изменения суммарного содержания продуктов ОМБ. Содержание 2,4-динитрофенилгидразонов в прораставших семенах, культивируемых на 100%-ном экстракте, было существенно больше, чем в контроле (рис. 2б) ($P \leq 0.05$).

Показаны фракционный состав исследованных продуктов ОМБ, аналогичная динамика суммарного содержания продуктов ОМБ и всех исследованных фракций, образовавшихся в результате данного процесса (рис. 3). Отчетливо видно преобладание альдегид- и кетон-денитрофенилгидразонов нейтрального характера, при этом не отмечено преобладания какого-либо из этих продуктов. Содержание алифатических альдегид- и кетон-денитрофенилгидразонов основного характера было меньше. Стоит также отметить в этом случае и явный перевес в содержании альдегид-денитрофенилгидразонов по сравнению с кетон-денитрофенилгидразонами.

Оборот окисленных белков тесно связан с их протеолизом. Ключевую роль в расщеплении белков на начальных этапах прорастания семян

Таблица 3. Показатели прорастания семян пшеницы в зависимости от дозы экстракта

Вариант	Средняя масса одного проростка, г	Средняя длина корня одного проростка Лк, см	Средняя длина побега одного проростка Лп, см	Массовая доля сухого вещества, %
ПК	0.265 ± 0.013	2.59 ± 0.15	3.13 ± 0.083	15.3 ± 0.6
П10	0.353 ± 0.017*	3.79 ± 0.25*	4.14 ± 0.08*	15.2 ± 1.0
П100	0.228 ± 0.009	2.18 ± 0.26	2.21 ± 0.11*	14.5 ± 1.4

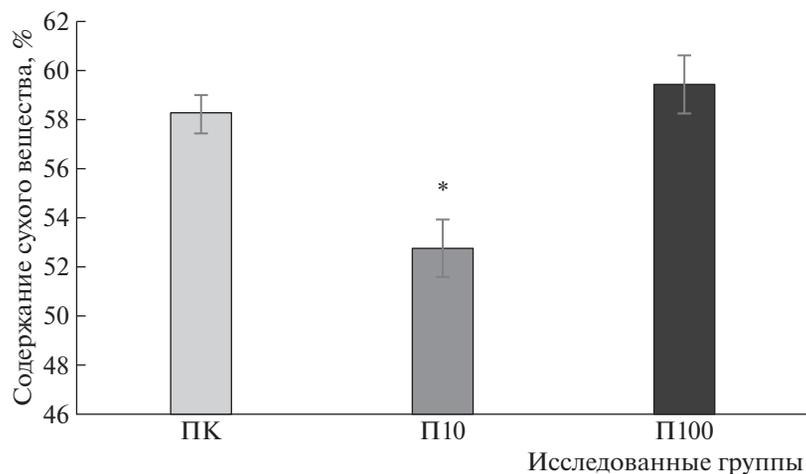


Рис. 1. Содержание сухого вещества в 1-суточных прораставших семенах пшеницы в зависимости от дозы экстракта.

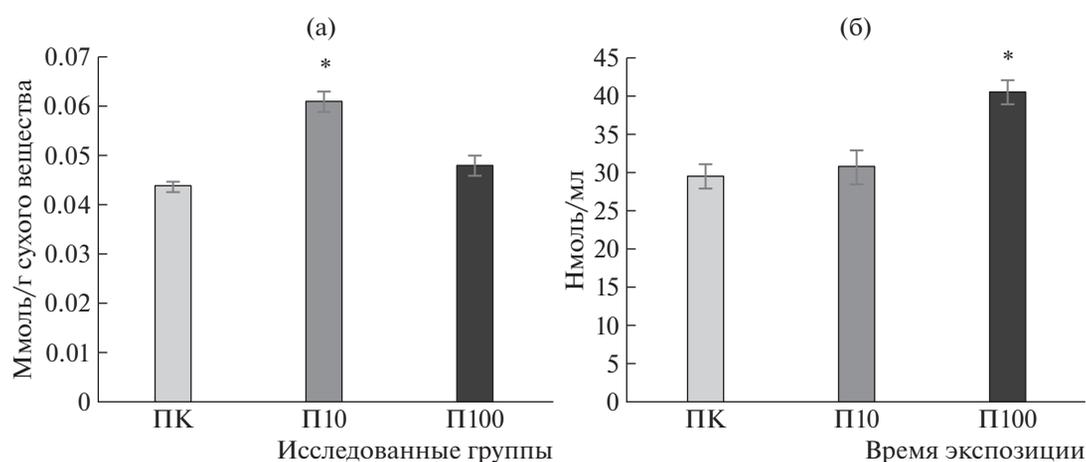


Рис. 2. Содержание МДА (а) и суммарное содержание всех продуктов ОМБ (б) в прораставших семенах пшеницы в зависимости от дозы экстракта.

играют тиоловые протеиназы [30, 31]. Расщеплению подвергаются как нормальные, так и окисленные белки. Протеолиз окисленных белков, по сути, приводит к их утилизации, и он может рассматриваться как компонент поддержания баланса окислительного гомеостаза прорастающих семян наряду с антиоксидантной системой защиты [32–37].

В ходе эксперимента было установлено, что активность тиоловой протеиназы в прораставших семенах пшеницы, культивируемых на 10%-ном экстракте, была существенно больше ($P \leq 0.05$) по сравнению с контролем. Активность исследованных протеиназ в семенах, культивируемых на 100%-ном экстракте, уменьшалась относительно контроля (рис 4а).

Активность ферментов тесно связана с их биосинтезом. Ключевым этапом образования новых молекул ферментов является транскрипция. Ис-

следования уровня транскрипции, наряду с активностью изученного фермента, формируют более детальную картину физиолого-биохимической реакции прорастающего семени на действие компонентов изученного экстракта.

Для изучения уровня транскрипции использовали метод ПЦР. Результаты эксперимента показали схожую динамику активности тиоловой протеиназы и количество образовавшихся транскриптов иРНК. Экспрессия гена *CP* в образцах, культивируемых на 10%-ном экстракте была больше относительно контроля. Содержание транскриптов иРНК гена *CP* в прораставших семенах с использованием 100%-ного экстракта было меньше, чем в контроле (рис. 4б).

Выявленные закономерности влияния экстракта на ростовые показатели, динамику содержания сухого вещества, уровень процессов ПОЛ,

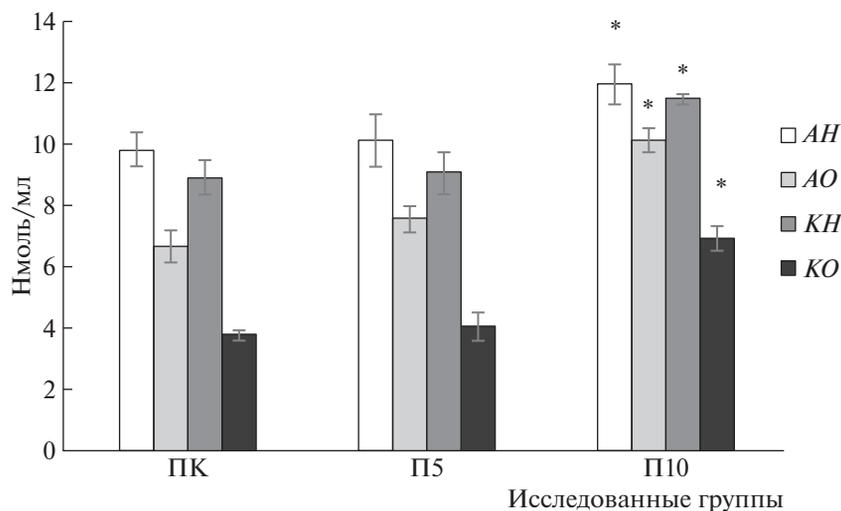


Рис. 3. Фракционное содержание продуктов ОМБ в прораставших семенах пшеницы в зависимости от дозы органического удобрения: *AH* – алифатические альдегид-денитрофенилгидразоны нейтрального характера, *AO* – алифатические альдегид-денитрофенилгидразоны основного характера, *KH* – алифатические кетон-денитрофенилгидразоны нейтрального характера, *KO* – алифатические кетон-денитрофенилгидразоны основного характера.

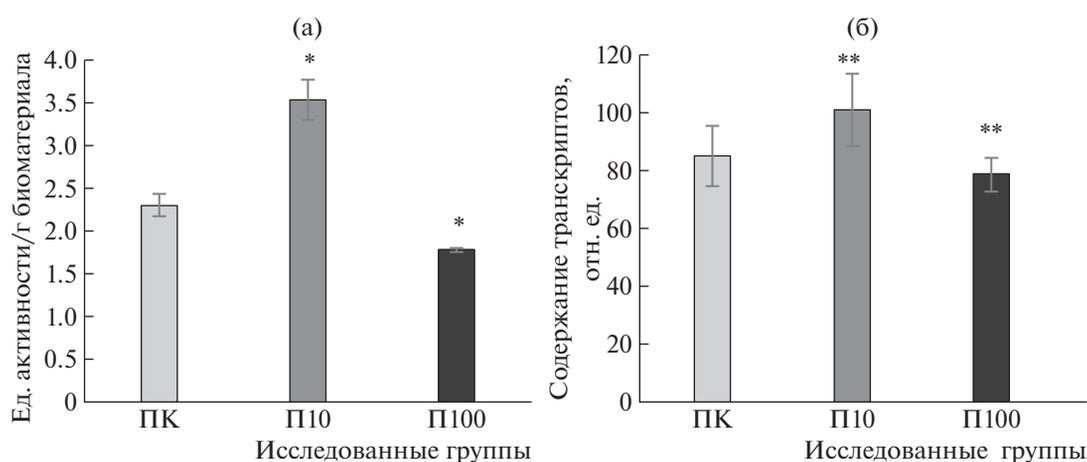


Рис. 4. Активность цистеиновой протеиназы (а) и экспрессия гена *CP* (б) в прораставших семенах пшеницы в зависимости от дозы органического удобрения.

**Достоверные различия в сравнении с контролем по критерию Крускала–Уоллиса.

ОМБ и протеолиза запасного белка показали, что компоненты, находящиеся в экстракте, могли как активировать процессы прорастания, так и подавлять ростовые процессы и увеличивать накопление окисленных метаболитов. Аналогичное воздействие экстракта зафиксировано и при исследовании активности тиоловой протеиназы и экспрессии гена *CP*. Физиолого-биохимическое действие экстракта, по всей видимости, было обусловлено концентрациями действующих веществ.

Снижение содержания сухого вещества в прораставших семенах в 10%-ном экстракте, по-видимому, было обусловлено активацией процессов катаболизма, что усиливало процессы освое-

ния питательных веществ, и снижало долю сухого вещества в тканях. Активация процессов катаболизма способствует накоплению в клетках химической энергии, что, безусловно приводит к усилению биосинтетических процессов, а это способствует ускоренному росту и развитию растений, это по-видимому и объясняет активацию ростовых процессов в проростках при применении 10%-ного экстракта.

Большее содержание сухого вещества и отставание ростовых показателей относительно контроля были обусловлены, вероятно, ингибирующим действием высоких доз экстракта на различные растактивирующие процессы в семенах, в

том числе на протеолиз, изученный в данной работе.

Представленные результаты редокс-метаболизма вероятнее всего были связаны со следующими обстоятельствами: с одной стороны, увеличение содержания МДА в семенах, прораставших в 10%-ном экстракте, по-видимому было обусловлено активацией дыхания, что приводило к увеличению содержания АФК и усилению процессов ПОЛ, но с другой стороны, зафиксировано отсутствие статистически значимого воздействия данной дозы на процессы ОМБ, что можно объяснить протекторным действием компонентов экстракта на белки, а также вероятной активацией прооксидантно-антиоксидантной системы растений [38–40] и более быстрой деградацией окисленных метаболитов. Накопление продуктов ОМБ, вероятнее всего, было связано с торможением общих физиологических процессов прорастания семян [41], что замедлило расщепление органических веществ семени, в том числе и окисленных, также угнетало работу антиоксидантной системы и подавляло работу ферментов, участвовавших в метаболизме продуктов ОМБ.

Анализируя возможные пути воздействия компонентов экстракта на исследованные процессы, стоит уделить внимание его составу, т.к. он содержит гуминовые и фульвокислоты [42–44], мономеры основных биополимеров [45–47], хитозан [48], фитогормоны [49] и пр.

Гуминовые и фульвокислоты входят в состав многих органических удобрений и бистимуляторов [50]. Например, показана способность данных соединений ингибировать кластогенные явления, вызываемые малеиновым гидразидом в прорастающих семенах травянистых растений [51], что дает возможность предполагать их защитное действие, в том числе и на уровне процессов окисления биомолекул. Известно влияние данных соединений на фитогормональный статус, в частности, показана их способность в определенных концентрациях увеличивать содержание индолилуксусной (ИУК) и жасминовой кислот (ЖК) в корнях и цитокининов в листьях [52]. Известная способность жасмонатов защищать растения от стрессовых воздействий [53–55], в том числе путем активации антиоксидантной системы [56], дает основания считать, что увеличение ЖК свидетельствует о закалывающем эффекте гуминовых и фульвокислот, и этим можно объяснить защитное действие на белки в семенах, прораставших на 10%-ном экстракте.

Другие важные неотъемлемые компоненты в составе исследованного экстракта — биомолекулы и продукты их распада. Изучено влияние экзогенных сахаров на стрессоустойчивость растений [57, 58]. Например, в работе [59] показано защит-

ное действие экзогенной глюкозы и сахарозы на прорастающие семена кукурузы в условиях солевого стресса, при этом отмечено снижение уровня ПОЛ и H_2O_2 , что согласовалось с данными о защитном влиянии 10%-ного экстракта на белки.

Наличие экзогенных аминокислот может также воздействовать на исследованные показатели, активируя напрямую антиоксидантную систему, так и опосредованно воздействуя на сопутствующую микрофлору, которая путем выработки гормонов действует на прорастающие семена [60].

Известно также, что хитозан в низких концентрациях (5 мкг/мл) может стимулировать прорастание семян, индуцировать экспрессию гена, связанного с ауксином, ускорять биосинтез и транспорт ИУК и снижать активность оксидазы ИУК, что приводит к увеличению концентрации ИУК в побегах и корнях [61], а также увеличивать биомассу корней и побегов и активировать антиоксидантную систему защиты [62].

Еще одним объяснением отсутствия увеличения в содержании продуктов ОМБ в прорастающих семенах пшеницы, культивируемой на 10%-ном экстракте, можно назвать наличие экзогенных фитогормонов [63–65], которые модулируют системы тиоредоксин/ферредоксин в пользу защиты белков от окисления [66], повышают активность антиоксидантных ферментов [67].

Усиление процессов ОМБ, снижение активности тиоловой протеиназы и экспрессии гена *CP* в семенах прораставших в 100%-ном экстракте, вероятнее всего объясняется слишком большим содержанием вышеупомянутых компонентов. Та же самая глюкоза, которая оказывает положительное влияние на изученные процессы, в высоких концентрациях способна, напротив, ингибировать прорастание семян, индуцируя NO, который усиливает деструктивные процессы [68], и замедлять гидролиз запасного вещества в эндосперме [69]. Известна способность глюкозы и других моносахаров в больших концентрациях усиливать транскрипцию генов *ABI3* и *RGL2*, которые играют важную роль в передаче сигналов гормонов, что индуцирует задержку прорастания семян [70]. Показана способность глюкозы подавлять распад абсцизовой кислоты (АБК) [71], что приводит к увеличению концентрации данного гормона в прорастающих семенах.

Известно, что тиоловые протеиназы пшеницы являются альбуминами, т.е. водорастворимыми белками, и они в достаточном количестве сосредоточены в эндосперме семян [72, 73]. Таким образом, данные ферменты при набухании быстро вступают в реакции. Запуск процессов катаболизма под действием 10%-ного экстракта увеличивает количество макроэргов, что по-видимому приводит к усилению активности цистеиновой про-

теиназы. Другой вероятный путь усиления активности фермента взаимосвязан с увеличением транскриптов иРНК. Показана активация экспрессии гена *CP* под действием гиббереллинов (ГА) [74, 75], которые могли содержаться в исследованном экстракте, а также синтезироваться под действием других его компонентов. Известно также, что для правильного развития семян злаков необходим баланс между содержанием цистеиновых протеаз и фитостатинамов, который поддерживается за счет антагонистической активности ГА и АБК, регулирующих экспрессию соответствующих генов. Регуляция транскрипции цистеиновых протеаз и фитостатинамов определяется *цис*-действующими элементами, расположенными в промоторах этих генов, а также экспрессией их соответствующих факторов транскрипции (ФТ) и взаимодействиями между различными ФТ [76].

Уменьшение активности тиоловой протеиназы вероятно было связано с увеличением синтеза фитостатинамов в связи с увеличением концентрации соответствующих фитогормонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучено влияние экстракта, приготовленного на основе отработанного соломенного субстрата вешенки (далее экстракт), на ростовые процессы, уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ), окислительной модификации белков (ОМБ), активность тиоловой протеиназы и экспрессию ее гена (*CP*) на ростовые процессы прорастающих семян и проростков пшеницы. Показано стимулирующее действие 10%-ного экстракта и ингибирующее влияние 100%-ного экстракта. Выявлено усиление процессов ПОЛ, активности тиоловой протеиназы и экспрессия гена *CP*, при этом уровень ОМБ не изменялся. В семенах, прораставших на 100%-ном экстракте, содержание продукта ПОЛ не отличалось от контроля, а уровень ОМБ был повышен, при этом активность и экспрессия гена цистеиновой протеиназы была подавлена относительно контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grimm D., Wösten H.A.B. Mushroom cultivation in the circular economy // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2018. V. 102 № 18. P. 7795–7803. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8>
2. Rao J.R., Watabe M., Stewart T.A., Millar B.C., Moore J.E. Pelleted organo-mineral fertilisers from composted pig slurry solids, animal wastes and spent mushroom compost for amenity grasslands // *Waste Manag.* 2007. V. 7 № 9. P. 1117–28. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.06.010>
3. Chang K.L., Chen X.M., Sun J., Liu J.Y., Sun S.Y., Yang Z.Y., Wang Y. Spent mushroom substrate biochar as a potential amendment in pig manure and rice straw composting processes // *Environ. Technol.* 2017. V. 38. № 13–14. P. 1765–1769. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1234000>
4. Wan Mahari W.A., Peng W., Nam W.L., Yang H., Lee X.Y., Lee Y.K., Liew R.K., Ma N.L., Mohammad A., Sonne C., Van Le Q., Show P.L., Chen W.H., Lam S.S. A review on valorization of oyster mushroom and waste generated in the mushroom cultivation industry // *J. Hazard. Mater.* 2020. V. 400. P. 123156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123156>
5. Rühl M., Kües U. Mushroom production. 2007. ISBN-13: 978-3-940344-11-3. P. 555–586.
6. Moretti B., Bertora C., Grignani C., Lerda C., Celi L., Sacco D. Conversion from mineral fertilisation to MSW compost use: Nitrogen fertiliser value in continuous maize and test on crop rotation // *Sci. Total. Environ.* 2020. V. 705. P. 135308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135308>
7. Lim S.L., Wu T.Y., Lim P.N., Shak K.P. The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics // *J. Sci. Food Agric.* 2015. V. 95. № 6. P. 1143–1156. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6849>
8. Liu Z., Rong Q., Zhou W., Liang G. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil // *PLoS One.* 2017. V. 6.12 (3). e0172767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172767>
9. Hou M.M., Lü F.L., Zhang H.T., Zhou Y.T., Lu G.Y., Ayaz M., Li Q.H., Yang X.Y., Zhang S.L. Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N₂O emission in the winter wheat–summer maize rotation system // *Huan Jing Ke Xue.* 2018. V. 39. № 1. P. 321–330. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.201707010>
10. Murrell E.G., Cullen E.M. Conventional and organic soil fertility management practices affect corn plant nutrition and *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) larval performance // *Environ. Entomol.* 2014. V. 43. № 5. P. 1264–1274. <https://doi.org/10.1603/EN14008>
11. Yang S., Xiao Y.N., Xu J. Organic fertilizer application increases the soil respiration and net ecosystem carbon dioxide absorption of paddy fields under water-saving irrigation // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. V. 25 (10). P. 9958–9968. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1285-y>
12. Ugena L., Hýlová A., Podlešáková K., Humplík J.F., Doležal K., Diego N., Spíchal L. Characterization of biostimulant mode of action using novel multi-trait high-throughput screening of arabidopsis germination and rosette growth // *Front Plant Sci.* 2018. V. 9. P. 1327. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01327>
13. Masondo N.A., Kulkarni M.G., Finnie J.F., Van Staden J. Influence of biostimulants—seed—priming on *Ceratotheca triloba* germination and seedling growth under low tem-

- peratures, low osmotic potential and salinity stress // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. V. 147. P. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.017>
14. *Campobenedetto C., Grange E., Mannino G., van Arkel J., Beekwilder J., Karlova R., Garaballo C., Contartese V., Bertea C.M.* A Biostimulant seed treatment improved heat stress tolerance during cucumber seed germination by acting on the antioxidant system and glyoxylate cycle // *Front Plant Sci.* 2020. V. 17. № 11. P. 836. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00836>
 15. *Yook J.S., Kim M., Pichiah P.B., Jung S.J., Chae S.W., Cha Y.S.* The Antioxidant properties and inhibitory effects on HEPG2 cells of chicory cultivated using three different kinds of fertilizers in the absence and presence of pesticides // *Molecules.* 2015. V. 20 (7). P. 12061–12075. <https://doi.org/10.3390/molecules200712061>
 16. *Pereira C., Dias M.I., Petropoulos S.A., Plexida S., Chrysargyris A., Tzortzakis N., Calhelha R.C., Ivanov M., Stojković D., Soković M., Barros L., C.F.R. Ferreira I.* The Effects of biostimulants, biofertilizers and water-stress on nutritional value and chemical composition of two spinach genotypes (*Spinacia oleracea* L.) // *Molecules.* 2019. V. 24 P. 4494. <https://doi.org/10.3390/molecules24244494>
 17. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.Ф.* Физиологическая активность биостимуляторов и эффективность их применения // *Агрохимия.* 2016. № 6. С. 72–94.
 18. *Monda H., Cozzolino V., Vinci G., Spaccini R., Piccolo A.* Molecular characteristics of water-extractable organic matter from different composted biomasses and their effects on seed germination and early growth of maize // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 590–591. P. 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.026>
 19. *Lu C., Hawkesford M.J., Barraclough P.B., Poulton P.R., Wilson I.D., Barker G.L., Edwards K.J.* Markedly different gene expression in wheat grown with organic or inorganic fertilizer // *Proc. Biol. Sci.* 2005. V. 272(1575). P. 1901–1908. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3161>
 20. *Стальная И.Д., Гаришвили Т.Г.* Метод определения малонового диальдегида // *Современные методы в биохимии.* М.: Медицина, 1977. С. 66–68.
 21. *Дубинина Е.Е.* Окислительные модификации белков сыворотки крови человека, метод ее определения // *Вопр. мед. химии.* 1995. Т. 41. № 1. С. 24–26.
 22. *Александрова И.Ф., Веселов А.П., Ефременко Ю.П.* Протеолитическая активность прорастающих семян пшеницы при тепловом стрессе // *Физиология растений.* 1999. Т. 46. № 1. С. 223.
 23. *Gál A.B., Carnwath J.W., Dinnyes A., Herrmann D., Niemann H., Wrenzycki C.* Comparison of real-time polymerase chain reaction and end-point polymerase chain reaction for the analysis of gene expression in preimplantation embryos // *Reprod. Fert. Dev.* 2006. V. 18. № 3. P. 365–371. PMID: <https://doi.org/10.1071/rd0501216554012>
 24. *Schmittgen T.D., Zakrajsek B.A., Mills A.G., Gorn V., Singer M.J., Reed M.W.* Quantitative reverse transcription-polymerase chain reaction to study mRNA decay: comparison of endpoint and real-time methods // *Anal. Biochem.* 2000. V. 285(2). P. 194–204. PMID: <https://doi.org/10.1006/abio.2000.475311017702>
 25. *Гланц С.* Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1999. 459 с.
 26. *Han C., Yang P.* Studies on the molecular mechanisms of seed germination // *Proteomics.* 2015. V. 15 № 10. P. 1671–1679. <https://doi.org/10.1002/pmic.201400375>
 27. *Liu Y., Han C., Deng X., Liu D., Liu N., Yan Y.* Integrated physiology and proteome analysis of embryo and endosperm highlights complex metabolic networks involved in seed germination in wheat (*Triticum aestivum* L.) // *J. Plant Physiol.* 2018. V. 229. P. 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.06.011>
 28. *Kim M.J., Kwak H.S., Kim S.S.* Effects of germination on protein, γ -aminobutyric acid, phenolic acids, and antioxidant capacity in wheat // *Molecules.* 2018. V. 23. № 9. P. 2244. <https://doi.org/10.3390/molecules23092244>
 29. *Arnao M.B., Hernández-Ruiz J.* Melatonin: plant growth regulator and/or biostimulator during stress? // *Trends Plant Sci.* 2014. V. 19 № 12 P. 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.006>
 30. *Jones C.G., Tucker G.A., Lycett G.W.* Pattern of expression and characteristics of a cysteine proteinase cDNA from germinating seeds of pea (*Pisum sativum* L.) // *Biochim. Biophys. Acta.* 1996. V. 1296 № 1. P. 13–15. [https://doi.org/10.1016/0167-4838\(96\)00098-2](https://doi.org/10.1016/0167-4838(96)00098-2)
 31. *Tsuji A., Tsukamoto K., Iwamoto K., Ito Y., Yuasa K.* Enzymatic characterization of germination-specific cysteine protease-1 expressed transiently in cotyledons during the early phase of germination // *J. Biochem.* 2013. V. 153. № 1. P. 73–83. <https://doi.org/10.1093/jb/mvs125>
 32. *Grune T., Davies K.J.* Breakdown of oxidized proteins as a part of secondary antioxidant defenses in mammalian cells // *Biofactors.* 1997. V. 6 № 2. P. 165–172. <https://doi.org/10.1002/biof.5520060210>
 33. *Davies K.J.* Oxidative stress: the paradox of aerobic life // *Biochem. Soc. Symp.* 1995. V. 61. P. 1–31. <https://doi.org/10.1042/bss0610001>
 34. *Pickering A.M., Davies K.J.* Degradation of damaged proteins: the main function of the 20S proteasome // *Prog. Mol. Biol. Transl. Sci.* 2012. V. 109. P. 227–248. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397863-9.00006-7>
 35. *Donegan N.P., Marvin J.S., Cheung A.L.* Role of adaptor TrfA and ClpPC in controlling levels of SsrA-tagged proteins and antitoxins in *Staphylococcus aureus* // *J. Bacteriol.* 2014. V. 196. № 23. P. 4140–4151. <https://doi.org/10.1128/JB.02222-14>
 36. *Raynes R., Pomatto L.C., Davies K.J.* Degradation of oxidized proteins by the proteasome: Distinguishing between the 20S, 26S, and immunoproteasome proteolytic pathways // *Mol. Aspects Med.* 2016. V. 50. P. 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2016.05.001>
 37. *Reeg S., Jung T., Castro J.P., Davies K.J.A., Henze A., Grune T.* The molecular chaperone Hsp70 promotes the proteolytic removal of oxidatively damaged proteins by the proteasome // *Free Radic. Biol. Med.* 2016. V. 99. P. 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.08.002>

38. Прадедова Е.В., Нумаева О.Д., Салеев Р.К. Редокс-процессы в биологических системах // Физиология растений. 2017. Т. 54. № 6. С. 433–445.
39. Davies K.J. Degradation of oxidized proteins by the 20S proteasome // Biochimie. 2001. V. 83 (3–4). P. 301–310. [https://doi.org/10.1016/s0300-9084\(01\)01250-0](https://doi.org/10.1016/s0300-9084(01)01250-0)
40. Rahal A., Kumar A., Singh V., Yadav B., Tiwari R., Chakraborty S., Dhama K. Oxidative stress, prooxidants, and antioxidants: the interplay // Biomed. Res. Int. 2014. P. 761264. DOI: PMCID: PMC3920909 <https://doi.org/10.1155/2014/761264>
41. Rupani P.F., Embrandiri A., Ibrahim M.H., Ghole V., Lee C.T., Abbaspour M. Effects of different vermicompost extracts of palm oil mill effluent and palm-pressed fiber mixture on seed germination of mung bean and its relative toxicity // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2018. V. 25. № 36. P. 35805–35810. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1875-8>
42. Brunetti G., Soler-Rovira P., Matarrese F., Senesi N. Composition and structural characteristics of humified fractions during the co-composting process of spent mushroom substrate and wheat straw // J. Agric. Food Chem. 2009. V. 57 (22). P. 10859–10865. <https://doi.org/10.1021/jf903014f>
43. Pisarek I., Głowacki M., Czernia M. The impact of *Pleurotus ostreatus* on organic matter transformation processes // Water Sci. Technol. 2012. V. 66. № 12. P. 2666–2673. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.502>
44. Qi Y., Zhu J., Fu Q., Hu H., Rong X., Huang Q. Characterization and Cu sorption properties of humic acid from the decomposition of rice straw // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2017. V. 24. № 30. P. 23744–23752. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9999-9>
45. Zhu H., Sheng K., Yan E., Qiao J., Lv F. Extraction, purification and antibacterial activities of a polysaccharide from spent mushroom substrate // Int. J. Biol. Macromol. 2012. V. 50 (3). P. 840–843. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.11.016>
46. Lou Z.M., Wang Z.X., Zhou X.X., Fu R.Q., Liu Y., Xu X.H. Compositional variation of spent mushroom substrate during cyclic utilization and its environmental impact // Huan Jing Ke Xue. 2016. V. 37 (1). P. 397–402.
47. Lou Z., Sun Y., Bian S., Ali Baig S., Hu B., Xu X. Nutrient conservation during spent mushroom compost application using spent mushroom substrate derived biochar // Chemosphere. 2017. V. 169. P. 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.044>
48. Bilbao-Sainz C., Chiou B.S., Williams T., Wood D., Du W.X., Sedej I., Ban Z., Rodov V., Poverenov E., Vinokur Y., McHugh T. Vitamin D-fortified chitosan films from mushroom waste // Carbohydr. Polym. 2017. V. 167. № 1. P. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.010>
49. Pham M.T., Huang C.M., Kirschner R. The plant growth-promoting potential of the mesophilic wood-rot mushroom *Pleurotus pulmonarius* // J. Appl. Microbiol. 2019. V. 127. № 4. P. 1157–1171. <https://doi.org/10.1111/jam.14375>
50. Ramdani N., Hamou A., Lousdad A., Al-Douri Y. Physicochemical characterization of sewage sludge and green waste for agricultural utilization // Environ. Technol. 2015. V. 36 (9–12). P. 1594–1604. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.998716>
51. Ferrara G., Loffredo E., Senesi N. Aquatic humic substances inhibit clastogenic events in germinating seeds of herbaceous plants // J. Agric. Food Chem. 2001. V. 49. № 3. P. 1652–1657. <https://doi.org/10.1021/jf0011438>
52. De Hita D., Fuentes M., Fernández V., Zamarréño A.M., Olaetxea M., García-Mina J.M. Discriminating the short-term action of root and foliar application of humic acids on plant growth: Emerging role of jasmonic acid // Front Plant Sci. 2020. V. 28. № 11. P. 493. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00493>
53. Wasternack C. Action of jasmonates in plant stress responses and development -applied aspects // Biotechnol. Adv. 2014. V. 32 (1). P. 31–39.
54. Dar T.A., Uddin M., Khan M.M.A., Hakeem K.R., Jaleel H. Jasmonates counter plant stress: a review // Environ. Exp. Bot. 2015. V. 115. P. 49–57.
55. Samota M.K., Bhatt L., Garg N., Geat N. Defense induced by jasmonic acid: a review // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 2017. V. 6 (5). P. 2467–2474.
56. Таланова В.В., Титов А.Ф., Репкина Н.С., Игнатенко А.А. Влияние метилжасмоната на экспрессию генов WCS и активность антиоксидантных ферментов при холодовой адаптации пшеницы // Докл. РАН. 2018. Т. 482. № 1. С. 101–104.
57. Ling T.F., Xuan W., Fan Y.R., Sun Y.G., Xu S., Huang B.K., Huang S.R., Shen W.B. The effect of exogenous glucose, fructose and NO donor sodium nitroprusside (SNP) on rice seed germination under salt stress // Zhi Wu Sheng Li Yu Fen Zi Sheng Wu Xue Xue Bao. 2005. V. 31. № 2. P. 205–212.
58. Sami F., Yusuf M., Faizan M., Faraz A., Hayat S. Role of sugars under abiotic stress // Plant Physiol. Biochem. 2016. V. 109. P. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.09.005>
59. Zhao Y., Yang K.J., Li Z.T., Zhao C.J., Xu J.Y., Hu X., Shi X.X., Ma L.F. Alleviation of salt stress during maize seed germination by presoaking with exogenous sugar // Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. 2015. V. 26 (9). P. 2735–2742.
60. Ghalehshahi H.G., Balalaie S., Aliahmadi A., Moghimi R. Synthesis of 4-N- α -coumaryl amino acids and investigation of their antioxidant, antimicrobial activities and fluorescence spectra // Amino Acids. 2018. V. 50 (10). P. 1461–1470. <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2624-5>
61. Li R., He J., Xie H., Wang W., Bose S.K., Sun Y., Hu J., Yin H. Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) // Int. J. Biol. Macromol. 2019. V. 126. P. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.118>
62. Colman S.L., Salcedo M.F., Mansilla A.Y., Iglesias M.J., Fiol D.F., Martín-Saldaña S., Alvarez V.A., Chevalier A.A., Casalagué C.A. Chitosan microparticles improve tomato seedling biomass and modulate hormonal, redox and defense pathways // Plant Physiol. Biochem. 2019. V. 143. P. 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.002>

63. Sharma I., Ching E., Saini S., Bhardwaj R., Pati P.K. Exogenous application of brassinosteroid offers tolerance to salinity by altering stress responses in rice variety Pusa Basmati-1 // *Plant Physiol. Biochem.* 2013. V. 69. P. 17–26.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.04.013>
64. Li Z., Li Y., Zhang Y., Cheng B., Peng Y., Zhang X., Ma X., Huang L., Yan Y. Indole-3-acetic acid modulates phytohormones and polyamines metabolism associated with the tolerance to water stress in white clover // *Plant Physiol. Biochem.* 2018. V. 129. P. 251–263.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.009>
65. Yu X., Zhang W., Zhang Y., Zhang X., Lang D., Zhang X. The roles of methyl jasmonate to stress in plant // *Funct. Plant Biol.* 2019. V. 46 (3). P. 197–212.
<https://doi.org/10.1071/FP18106>
66. Ben Massoud M., Sakouhi L., Karmous I., Zhu Y., El Ferjani E., Sheehan D., Chaoui A. Protective role of exogenous phytohormones on redox status in pea seedlings under copper stress // *J. Plant Physiol.* 2018. V. 221. P. 51–61.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.11.014>
67. Zhao P., Wang Y., Lin Z., Zhou J., Chai H., He Q., Li Y., Wang J. The alleviative effect of exogenous phytohormones on the growth, physiology and gene expression of *Tetraselmis cordiformis* under high ammonia-nitrogen stress // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 282. P. 339–347.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.031>
68. Zhao M.G., Liu R.J., Chen L., Tian Q.Y., Zhang W.H. Glucose-induced inhibition of seed germination in *Lotus japonicus* is alleviated by nitric oxide and spermine // *J. Plant Physiol.* 2009. V. 166 (2). P. 213–218.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.03.001>
69. To J.P., Reiter W.D., Gibson S.I. Mobilization of seed storage lipid by *Arabidopsis* seedlings is retarded in the presence of exogenous sugars // *BMC Plant Biol.* 2002. V. 2. P. 4. DOI: PMCID: PMC113751
<https://doi.org/10.1186/1471-2229-2-4>
70. Yuan K., Wysocka-Diller J. Phytohormone signalling pathways interact with sugars during seed germination and seedling development // *J. Exp. Bot.* 2006. V. 57 (12). P. 3359–3367.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erl096>
71. Zhu G., Ye N., Zhang J. Glucose-induced delay of seed germination in rice is mediated by the suppression of ABA catabolism rather than an enhancement of ABA biosynthesis // *Plant Cell Physiol.* 2009. V. 50 (3). P. 644–651.
<https://doi.org/10.1093/pcp/pcp022>
72. Waldschmidt-Leitz E., Hochstrasser K. On the albumins of barley and wheat. VII. On seed proteins // *Hoppe Seylers. Z. Physiol. Chem.* 1961. V. 324. P. 243–249.
<https://doi.org/10.1515/bchm2.1961.324.1.243>
73. Bancel E., Bonnot T., Davanture M., Alvarez D., Zivy M., Martre P., Déjean S., Ravel C. Proteomic data integration highlights central actors involved in einkorn (*Triticum monococcum* ssp. *monococcum*) grain filling in relation to grain storage protein composition // *Front Plant Sci.* 2019. V. 4. № 10. P. 832.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00832>
74. Watanabe H., Abe K., Emori Y., Hosoyama H., Arai S. Molecular cloning and gibberellin-induced expression of multiple cysteine proteinases of rice seeds (oryzains) // *J. Biol. Chem.* 1991. V. 266 (25). P. 16897–16902.
75. Kiyosaki T., Matsumoto I., Asakura T., Funaki J., Kuroda M., Misaka T., Arai S., Abe K. Gliadin, a gibberellin-inducible cysteine proteinase occurring in germinating seeds of wheat, *Triticum aestivum* L., specifically digests gliadin and is regulated by intrinsic cystatins // *FEBS J.* 2007. V. 274. № 8. P. 1908–1917.
<https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2007.05749.x>
76. Szewińska J., Simińska J., Bielawski W. The roles of cysteine proteases and phytocystatins in development and germination of cereal seeds // *J. Plant Physiol.* 2016. V. 207. P. 10–21.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.09.008>

Growth Indicators and Metabolism of Germinating Seeds of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Depending on the Dose of the Extract from Substrate after Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus*) Cultivation

S. S. Tarasov^{a, #}, E. V. Mikhalev^a, E. K. Krutova^a, and I. A. Shesterkina^a

^aNizhny Novgorod State Agricultural Academy
prosp. Gagarinf Avenue 97, Nizhny Novgorod 603022, Russia

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

The work is devoted to the study of the effect of an extract based on the spent straw substrate of oyster mushroom (hereinafter extract) on growth processes, the level of lipid peroxidation (LPO), oxidative modification of proteins (OMP), the activity of thiol proteinase and the expression of its gene (CP). The stimulating effect of 10% extract and the inhibiting effect of 100% extract on the growth processes of germinating seeds and wheat seedlings are shown. There was an increase in LPO processes, thiol proteinase activity, and expression of the CP gene; the LPO level did not change. In seeds germinating in 100% extract, the content of LPO product did not differ from the control, the level of OMP was increased, the activity and expression of the CP gene was suppressed relative to the control.

Key words: plant growth and development regulators, organic fertilizers, seed germination, wheat, oxidative modification of proteins, lipid peroxidation, gene expression, thiol proteinases.

УДК 633.63:632.51:632.954

БИОЛОГИЧЕСКИ И ЭКОНОМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ИНОСТРАННОЙ СЕЛЕКЦИИ В ЦЧР

© 2022 г. О. В. Гамуев^{1,*}, В. М. Вилков¹, О. А. Минакова^{1,**}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86, Россия

*E-mail: 89611802273@mail.ru

**E-mail: olalmin2@rambler.ru

Поступила в редакцию 03.02.2022 г.

После доработки 27.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Сортовые технологии возделывания современных гибридов сахарной свеклы должны включать эффективную защиту растений от сорняков. Установлено, что согласно агрономической и экономической оценке, отечественные гибриды РМС 120 и РМС 127 наиболее выгодно возделывать при 2- или 3-кратном внесении препарата Голтикс (в баковой смеси с гербицидами бетанальной группы), иностранный гибрид Митика – при 3-кратном внесении препаратов Карибу или Голтикс совместно с бетаналами.

Ключевые слова: гербициды, сорняки, сахарная свекла, урожайность, биологическая эффективность, прибыль, рентабельность.

DOI: 10.31857/S0002188122060059

ВВЕДЕНИЕ

Свекловичный сахар – ценный высоко энергетический продукт питания, обеспечивающий необходимый баланс углеводов в организме человека. Ежегодное душевое потребление его в Российской Федерации составляет 38 кг, что является одним из самых высоких показателей в мире. Промышленное получение сахара в нашей стране осуществляется преимущественно из сахарной свеклы (90%) [1], ~98% посевных площадей сахарной свеклы засевают импортным семенным материалом зарубежной селекции, что крайне негативно влияет на технологическую и экономическую устойчивость функционирования всего свеклосахарного комплекса страны [2].

Для устойчивого роста эффективности свеклосахарного производства необходимо создание новых высококонкурентных гибридов сахарной свеклы отечественной селекции [1]. Конкурентоспособность отечественных гибридов в значительной степени зависит от практической реализации заложенного в них генетического потенциала [2].

Оптимальных результатов при возделывании сахарной свеклы можно добиться только при высокой культуре земледелия [3], одной из важных составляющих которой является защита растений

от сорняков, болезней и вредителей. Действие вредных организмов определяет потерю до 61% урожая культуры в мире [4]. Даже при масштабном применении пестицидов потери урожая от вредных видов продолжают составлять 30–40%. Значительной проблемой является повышение устойчивости к пестицидам насекомых-вредителей (>500 видов), десятков видов возбудителей болезней и сотен сорняков вследствие глобального и локального изменения климата при одновременно резко возросшей частоте погодных флуктуаций и снижении плодородия сельскохозяйственных земель [5].

Значительное повышение продуктивности растениеводства основано на использовании сортов интенсивного типа, однако они не всегда обладают достаточной устойчивостью к болезням, вредителям, засухе, низким и высоким температурам и т.п. [6, 7]. Для наиболее полной реализации их генетического потенциала необходимо внедрение современных технологий (энерго- и трудосберегающих приемов обработки почвы, масштабной мелиорации, специализированных севооборотов с максимальным насыщением основными культурами, внесения высоких доз минеральных удобрений) и в том числе – высокоэффективную защиту растений. Негативным факто-

ром данных технологий является существенное изменение фитосанитарной обстановки в агроценозах, что требует внесения соответствующих корректив в стратегию и тактику защиты растений [7, 8].

При выборе средств защиты растений важно не только сохранить урожай, но и не нанести ущерб окружающей среде. С этой целью рекомендуется использовать многокомпонентные препараты, а также баковые смеси пестицидов [9].

Продуктивность отечественных гибридов сахарной свеклы (особенно при высокой агротехнике) зачастую находится на уровне иностранных, что позволяет рекомендовать их к широкому использованию в свекловодстве РФ [10–12].

Гербициды бетанальной группы в настоящее время несколько утратили свою эффективность вследствие вышеперечисленных причин [13]. Применение в смеси с ними таких гербицидов как Голтикс (метамитрон, 700 г/кг) и Карибу (трисульфурон-метил, 500 г/кг) способно повысить эффективность гербицидной обработки посевов сахарной свеклы против двудольных малолетних сорняков.

Карибу – высокоэффективный послевсходовый гербицид, отлично борется со всеми известными сорняками, засоряющими посевы сахарной свеклы, включая самые устойчивые виды. Он безопасен для свеклы, т.к. моментально расщепляется в ней, не фитотоксичен, обладает высокой селективностью, хорошо сочетается в смесях для комплексной обработки, экономичен в использовании [14].

Препарат Голтикс можно применять в любых фазах развития сахарной свеклы, т.к. он мало токсичен для культуры, что позволяет контролировать сорняки на самых ранних стадиях их развития, тем самым добиваясь максимальной эффективности, обеспечивая гибель широкого спектра сорных растений, в том числе мари белой и всех видов горцев, при этом он обладает почвенной активностью [15]. Добавление в баковые смеси с гербицидами бетанальной группы препаратов Карибу и Голтикс увеличивает их биологическую эффективность [16].

Дифференцированное использование адаптивного потенциала культивируемых видов и сортов растений должно учитывать почвенно-климатические ресурсы и техногенные факторы [17]. Следовательно, современная система защиты перспективных сортов и гибридов сахарной свеклы должна учитывать основные элементы технологии возделывания (обработку почвы, минеральные удобрения и др.), изменение климата, интенсификацию сельскохозяйственного производства, повышение устойчивости вредных орга-

низмов к пестицидам, быть экологически безопасной. Цель работы – изучение эффективности применения многокомпонентных препаратов и баковых смесей гербицидов в посевах современных гибридов отечественной селекции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевом опыте изучали действие баковых смесей препаратов Бетанал Эксперт ОФ (десмедифам 71 г/л + фенмедифам 91 г/л + этофумезат 112 г/л), Бетанал 22 (десмедифам 160 г/л + фенмедифам 160 г/л), Голтикс (метамитрон 700 г/кг) и Карибу (трисульфурон-метил 500 г/кг) [18].

Для решения поставленных задач был заложен полевой опыт (табл. 1). Схема 1 является эталонной, рекомендованной для применения на сахарной свекле в ЦЧР.

Климат зоны проведения исследования характеризуется значительной континентальностью, его характерной особенностью является большая неустойчивость температуры воздуха и неравномерность выпадения осадков по временам года и в период вегетации культуры.

Почва участка – чернозем выщелоченный среднесуглинистый, со следующей агрохимической характеристикой: содержание гумуса – 5.61%, подвижного K_2O – 101, подвижного P_2O_5 – 88.5, минерального азота – 37.5 мг/кг почвы, pH_{KCl} 5.15 ед.

За время проведения исследования температура воздуха в апреле и сентябре была выше средне-многолетней нормы на 4.9 и 1.8°C соответственно, тогда как в остальные месяцы данный показатель был выше на 0.2–1.9°C, а в сентябре – ниже среднемноголетнего показателя 1.8°C. По декадам месяцев вегетации наблюдали незначительные изменения. За вегетационный период, кроме июня, осадков выпало меньше среднемноголетнего количества в 1.2–14.4 раза. Следует отметить отсутствие осадков в 1–2-й декаде июля, в августе и сентябре, что повлияло на развитие сахарной свеклы и формирование урожая. Расчет гидротермического коэффициента (ГТК) показал, что апрель был слабо засушливым месяцем (ГТК = 1.0), а май, июнь, июль, август и сентябрь – сухими.

В целом 2019–2021 гг. характеризовались как засушливые, что оказало большое влияние на численность сорной растительности, на развитие растений сахарной свеклы и урожайность.

В период обработок сахарной свеклы гербицидами численность сорняков постепенно нарастала в варианте с абсолютным контролем от 187 шт./м² при наблюдении 24 мая до 273 шт./м² к 21 июня

(табл. 2). Далее в засушливый период численность сорняков в абсолютном контроле снижалась в результате вытеснения низкорослых растений. В начале вегетации в опыте преобладали малолетние двудольные сорняки (66.7%), тогда как доля злаковых сорняков составляла 33.3%. Многолетние сорняки по численности не достигали экономического порога вредоносности (0.1 шт./м²).

Группа малолетних двудольных сорняков была представлена щирицей запрокинутой (31.4%), марью белой (7.4%), видами гречих (13.7%). В наибольшем количестве присутствовал чистец полевой (2.1%). Остальные виды сорняков произрастали в меньшем количестве. С наступлением продолжительной засухи (июнь—август) количество двудольных сорняков резко уменьшилось, а злаковых — продолжало постепенно нарастать, что заметно изменило спектр засоренности посева в сторону преобладания злаковых сорняков (62.6%).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что количество двудольных сорняков в опыте до гербицидных обработок (в среднем за 3 года) было больше, чем злаковых и составило 37—63 (табл. 3), злаковых — 19—47, после гербицидных обработок их количество составило 3—7 и 1—7 шт./м² соответственно. Если до обработок варьирование их количества объяснялось случайными факторами, то при наблюдении 7 июля снижение их численности можно было объяснить действием гербицидных обработок. В посевах гибрида РМС 120 количество двудольных сорняков в этот период составило 3—7, РМС 127 — 4—8 шт., Митика — 2—7 шт., злаковых — 1—4, 2—7 и 1—3 шт./м² соответственно, что свидетельствовало о примерно одинаковом влиянии применения смесей гербицидов на данный показатель, кроме злаковых сорняков в посевах гибрида РМС 127, где их количество было на 1—3 шт./м² больше, чем в посевах других гибридов, что свидетельствовало о меньшем влиянии противозлаковых гербицидов на их численность.

Снижение количества двудольных сорняков как результат применения гербицидов составило: в посевах гибрида РМС 120 — 34—58, РМС 127 — 41—53, Митика — 40—62 шт./м², злаковых — 29—46, 19—46 и 16—46 соответственно. Наибольшее снижение численности сорных двудольных отмечено в посевах гибрида Митика, злаковых — гибрида РМС 120. Схема 1 способствовала максимальному снижению количества двудольных сорняков в посевах всех гибридов, РМС 120 — также схема 4, Митика — 5, злаковых — 2 и 6, 4 и 5, 3 соответственно.

Таблица 1. Схема опыта

Обработка гербицидами		
1-я	2-я	3-я
Варианты		
Контроль (без гербицидов)		
Ручная прополка (без гербицидов)		
Схема 1		
Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га	Бетанал-22 1.2 л/га + Карибу 0.03 кг/га	Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га
Схема 2		
Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га	Бетанал-22 1.2 л/га + Карибу 0.03 кг/га	Бетанал-22 1.2 л/га + Карибу 0.03 кг/га
Схема 3		
Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га + + Карибу 0.02 кг/га	Бетанал-22 1.2 л/га + Карибу 0.02 кг/га	Бетанал-22 1.2 л/га + Карибу 0.02 кг/га
Схема 4		
Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га	Бетанал-22 1.2 л/га + Гол- тикс 1.0 л/га	Бетанал-22 1.0 л/га + Гол- тикс 1.0 л/га
Схема 5		
Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га + + Голтикс 1.0 л/га	Бетанал-22 1.2 л/га + Гол- тикс 1.0 л/га	Бетанал-22 1.0 л/га + Гол- тикс 1.0 л/га
Схема 6		
Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га + + Голтикс 1.0 л/га	Бетанал-22 1.0 л/га + Гол- тикс 1.0 л/га	Бетанал-22 1.0 л/га + Гол- тикс 1.0 л/га

Таблица 2. Видовой состав сорняков в посевах сахарной свеклы (2019—2021 гг.)

Вид	Дата наблюдения			
	03 июня		01 августа	
	шт./м ²	%	шт./м ²	%
Двудольные (всего)	232	61.7	92	37.4
Щирица запрокинутая	43	11.4	34	13.8
Марь белая	28	7.4	26	10.6
Подмаренник	71	19.1	12	4.9
Ярутка полевая	19	5.1	3	1.2
Фиалка полевая	12	3.2	3	1.2
Гречиха татарская	13	3.5	2	0.8
Горец выюнкковый	5	1.3	1	0.4
Другие виды двудольных	41	10.7	11	4.5
Злаковые (всего)	144	38.3	154	62.6
Куриное просо	126	33.5	132	53.7
Мышей (щетинник)	18	4.8	22	8.9

Таблица 3. Влияние применения гербицидов в посевах разных гибридов сахарной свеклы на количество сорняков, шт./м²

Гибрид	Дата наблюдения			
	03.06 (перед гербицидными обработками)		02.07 (после 3-х гербицидных обработок)	
	двудольные	злаковые	двудольные	злаковые
Схема 1				
РМС120	62	41	4	1
РМС127	58	35	7	3
Митика	67	49	5	3
Схема 2				
РМС120	54	47	7	1
РМС127	61	31	8	7
Митика	53	28	5	2
Схема 3				
РМС120	37	38	3	2
РМС127	55	28	7	5
Митика	57	37	2	1
Схема 4				
РМС120	63	31	4	2
РМС127	46	48	5	2
Митика	43	26	3	2
Схема 5				
РМС120	47	38	3	4
РМС127	51	47	4	3
Митика	49	36	3	3
Схема 6				
РМС120	57	47	7	1
РМС127	48	21	6	2
Митика	51	19	7	3

Наибольшая биологическая эффективность действия гербицидов в отношении двудольных сорняков отмечена в посевах гибрида РМС 120 при применении схем 3, 4, 5 (97.1–98.0%) (табл. 4), гибридов РМС 127 и Митика – 4 и 5 (98.0–98.2 и 98.1–98.3% соответственно), что было больше порогового показателя 95%. В отношении злаковых данный показатель был очень высок в вариантах всех гибридов, но максимальным он был в вариантах с гибридом РМС 120 при применении схем 3–5, РМС 127 – схем 3 и 5, Митики – схем 2 и 3.

В период интенсивного роста растений превышение площади листовой поверхности (ПЛП) гибридов РМС 127 и Митика над гибридом РМС 120 в вариантах опыта составила 4.12–15.8% (рис. 1), более всего в варианте применения схемы 1 с эталонной системой защиты, менее всего – в вариантах применения схем 4 и 2, что доказывало при-

мерно одинаковое влияние гербицидных комбинаций на площадь листьев в данных вариантах. Различия между схемами гербицидных обработок у гибрида РМС 120 составили 6.67–15.1, у гибрида РМС 127 – 4.58–11.4, у гибрида Митики – 3.73–6.15%, что свидетельствовало о сходной реакции увеличения поверхности листьев на действие гербицидов и о более разнообразной реакции отечественных гибридов. Применение гербицидов увеличивало ПЛП гибрида РМС 120 в 3.72–4.28 раза, РМС 127 – 3.71–4.13 раза, Митики – 3.56–3.78 раза. В посевах изученных гибридов показатель ПЛП был максимальным при действии схем 4 и 5, минимальным – схем 1, 2 и 6.

Угнетающее действие сорняков и фитотоксическое действие гербицидов негативно влияло на сохранность растений сахарной свеклы в период от посева до уборки (густота всходов составила в

Таблица 4. Биологическая эффективность применения гербицидов в посевах разных гибридов сахарной свеклы (2019–2021 гг.)

Гибриды					
РМС 120		РМС 127		Митика	
двудольные	злаковые	двудольные	злаковые	двудольные	злаковые
Схема 1					
95.2	96.1	95.4	95.8	96.1	95.1
Схема 2					
95.6	95.9	95.7	96.5	96.7	97.2
Схема 3					
97.1	96.8	96.8	96.7	97.4	97.1
Схема 4					
97.1	96.6	98.2	95.9	98.1	95.7
Схема 5					
98.0	96.6	98.0	97.1	98.3	96.7
Схема 6					
96.1	95.9	96.4	96.5	96.2	96.2

среднем 120.0 тыс. шт./га) как в вариантах с применением пестицидов, так и в контролях без гербицидов и без прополки. Густота стояния растений сахарной свеклы в вариантах с применением гербицидов на момент уборки составила 86.7–107 тыс. шт./га (табл. 5), наибольшее количество растений отечественных гибридов сохранилось при действии схемы 4 (102–107 тыс. шт./га), иностранного – схем 2 и 5 (96.0–96.5 тыс. шт./га), наименьшее – в контроле (вследствие угнетения сорной растительностью), а также в варианте 1

(эталонная схема) (86.7–92.2 тыс. шт./га), так как данные гербициды не обеспечивали полного уничтожения сорной растительности.

Наибольшее количество растений гибрида РМС 120 к моменту уборки сохранилось при действии схем защиты 4 и 5 (100–107 тыс. шт./га), РМС 127 – схем 4, 5 и 2 (98.1–102 тыс. шт./га), Митика – схем 2 и 5 (96.0–96.5 тыс. шт./га), что свидетельствовало о том, что данные схемы обеспечивали сохранение наибольшего количества

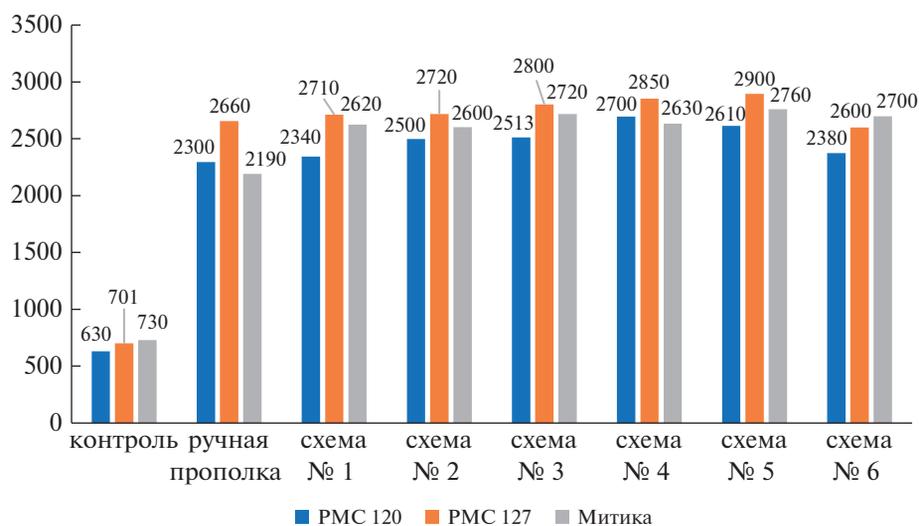


Рис. 1. Площадь листовой поверхности сахарной свеклы в опыте со схемами применения гербицидами, см²/растение.

Таблица 5. Густота стояния растений сахарной свеклы на момент уборки при применении гербицидов в посевах разных гибридов сахарной свеклы, тыс. шт./га

Гибриды		
РМС 120	РМС 127	Митика
Контроль (без гербицидов)		
130	98.9	82.1
Ручная прополка		
91.6	105	83.8
Схема 1 (эталон)		
91.8	86.7	92.2
Схема 2		
95.5	98.1	96.5
Схема 3		
97.5	94.2	94.5
Схема 4		
107.2	102	91.4
Схема 5		
100	98.2	96.0
Схема 6		
91.9	88.1	88.6

Таблица 6. Урожайность сахарной свеклы при применении гербицидов в посевах разных гибридов сахарной свеклы, т/га

Гибриды		
РМС 120	РМС 127	Митика
Контроль (без гербицидов)		
8.7	9.2	10.1
Ручная прополка		
31.7	34.8	31.5
Схема 1		
33.6	35.7	36.7
Схема 2		
34.1	35.8	36.3
Схема 3		
35.2	37.1	37.6
Схема 4		
37.2	37.8	36.4
Схема 5		
36.2	38.0	38.2
Схема 6		
32.8	34.1	33.3

$HCP_{05\text{гербицид/гибрид}} = 2.2/1.8$

растений культуры вследствие отсутствия подавления их роста сорняками.

Системами, обеспечивающими наибольшую урожайность корнеплодов отечественного гибрида РМС 120, было: двукратное внесение препарата Голтикс совместно с гербицидами бетанальной группы, обеспечившее получение урожая основной продукции 37.2 т/га (схема 4) (табл. 6), несколько меньший урожай (36.2 т/га) сформировался при трехкратном применении препарата Голтикс совместно с полными нормами гербицидов бетанальной группы (схема 5). Снижение доз бетаналов в сочетании с трехкратным применением препарата Голтикс (схема 6) и однократное применение препарата Карибу с полной дозой бетаналов (схема 1) определило самую низкую итоговую урожайность в опыте (32.8–33.6 т корнеплодов/га).

Применение схем 4 и 5, а также схемы 3 позволили получить самый высокий урожай корнеплодов отечественного гибрида РМС 127 (37.1–38.0 т/га), схемы с 1- и 2-кратным применением препарата Карибу и 3-кратном – препарата Голтикс совместно со сниженными нормами бетаналов формировали низкую урожайность корнеплодов (34.1–35.8 т/га).

Иностранный гибрид Митика формировал максимальную в опыте урожайность корнеплодов (37.6–38.2 т/га) при действии схем защиты 3 и 5. Сниженные дозы бетаналов в сочетании с 3-кратным применением препарата Голтикс (схема 6) способствовали формированию самой низкой урожайности (33.3 т/га).

Применение гербицидов позволило сохранить 24.1–28.5 т корнеплодов/га у гибрида РМС 120, 24.9–28.8 т/га – у гибрида РМС 127, 23.2–28.1 т/га – у гибрида Митики, в долевом выражении это составило 277–328, 271–313 и 230–278%, что свидетельствовало о том, что пестициды оказывали наименьшее отрицательное влияние на отечественный гибрид РМС 127, наибольшее – на иностранный гибрид. Разница урожайности корнеплодов в вариантах с применением гербицидов составила у гибрида РМС 120 2.44–13.4, РМС 127–4.69–11.4, Митика – 9.00–14.7%, что подтвердило большее разнообразие реакций растений иностранного гибрида на гербицидные обработки, при том, что отечественные гибриды в меньшей степени, но примерно одинаково реагировали на обработку разными нормами и сочетаниями гербицидов.

Сравнение влияния гербицидных комбинаций на сахаристость корнеплодов сахарной свеклы выявило, что при действии большинства схем у гибридов РМС 127 и Митика она была больше, чем у гибрида РМС 120 на 0.1–1.0 абс. % (табл. 7),

наибольшая разница отмечена у гибрида Митика в варианте с ручной полкой (+1.0 абс.%) и при применении схемы 1 (эталон с однократным применением Карибу). Некоторое превышение (на 0.9–0.5%) сахаристости корнеплодов гибрида РМС 120 (относительно гибридов РМС 127 и Митики) отмечено в варианте применения схемы 3, что можно объяснить особенностями генотипов данных гибридов. Также гибрид Митика в варианте применения схемы 5 и гибрид РМС 127 – в варианте применения схемы 4 показали снижение сахаристости относительно гибрида РМС 120 на 0.5 и 0.3%. У корнеплодов гибрида РМС 120 было отмечено повышение сахаристости на 0.2–0.9% относительно варианта ручной прополки (кроме схемы 1) и относительно контроля без обработок – на 0.3–1.0%, у гибрида РМС 127 – на 0.2–1.1% (схемы 1, 5, 6), у гибрида Митика – снижение на 0.7–1.1 абс.% (кроме схем 3 и 4).

Наиболее высокой сахаристостью (17.7%) обладали корнеплоды гибрида РМС 120, выращенные при применении схемы защиты 2 (с 2-кратным внесением препарата Карибу), гибрида РМС 127 (17.7–17.8%) – схем 5 и 6 (с 3-кратным внесением препарата Голтикс с рекомендованной и пониженной дозой бетаналов), гибрида Митика (17.7–18.0%) – схем 3, 4 и 6 (3-кратное внесение препаратов Карибу или Голтикс).

Сбор сахара в вариантах с применением гербицидов составил 6.52–7.68 т/га посевов (рис. 2). Наиболее высоким он был у гибрида Митика (6.65–7.68 т/га), самым низким (6.52–7.64 т/га) – у гибрида РМС 120, но различия были незначительными. Схемы защиты 3, 4, 5 обеспечивали наиболее высокий сбор сахара (7.58–7.68 т/га) в посевах иностранного гибрида Митика, схемы 3 и 5 – гибрида РМС 127 (7.41–7.53 т/га), схемы 4 и 5 – гибрида РМС 120 (7.53–7.64 т/га). Все изученные гибриды имели самый низкий сбор сахара при действии схемы 6. Применение гербицидов обеспечивало дополнительное получение сахара в посевах гибрида РМС 120 – 4.41–5.53, РМС 127 – 4.54–5.21, Митика – 4.24–5.27 т/га, что свидетельствовало о значительном положительном влиянии гербицидов на продуктивность отечественных гибридов по сравнению с иностранным.

Оценка экономической эффективности применения гербицидов в опыте выявила, что наибольшую величину прибыли как для отечественных, так и иностранного, гибридов обеспечивала схема защиты 3, отечественных – также и схема 4. Для гибридов РМС 120 и РМС 127 в этих вариантах отмечены более высокие показатели прибыли (65.5–69.7 и 69.7–70.0 тыс. руб./га) (табл. 8), чем для гибрида Митика, вследствие низкой стоимости посевной единицы семян. Величина прибыли

Таблица 7. Сахаристость корнеплодов сахарной свеклы при применении гербицидов в посевах разных гибридов сахарной свеклы, %

Гибриды		
РМС 120	РМС 127	Митика
Контроль (без гербицидов)		
16.7	16.8	16.8
Ручная прополка		
16.8	16.8	17.8
Схема 1		
16.4	17.0	17.0
Схема 2		
17.7	16.7	17.1
Схема 3		
17.0	16.9	17.8
Схема 4		
17.1	16.8	17.7
Схема 5		
17.2	17.7	16.8
Схема 6		
17.2	17.8	18.0
$HCP_{05\text{гербициды/гибрид}} = 0.3/0.4$		

при возделывании отечественных гибридов была на 1.3–11.3 тыс. руб. больше, чем иностранного, наибольшая разница была отмечена при действии схем 4 и 6. Варьирование данного показателя у гибрида РМС 120 в вариантах применения гербицидов составило 3.2–28.4, у гибрида РМС 127 – 5.9–23.0, у гибрида Митика – 1.3–35.2%, что свидетельствовало о наиболее значительном его изменении у иностранного гибрида. Возделывание гибрида РМС 127 с применением разных схем защиты позволило получить высокую, незначительно отличающуюся в вариантах опыта прибыль.

Рентабельность дополнительных затрат на приобретение и внесение гербицидов была максимальной при действии схем 1 и 3 как в посевах гибрида РМС 120, так и РМС 127 (468, 502% и 498, 544% соответственно), в тех же вариантах гибрида Митика – 351 и 375%. Разница в рентабельности отечественных и иностранного гибрида составила 91–169%, наибольшей она была при обработке растений по схемам 1 и 4.

Лучшие совокупные показатели экономической эффективности отечественных гибридов были отмечены при применении схемы 3 (вследствие высоких прибавок урожайности и относи-

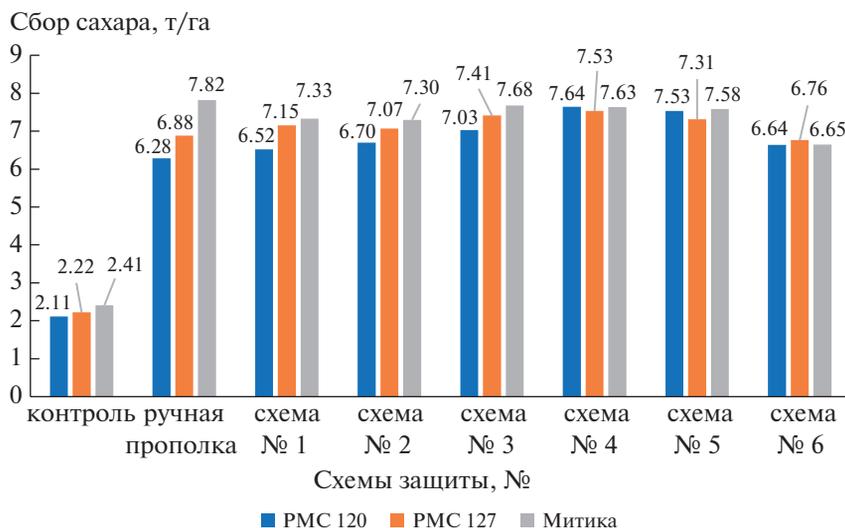


Рис. 2. Биологический сбор сахара при применении гербицидов в посевах разных гибридов сахарной свеклы, т/га.

тельно низкой стоимости гербицидов), иностранного – схем 1 и 3.

Схема 6, несмотря на некоторое удешевление вследствие применения пониженной нормы гербицидов бетанальной группы, не обеспечивала значительной экономической эффективности вследствие низких прибавок урожайности корнеплодов.

Таблица 8. Экономическая эффективность применения гербицидов в посевах разных гибридов сахарной свеклы

Гибриды					
РМС 120		РМС 127		Митика	
1	2	1	2	1	2
Схема 1					
62.3	502	67.4	544	61.0	375
Схема 2					
62.2	444	65.8	470	60.2	326
Схема 3					
65.5	468	69.7	498	64.2	351
Схема 4					
69.7	441	70.0	443	58.7	291
Схема 5					
64.2	351	68.1	372	61.7	273
Схема 6					
54.3	306	56.9	306	47.5	215

Примечания. 1. В графе 1 – прибыль, руб./га, 2 – рентабельность дополнительных затрат, %. 2. Цена 1 п.е. семян сахарной свеклы отечественных гибридов – 4600 руб., иностранного – 9000 руб., 1 т корнеплодов сахарной свеклы – 3000 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, системы защиты сахарной свеклы от сорняков с 2–3-кратным применением гербицида Голтикс совместно с бетаналами (схемы 4 и 5) обеспечивали наиболее высокую урожайность корнеплодов сахарной свеклы отечественных гибридов РМС 120 и РМС 127 (36.2–38.0 т/га), а 3-кратное применение препаратов Карибу и Голтикс совместно с гербицидами бетанальной группы (схемы 3 и 5) – иностранного гибрида Митика (37.6–38.2 т/га). В посевах отечественных гибридов схема защиты 4 (Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га в первое внесение, Голтикс 1.0 л/га + Бетанал 22 1.2 л/га – во второе и Бетанал 22 1.0 л/га + Голтикс 1.0 л/га – в третье внесение) способствовала также формированию наибольшей в опыте густоты стояния растений на 1 га (102–107 тыс. шт.), биологического сбора сахара (7.53–7.64 т/га), прибыли с 1 га (69.7–70.0 тыс. руб./га). Схема 5 (Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га + Голтикс 1.0 л/га – в первое внесение, Голтикс 1.0 л/га + Бетанал 22 1.2 л/га – во второе и Бетанал 22 1.0 л/га + Голтикс 1.0 л/га – в третье внесение) обеспечивала биологическую эффективность 98.0%, сахаристость 17.2–17.7%, сбор сахара 7.31–7.53 т/га и площадь листовой поверхности 2890–2900 см²/растение. Наибольшие густоту (96.0 тыс. растений/га), биологическую эффективность действия против двудольных сорняков (98.1%) и площадь листовой поверхности (2760 см²/растение) отмечали у иностранного гибрида Митика при действии схемы 5. Применение баковых смесей схемы 3 (Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га – первое внесение, Бетанал-22 1.2 л/га + Карибу 0.03 кг/га – второе внесение,

Бетанал Эксперт ОФ 1.0 л/га – третье внесение) в посевах иностранного гибрида Митика обеспечило повышенную сахаристость корнеплодов (17.7%) и высокий сбор сахара (7.68 т/га).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путилина Л.Н., Дворянкин Е.А., Апасов И.В., Смирнов М.А. Свеклосахарный комплекс России: состояние и направления развития // Вестн. Воронеж. Гос. ун-та инженер. технол. 2017. Т. 79. № 2 (72). С. 180–190.
2. Каракотов С.Д., Апасов И.В., Налбандян А.А., Васильченко Е.Н., Федулова Т.П. Современные аспекты селекции гибридов сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.) // Вавилов. Журн. генет. и селекции. 2021. Т. 25. № 4. С. 394–400.
3. Хисматуллина Р.Р., Исламгулов Д.Р. Классификация гибридов сахарной свеклы // Совр. наукоемк. технол. 2013. № 9. С. 16.
4. Санин С.С. Адаптивная защита растений – важнейшее звено современного растениеводства // Современные проблемы адаптации (Жученковские чтения IV). 2018. С. 122–143.
5. Жученко А.А. Вызовы XXI столетия мировой и отечественной продовольственной безопасности // Агропродовол. политика России. 2012. № 1. С. 6–9.
6. Жученко А.А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. М.: ООО Агрорус, 2008. Т. 1. 815 с.
7. Санин С.С. Фитосанитарные проблемы интенсивного растениеводства // Защита и карантин раст. 2013. № 12. С. 3–8.
8. Санин С.С. Защита растений и устойчивое земледелие в XXI столетии // Защита и карантин раст. 2020. № 4. С. 9–16.
9. Михайликова В.В., Стребкова Н.С., Пустовалова Е.А. Действующие вещества – основа химической защиты растений // Агрехимия. 2020. № 5. С. 44–46.
10. Цыкалов А.Н., Рьльков И.В., Бабин К.Ю. Результаты изучения гибридов сахарной свеклы, представленных АО “Щелково Агрохим” в 2012–2014 гг. // Инновационные технологии производства зерновых, зернобобовых, технических и кормовых культур. 2016. С. 258–264.
11. Кравцов А.М., Бровкина Т.Я., Павелко И.А. Продуктивность гибридов отечественной и зарубежной селекции сахарной свеклы в зависимости от агротехнических факторов // Энтузиасты аграрной науки. Мат-лы Всерос. научн.-практ. конф. Ставрополь: КубГАУ, 2019. С. 32–43.
12. Афонин Н.М., Громов А.С., Панков С.М. Определение гибридов сахарной свеклы, наиболее подходящих для выращивания в условиях Тамбовской области // Наука и образование. 2021. Т. 4. № 1. С. 1.
13. Малявко Г.П., Сычева И.В. Защита сельскохозяйственных культур (пшеница, рожь, овес, ячмень, сахарная свекла) от вредных организмов: уч. пособ. Брянск: Брянск. ГСХА, 2010. 174 с.
14. Зармаев А.А. Развитие сельского хозяйства Чеченской Республики на основе принципов адаптивной интенсификации // Вестн. АН Чеченской Республики. 2014. № 1 (22). С. 29–34.
15. Карибу. Пестициды. Ru. [Электр. ресурс]. URL: <https://www.pesticide.ru/pesticide/karibu> (дата обращения 15.01.2022).
16. Голтикс. Пестициды. Ru. [Электр. ресурс]. URL: <https://www.pesticide.ru/pesticide/goltiks> (дата обращения 15.01.2022).
17. Лукьянюк Н.А. Экономическая эффективность применения гербицидов в технологии возделывания сахарной свеклы // Аграрн. эконом. 2020. № 8 (303). С. 67–72.
18. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации на 2021 год. Ч. I. Пестициды. М.: Минсельхоз России, 2021. 803 с.

Biologically and Economic Effective Protection Systems of Domestic and Foreign Sugar Beet in the Central-Chernozem Region

O.V. Gamuev^a, V.M. Vilkov^a, and O.A. Minakova^{a,#}

^aA.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar
p. VNIISS 86, Ramonsky district, Voronezh region 396030, Russia

[#]E-mail: olalmin2@rambler.ru

Variety technologies to cultivate modern sugar beet hybrids should include effective protection of plants against weed. It has been determined that, according to agronomical and economic evaluation, it is the most profitable to cultivate domestic hybrids of RMS 120 and RMS 127 with 2- or 3-repeated application of Goltix (in a tank mixture with betanal group herbicides), and a foreign hybrid of Mitika with thrice-repeated application of Caribou or Goltix together with betanals.

Key words: herbicides, weeds, sugar beet, yield, biological efficiency, profit, profitability.

УДК 632.952:632.4:633.11

ВЛИЯНИЕ 3-АМИНО-1,2,4-ТРИАЗОЛА НА ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВОЗБУДИТЕЛЯ МУЧНИСТОЙ РОСЫ НА РАСТЕНИЯХ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ¹

© 2022 г. Г. А. Аветисян^{1,*}, Т. В. Аветисян¹¹Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН
127276 Москва, ул. Ботаническая, 4, Россия

*E-mail: avetisyang@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.01.2022 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Исследовали влияние 3-амино-1,2,4-триазола (3-АТА) в листьях мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L., пораженных возбудителем мучнистой росы *Blumeria graminis* (DC.) Speer. Под влиянием 10 мМ и 20 мМ водного раствора 3-АТА наблюдали полное ингибирование развития колоний на поверхности листьев пшеницы. Обработка растений пшеницы 3-АТА в концентрации 1 мМ подавляла развитие колоний на 30–40, 4 мМ и 6 мМ – на 40–50% относительно контроля. При действии 3-АТА в концентрации 4 мМ и 6 мМ наблюдали увеличение количества конидий с аномальной дифференциацией инфекционных структур. Вероятно, что ингибирующее действие 3-АТА на рост *B. graminis* связано с увеличением содержания активных форм кислорода (АФК), т.к. на начальных этапах инфекции повышенное содержание АФК в тканях растения определяет дальнейшие взаимоотношения между патогеном и растением и стимулирует формирование защитных реакций растения.

Ключевые слова: мягкая пшеница, возбудитель мучнистой росы, 3-амино-1,2,4-триазол, инфекционные структуры, пустулы, ингибирование.

DOI: 10.31857/S0002188122060035

ВВЕДЕНИЕ

Одно из направлений повышения общей продуктивности сельскохозяйственных растений относится к использованию агротехнических приемов, приводящих к выработке защитных реакций иммунитета растений. Триазолы – группа соединений, широко используемых в сельском хозяйстве в качестве фунгицидов, обладающих высокой физиологической активностью: они ингибируют рост стебля, стимулируют рост корней, увеличивают продуктивность и устойчивость к стрессам и патогенам [1]. Триазолы способны оказывать влияние также на содержание абсцизовой кислоты [2], являющейся стрессовым гормоном растений [3], что может объяснить воздействие этих соединений на адаптацию растений к различным типам стрессов. Изучая механизм действия триазолиевых соединений, показали, что соединения триазола используют как для предпосевной обработки семян, так и для обработки вегетирующих растений [4].

Известно, что под влиянием инфекции, вызванной облигатным патогеном, в растении происходят значительные изменения и нарушения физиолого-биохимических процессов. Мучнисторосяные грибы, попадая на ткани растения пшеницы, усиливают синтез активных форм кислорода (АФК). Образование АФК в токсических концентрациях ведет к окислительному взрыву и вызывает реакцию сверхчувствительности [5–7]. Сверхчувствительный отклик растения сопровождается модификацией клеточной стенки, накоплением *PR*-белков, фитоалексинов и фенольных соединений. Такая реакция в тканях растения на заражение мучнисторосяным грибом приводит к ослаблению и ингибированию патогена. Было показано, что пероксид водорода, образованный в листьях ячменя, инфицированных *E. graminis* f. sp. *hordei*, включался в процесс перекрестной сшивки белков клеточной стенки растения-хозяина, что значительно утолщало клеточную стенку и создавало барьер от проникновения гриба [8].

Наибольший интерес среди соединений триазола привлекает 3-амино-1,2,4-триазол (3-АТА) –

¹ Работа выполнена в рамках госзадания ГБС РАН № 118021490111-5.

Таблица 1. Влияние обработки 3-амино-1,2,4-триазолом на поверхностную плотность колоний возбудителя мучнистой росы на листьях растений пшеницы (суммарное число колоний, шт./см²)

Концентрация 3-АТА, мМ	Число колоний <i>B. graminis</i>	
	шт./см ²	% от контроля
0	5.9 ± 2.1	100
1	3.5 ± 2.1	36.8
4	4.1 ± 1.0	43.2
6	4.2 ± 1.9	44.2
10	0	0
20	0	0

ингибитор ферментов пероксидазы и каталазы, способствующий увеличению уровня содержания эндогенного пероксида водорода в растении [9–11]. Показано, что обработка 3-АТА, паракватом или холодной стресс оказывали сходное влияние на содержание пероксида водорода в листьях пшеницы [12]. Фунгицидность производных триазола для прорастающих спор грибов связана в основном с их влиянием на метаболизм стеролов [13].

Цель работы – изучение влияния обработки 3-АТА на пораженные мучнисторосяным патогеном растения мягкой пшеницы и на жизнеспособность конидий возбудителя мучнистой росы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были растения мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Заря и возбудитель мучнистой росы пшеницы *Blumeria graminis* (DC.) Speer. Семена растений пшеницы были получены из отдела отдаленной гибридизации ГБС РАН.

Растения пшеницы выращивали в горшках, содержащих почву и торф, при естественном освещении. При заражении растений конидии возбудителя мучнистой росы *B. graminis* f. sp. *tritici* стряхивали с больного растения на инокулируемое, стараясь равномерно распределить инокулюм по поверхности листьев пшеницы.

В работе использовали 3-амино-1,2,4-триазол (3-АТА), системный фунгицид, обладающий профилактическим и защитным действием, повышающий устойчивость растений к различным стрессам [14]. Инфицированные отделенные листья 10–12-суточных проростков пшеницы помещали в чашки Петри и обрабатывали водным раствором 3-АТА в концентрациях 1 мМ, 4 мМ, 6 мМ, 10 мМ, 20 мМ. Контролем служила обработка отделенных инфицированных листьев пшеницы

дистиллированной водой. В опытных вариантах использовали 10–20 листьев пшеницы, в контроле – 20–30 листьев.

Влияние 3-АТА на особенности взаимоотношений растения пшеницы и возбудителя мучнистой росы пшеницы, а также на прорастание и жизнеспособность конидий мучнисторосяного патогена на поверхности покровной ткани листьев пшеницы оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Препараты с образцами листовой ткани без химической фиксации просматривали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO-1430 VP (Carl Zeiss, Германия) в условиях высокого вакуума при –30°C с применением замораживающей приставки Deben UK (Великобритания). Поверхностную плотность колоний возбудителя мучнистой росы изучали на отрезках листьев пшеницы площадью 1 см² каждый на 5–6-е сут после инфицирования с помощью бинокулярной лупы.

В таблицах приведены средние арифметические и их стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения показали интенсивное развитие колоний *B. graminis* в контрольном варианте (рис. 1 а), обработка раствором 3-АТА в концентрациях 10 мМ и 20 мМ приводила к полному ингибированию развития колоний на поверхности листьев пшеницы (рис. 1 в, г). Небольшая часть конидий патогена при концентрации 10 мМ 3-АТА образовывала ростковые трубки, но, как правило, дальнейшее развитие гриба прекращалось. Большая часть конидий при концентрациях 10 мМ и 20 мМ 3-АТА отслаивалась от поверхности листа пшеницы или не прорастала.

Анализ состояния конидиального инокулюма *B. graminis* показал, что обработка растений пшеницы 3-АТА в концентрации 1 мМ подавляла развитие колоний на 30–40%, 4 мМ и 6 мМ – на 40–50% относительно контроля (табл. 1). Наблюдали ингибирование начальных этапов развития мучнистой росы на листьях пшеницы под влиянием 1 мМ, 4 мМ и 6 мМ 3-АТА и более слабую степень проявления визуальных симптомов поражения пшеницы мучнистой росой.

При действии 3-АТА в концентрации 4 мМ и 6 мМ отмечено увеличение количества конидий с аномальной дифференциацией инфекционных структур. Нарушения проявлялись в увеличении размеров ростковых трубок и аппрессориев (рис. 2 в, г), образовании нескольких коротких ростковых трубок (рис. 2 б, в, д). На поверхности листьев проростков пшеницы, не обработанных 3-АТА,

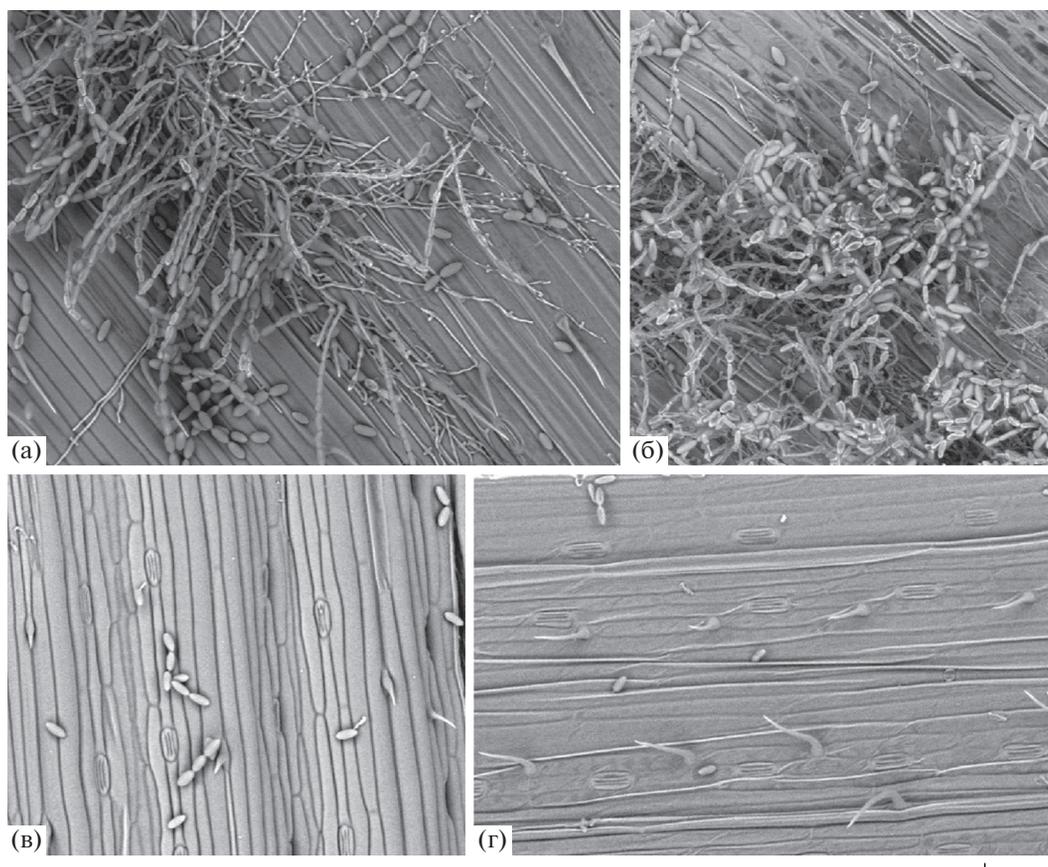


Рис. 1. Влияние 3-АТА на развитие *Blumeria graminis* на поверхности листьев растений пшеницы (СЭМ, 72 ч после инфицирования): (а) – контроль, (б) – 1 мМ 3-АТА, (в) – 10 мМ 3-АТА, (г) – 20 мМ 3-АТА. Масштабный отрезок равен 100 мкм.

не отмечено аномального прорастания конидий возбудителя мучнистой росы (рис. 2 а), после проникновения патогена в покровную ткань листьев начинался интенсивный рост гиф мицелия и его распространение по поверхности листа.

Показано, что все испытанные концентрации 3-АТА заметно подавляли развитие мучнисторосяного гриба, с увеличением концентрации ингибирующий эффект возрастал и при концентрации 20 мМ фунгицид полностью подавлял развитие патогена. Наблюдения над особенностями прорастания конидий возбудителя мучнистой росы показали, что различия между опытными вариантами и контролем были обусловлены разным числом пустул на единицу площади листовой поверхности. Под действием концентраций 1 мМ, 4 мМ и 6 мМ 3-АТА достоверно снижался рост и развитие инфекционных структур мучнисторосяного патогена, вызывая различные аномалии в морфологии ростковых трубок. Можно утверждать, что степень пораженности мучнистой росой листьев пшеницы была больше у необработанных 3-АТА листьев, т.к. исследованное веще-

ство ингибировало развитие гриба на стадии образования аппрессориев и внедрения инфекционных гиф в эпидермальные клетки пшеницы.

Характер патогенеза мучнистой росы злаков в значительной степени зависит от окислительного метаболизма [15]. Обнаружено, что накопление АФК происходит в эпидермальных клетках растения в местах непосредственного взаимодействия растения и патогена [16]. В ряде работ описано, что обработка растений соединениями триазола приводила к подавлению нарастания инфекции и накоплению АФК в высоких концентрациях. Это согласовалось с полученными данными, что воздействие АФК в области инфекции может быть причиной аномального развития патогена и его неспособности к дальнейшему развитию на растениях пшеницы. Действие 3-АТА в исследованных концентрациях способствовало удлинению ростковых трубок и нарушению дифференциации инфекционных структур, что было результатом проявления активной защитной реакции растений. Однако следует отметить, что все же небольшая часть конидий на поверхности листьев

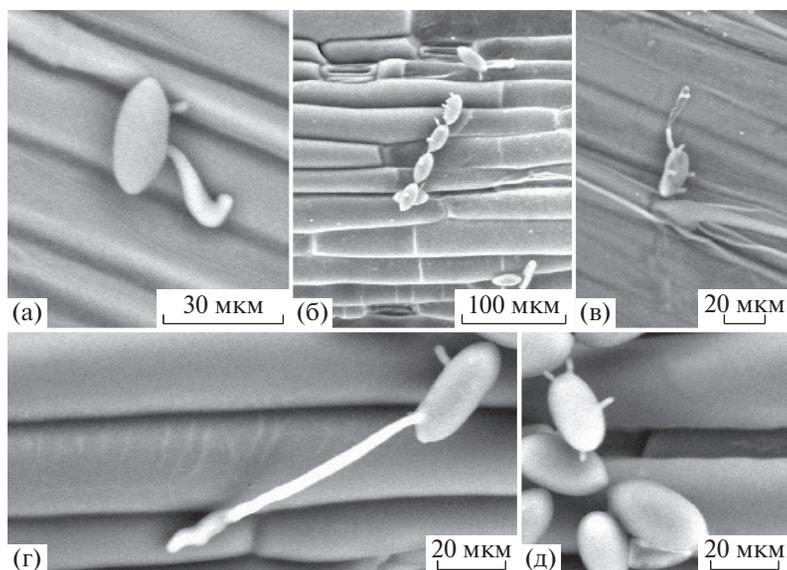


Рис. 2. Прорастание конидий *Blumeria graminis* на поверхности листьев растений пшеницы через 48 ч после инфицирования: (а) — контроль, (б), (в) — 4 мМ 3-АТА, (г), (д) — 6 мМ 3-АТА.

пшеницы формировала нормальные инфекционные структуры, которые проникали в клетку растения и развивали мицелий. При этом визуально пустулы имели разреженный характер, что свидетельствовало о вялотекущем спороношении и снижении инфицирующей способности патогена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обработка 3-амино-1,2,4-триазолом (3-АТА) растений мягкой пшеницы ингибировала развитие возбудителя мучнистой росы, что проявлялось в снижении количества прорастающих конидий в сравнении с необработанными растениями. Также прорастание большинства конидий мучнисторосяного гриба претерпевало изменения в дифференциации инфекционных структур, что приводило к существенному сокращению числа колоний патогена. На основании полученных нами и литературных данных можно заключить, что ингибирующее действие 3-АТА на рост *B. graminis* могло быть связано с увеличением содержания АФК. Это утверждение нуждается в проверке в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davies T.D., Steffens G.L., Sankhla N. Triazole plant growth regulators // *Horticult. Rev.* 1988. V. 10. P. 63–105.
2. Kraus T.E., Fletcher R.A. Paclobutrazol protects wheat seedlings from heat and paraquat injury is detoxification of active oxygen involved? // *Plant Cell Physiol.* 1994. V. 35. P. 45–52.
3. Тарчевский И.А. Сигнальные системы клеток растений. М.: Наука, 2002. 294 с.
4. Чижова С.И., Павлова В.В., Прусакова Л.Д. Содержание абсцизовой кислоты и рост растений ярового ячменя под действием триазолов // *Физиология растений.* 2005. Т. 52. С. 108–114.
5. Vanacker H., Carver T.L.W., Foyer C.H. Early H₂O₂ accumulation in mesophyll cells leads to induction of glutathione during the hyper-sensitive response in the barley-powdery mildew interaction // *Plant Physiol.* 2000. V. 123. № 4. P. 1289–1300.
6. Trujillo M., Altschmied L., Schweizer P., Kogel K.-H., Hüchelhoven R. Respiratory burst oxidase homologue A of barley contributes to penetration by the powdery mildew fungus *Blumeria graminis* f. sp. hordei // *J. Exp. Bot.* 2006. V. 57. № 14. P. 3781–3791.
7. Дьяков Ю.Т., Озерецковская О.Л., Джавахия В.Г., Багирова С.Ф. Общая и молекулярная фитопатология. М.: Общ-во фитопатологов, 2001. 301 с.
8. Shetty N.P., Lyngs Jørgensen H.J., Jensen J.D., Collinge D.B., Shetty H.S. Roles of reactive oxygen species in interactions between plants and pathogens // *Europ. J. Plant Pathol.* 2008. V. 121. № 3. P. 267–280.
9. Asada K. The role of ascorbate peroxidase and monodehydroascorbate reductase in H₂O₂ scavenging in plants // *Oxidative stress and the molecular biology of antioxidant defences* // Ed. Scandalios J.G. N.Y.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, 1997. P. 715–735.
10. Willeken H., Chamnongpol S., Davey M., Schraudner M., Langebartels C., Van Montagu M., Inz D., Van Camp W. Catalase is a sink for H₂O₂ and is indispensable for defence in C₃-plants // *EMBO J.* 1997. V. 16. № 16. P. 4806–4816.
11. Perez F.J., Rubio S.N. An improved chemiluminescence method for hydrogen peroxide determination in plant

- tissues // *Plant Growth Regul.* 2006. V. 48. № 1. P. 89–95.
12. Okuda T., Matsuda Y., Sugawara M., Sagisaka S. Metabolic response to treatment with cold, paraquat, or 3-amino-1,2,4-triazole in leaves of winter wheat // *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 1992. V. 56. № 12. P. 1911–1915.
 13. Maffi D., Cozzi F., Violini G., Bassi M., Conti G.G. Ultrastructural studies of the effects of tetraconazole on the barley-powdery mildew host pathogen complex // *Mycolog. Res.* 1995. V. 99. № 7. P. 799–805.
 14. Ferguson I.B., Dunning S.J. Effect of 3-amino-1, 2, 4-triazole, a catalase inhibitor, on peroxide content of suspension-cultured pear fruit cells // *Plant Sci.* 1986. V. 43. № 1. P. 7–11.
 15. Zhou F., Zhang Z., Gregersen P.L., Mikkelsen J.D., De Neergaard E., Collinge D.B., Thordal-Christensen H. Molecular characterization of the oxalate oxidase involved in the response of barley to the powdery mildew fungus // *Plant Physiol.* 1998. V. 117. № 1. P. 33–41.
 16. Hüchelhoven R., Dechert C., Kogel K.-H. From the cover: Overexpression of barley BAX inhibitor 1 induces breakdown of mlo-mediated penetration resistance to *Blumeria graminis* // *PNAS.* 2003. V. 100. № 9. P. 5555–5560.

Influence of 3-Amino-1,2,4-triazole on Features of Powdery Mildew Development on Soft Wheat

G. A. Avetisyan^{a,#} and T. V. Avetisyan^a

^a*N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of RAS
Botanicheskaya ul. 4, Moscow 127276, Russian*

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

The effect of 3-amino-1,2,4-triazole (3-ATA) in the leaves of soft wheat *Triticum aestivum* L. affected by the causative agent of powdery mildew *Blumeria graminis* (DC.) Speer was investigated. Under the influence of 10 mM and 20 mM aqueous solution of 3-ATA, complete inhibition of colony development on the surface of wheat leaves was observed. Treatment of 3-ATA wheat plants at a concentration of 1 mM suppressed the development of colonies by 30–40, 4 mM and 6 mM – by 40–50% relative to the control. Under the action of 3-ATA in concentrations of 4 mM and 6 mM, an increase in the number of conidia with abnormal differentiation of infectious structures was observed. It is likely that the inhibitory effect of 3-ATA on the growth of *B. graminis* is associated with an increase in the content of reactive oxygen species (ROS), because at the initial stages of infection, an increased content of ROS in plant tissues determines the further relationship between the pathogen and the plant and stimulates the formation of protective reactions of the plant.

Key words: soft wheat, powdery mildew pathogen, 3-amino-1,2,4-triazole, infectious structures, pustules, inhibition.

УДК 631.416.854-38:546.42:631.445.25

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СОЛЕЙ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ МИГРАЦИЮ ^{90}Sr В СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ

© 2022 г. В. Г. Граковский¹, А. С. Фрид^{2,*}¹Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт им. В.В. Докучаева
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, пос. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 23.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Изучена вертикальная миграция ^{90}Sr в условиях лесного ландшафта Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) на серой лесной почве при внесении на поверхность почвы солей (NH_4Cl , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, KCl). Отбор проб проведен через 5 и 9 лет после внесения солей (8 и 12 лет после загрязнения территории). Найдено, что глубины проникновения ^{90}Sr по профилю почвы возрастали при внесении солей по сравнению с контролем, но в основном не увеличивались со временем. Оценены параметры 3-х динамических моделей миграции: диффузионной, конвективно-диффузионной (каждая с 2-мя типами граничных условий) и диффузионной с возможностью необратимой сорбции (фиксации) ^{90}Sr . Найдено, что адекватные оценки параметров этих моделей сильно зависят от принятых граничных условий. Зависимости оценок параметров моделей миграции от вида соли и дозы внесения были неоднозначными. Диффузионные параметры имели тенденцию к уменьшению со временем. Диффузионная модель с фиксацией показала возможность значительной фиксации ^{90}Sr во всех вариантах опыта, что согласовалось с замедлением и даже остановкой миграции, наблюдаемой в этом опыте экспериментально.

Ключевые слова: ^{90}Sr , вертикальная миграция в почве, серая лесная почва, ВУРС, внесение NH_4Cl , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, KCl , параметры динамических моделей миграции, фиксация ^{90}Sr .

DOI: 10.31857/S0002188122060060

ВВЕДЕНИЕ

Изучение вертикальной миграции в почвах радионуклидов при радиационных авариях является одним из необходимых элементов оценки радиационной обстановки. Начались подобные работы на базе глобальных загрязнений от испытаний ядерного оружия. Еще более актуальными они стали после радиационных аварий, особенно, на Чернобыльской АЭС [1], затронувших большие территории.

Одновременно с экспериментальным изучением миграции радионуклидов в почвах (лабораторные, лизиметрические опыты, полевые измерения) исследователи стали пытаться описывать миграцию динамическими математическими моделями [2–4]. Наиболее популярными стали диффузионная и конвективно-диффузионная модели, а также двухкомпонентная модель, предполагающая наличие и миграцию “быстрой” и

“медленной” компонент радионуклида, не обменивающихся между собой [1, 5].

Одним из важных моментов модельного описания миграции радионуклидов (и других веществ) является вопрос об устойчивости выбранных моделей и величин их параметров во времени. Если устойчивости в течение многолетней миграции нет, то либо модель недостаточно адекватна, либо меняется сам процесс миграции, и надо искать причины этих изменений. Нам не встречались работы, где бы на фактических данных обсуждались эти вопросы.

Начиная с изучения Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), встал вопрос о контрмерах, позволяющих снизить радиационную опасность для населения [6], в том числе контрмеры, основанные на изменении химических свойств почвы в результате внесения различных химических веществ (например, удобрений и мелиорантов). Испытывали также способы

изменения физических свойств почвы и разные методы дезактивации ([1], с. 207).

Химическое воздействие предполагало либо закрепление радионуклидов почвой, либо, наоборот, ускорение миграции вглубь почвы. Катионы солей могут вытеснять радионуклиды из почвенного поглощающего комплекса в почвенный раствор, повышая способность последних к миграции. Но при большом содержании солей могут проявляться и другие эффекты: осмотические, изменение рН, коагуляция, пептизация и т.п.

В лабораторных диффузионных и сорбционных опытах [4, 7, 8], в частности, было показано, что при засолении раствором CaCl_2 дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы коэффициент диффузии (D) ^{90}Sr возрастал с ростом концентрации равновесного почвенного раствора до ~ 0.6 г-экв/л, а затем не изменялся. Коэффициент распределения (K_d) ^{90}Sr во влажной почве при этом изменялся в обратную сторону. В лабораторных опытах ранее было показано [9, 10], что внесение в почву CaO и $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ в очень широком диапазоне доз неоднозначно влияло на скорость диффузии ^{90}Sr . Для почв естественного залегания при загрязнении радионуклидами подобные исследования нам не известны, за исключением нашей работы [11] с серой лесной почвой ВУРС. В ней показано, что зависимость глубины проникновения ^{90}Sr в почву и параметров динамических моделей миграции от времени миграции (8–12 лет) и доз внесения CaCl_2 были неоднозначными.

Недавно было показано на выборке почв естественного залегания разных регионов мира [12], что “кажущиеся” коэффициенты диффузии различных тяжелых металлов (Sr тоже к ним относится) имеют наибольшие величины для засоленных карбонатных почв Египта, орошаемых городскими сточными водами.

Цель работы – исследование вертикальной миграции ^{90}Sr в почве в полевых условиях при внесении на поверхность почвы различных водорастворимых солей и модельное описание наблюдаемой миграции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на среднесуглинистой серой лесной почве в лесу паркового типа на территории ВУРС через 3 года (и далее) после аварии с аэрогенным загрязнением радионуклидами данной территории. По инициативе и непосредственном участии сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева И.Н. Антипова-Ка-

ратаева и Ю.А. Полякова на поверхность почвы были рассыпаны различные дозы водорастворимых солей (NH_4Cl , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, KCl) на площадках ~ 100 м². Через 5 и 9 лет после внесения соли с помощью бура Граковским В.Г. были отобраны образцы почв ненарушенного строения. В образцах определяли плотность почвы и содержание ^{90}Sr . Толщина образцов была равна 2 или 5 см. Отбор образцов без внесения соли (контрольный вариант) был проведен через 9 лет после внесения солей (12 лет после загрязнения территории в результате аварии).

Содержание ^{90}Sr определяли через суммарную β -активность образцов с вычитанием активности радиоцезия, которая составляла 3–5% от суммарной (методика и оборудование – принятые на опытной станции (ОНИС) в то время). Некоторые свойства почвы определяли традиционными для почвоведения методами (табл. 1). Через 5 лет после внесения солей явных нарушений биоценоза (деревьев и травостоя) не наблюдали, то же отметили через 9 лет.

Анализ полученных профильных измерений концентрации ^{90}Sr проведен 2-мя способами: 1 – оценивали и сравнивали качественно кривые распределения ^{90}Sr по глубине почвы, а также глубины проникновения его для 50, 95 и 100% от общего содержания в профиле; 2 – оценивали и сравнивали “кажущиеся” величины параметров динамических математических моделей миграции при упрощающем предположении, что эти параметры мало менялись по глубине и времени. Такое упрощение обусловлено тем, что изменения погодных условий от года к году, сравнительно небольшая глубина миграции (несколько десятков см) позволили предполагать некоторое усреднение разнонаправленных процессов, происходящих в почве. К тому же всегда имеются ошибки измерения и пространственное варьирование свойств почвы и доз воздействия солей. Наш предыдущий опыт показал, что для многолетней миграции в большинстве случаев нет необходимости усложнять модели предположением о существенном изменении параметров миграции и с глубиной.

Другое дело, что в данной почве 2–3 верхних слоя имеют низкую плотность (рис. 1) и несколько отличающиеся другие свойства (табл. 1), связанные с подстилкой, дерниной или еще с чем-нибудь. Не зная определенно, как это обстоятельство сказывалось на величинах параметров моделей миграции, в диффузионных моделях варьировали граничное условие на поверхности почвы. Помимо естественного в данном случае мгновен-

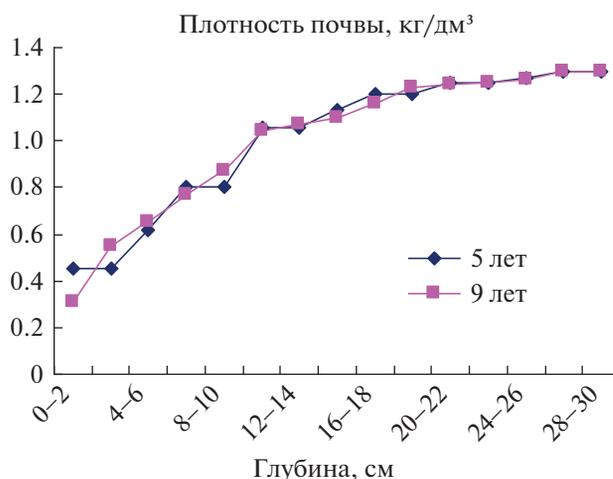
Таблица 1. Некоторые свойства серой лесной среднесуглинистой почвы под лесом

Глубина, см	Влажность весовая	Влажность объемная	Водорастворимые		Обменные	
			Ca	Ca + Mg	Ca	Ca + Mg
	%		мг-экв/кг почвы			
0–2	70.0	21.7	17.2	19.4	357	457
2–4	50.0	27.5	8.0	9.4	270	360
4–6	35.5	23.1	3.4	4.6	200	250
6–8	25.8	19.9	3.0	4.2	180	220
8–10	21.5	18.7	2.6	3.6	180	210
10–12	18.2	18.9	2.4	3.4	180	210
12–14	15.8	16.9	2.3	3.0	180	210
14–16	14.4	15.8	2.3	3.0	170	200
16–18	14.0	16.2	2.3	3.0	160	180
18–20	14.0	17.2	2.3	3.0	160	180
20–22	14.2	17.6	2.3	3.0	170	190
22–24	14.7	18.4	2.3	3.0	180	200
Медиана	17	19	2.4	3.2	180	210

ного (разового) источника загрязнения на поверхности, использовали условие диффузии из верхнего слоя h см, предполагая, что в течение, например, первого года после загрязнения в этом слое произошло перемешивание (или уравнивание концентрации) по каким-то причинам. Тогда, чем больше срок миграции, тем меньше этот год должен будет сказываться на результатах. Для модели конвективной диффузии также использовали 2 граничных условия: мгновенный источник на поверхности почвы и массообмен с поверхностным слоем на той же глубине h . Все эти модели описаны в литературе по тепло- и массообмену. В модели диффузии с кинетикой необратимой сорбции (фиксацией) [13] использовали только один вариант граничных условий – мгновенный источник на поверхности почвы.

Естественен вопрос, почему для ^{90}Sr привлечена модель с фиксацией этого радионуклида. Обычно считают, что его сорбция почвами в основном обменная, но при изучении форм ^{90}Sr в почвах (опыты по десорбции) почти всегда находят неизвлекаемую часть [14, 15, 1 с. 191]. Поэтому не была отвергнута заранее и эта модель, которая при некотором сочетании параметров предполагает практическую остановку миграции через обозримое время.

В работе [13] последняя модель записана для двухфазной среды (почвенный раствор, где происходит диффузия, и твердая фаза, на которой происходит необменная сорбция; остальные возможные фазы считаются нейтральными). В настоящее время расширили число активных фаз до 3-х в следующем варианте: фаза почвенного раствора, где происходит диффузия (фаза 1), фаза с

**Рис. 1.** Изменение плотности почвы по глубине (контрольный вариант).

быстрой обратимой обменной сорбцией без диффузии (фаза 2), фаза, в которой происходит необменная сорбция (фиксация) (фаза 3). Другие возможные фазы по-прежнему предполагаются нейтральными.

Запишем новый вариант модели. Так как диффузия в фазе 1 автоматически вызывает изменение концентрации мигрирующего вещества и в фазе 2, то дифференциальное уравнение диффузии запишется следующим образом:

$$\frac{\partial(\Theta_1 C_1 + \Theta_2 C_2)}{\partial t} = L_1 \frac{\partial^2(\Theta_1 C_1 + \Theta_2 C_2)}{\partial x^2} - \beta(\Theta_1 C_1 + \Theta_2 C_2), \quad (1)$$

где C_i – концентрация мигрирующего вещества в i -й фазе, Θ_i – объемная доля i -й фазы в почве, L_1 – параметр диффузии, β – константа скорости фиксации. Уравнение кинетики фиксации запишем следующим образом:

$$\Theta_3 \frac{\partial C_3}{\partial t} = \beta(\Theta_1 C_1 + \Theta_2 C_2), \quad (2)$$

где изотерма обменной сорбции $C_2 = KC_1$, где K – коэффициент распределения. Суммарное содержание мигрирующего вещества в сечении почвы в целом будет равно $P = \Theta_1 C_1 + \Theta_2 C_2 + \Theta_3 C_3$.

Решения уравнений (1) и (2) аналогичны тем, что и в работе [13], и то же выражение для P :

$$P(x, t) = \frac{Q_0}{2(\pi L_1 t)^{1/2}} \exp\left(-\beta t - \frac{x^2}{4L_1 t}\right) + 0.5\beta Q_0 \int_0^t \frac{1}{(\pi L_1 t)^{1/2}} \exp\left(-\beta t - \frac{x^2}{4L_1 t}\right) dt, \quad (3)$$

где Q_0 – общее количество внесенного загрязняющего вещества. Таким образом, из решений дифференциальных уравнений (при заданных величинах Θ_i , L_1 , β , K , x , t) получаем величину C_3 и $(\Theta_1 C_1 + \Theta_2 C_2)$, из которых рассчитываем раздельно $C_1 = (\Theta_1 C_1 + \Theta_2 C_2)/(\Theta_1 + \Theta_2 K)$ и $C_2 = KC_1$.

Напомним, что найденные величины (оценки) параметров моделей миграции являются “кажущимися” постольку, поскольку характеризуют лишь адекватность моделей экспериментальным данным. Физический смысл им придает сопоставление с информацией, независимой от конкретного математического анализа. В дальнейшем тексте определение “кажущийся” опускаем.

Процедура подбора оценок параметров моделей миграции была следующей. Для экспериментально найденных концентраций ^{90}Sr (в долях от общего содержания) в отдельных слоях почвы

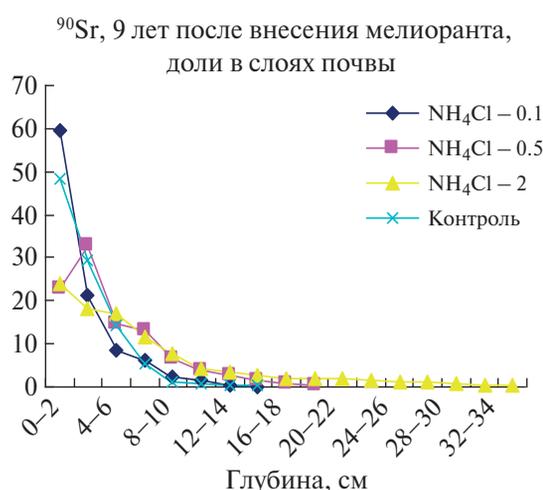
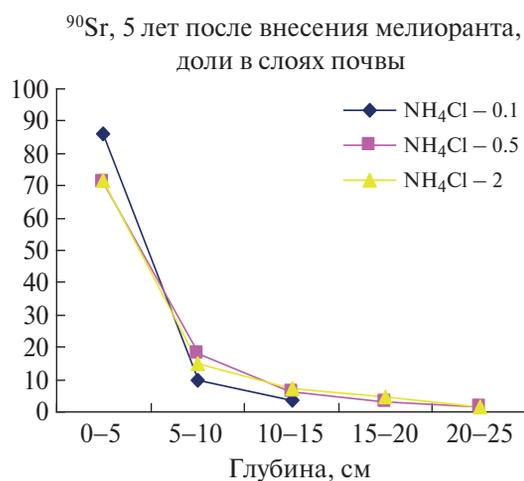


Рис. 2. Распределения ^{90}Sr по профилям почвы для разных доз внесения NH_4Cl и 2-х сроков миграции.

рассчитывали интервал величин ($\pm 10\%$), обусловленный точностью измерения и пространственным варьированием. Если величина параметра или сочетания параметров позволяли получить расчетные концентрации, укладывающиеся в этот коридор, то это являлось первым критерием адекватности величин параметров и самих моделей.

Для тех моделей, где число параметров 2 и более, нередко имеет место несколько их сочетаний (несколько оценок, вплоть до целой непрерывной полосы), удовлетворяющих первому критерию. Тогда приходилось привлекать и другие (дополнительные) критерии, о которых сказано ниже, хотя и это не всегда приводило к однозначному выбору. Еще надо отметить, что при работе с моделями сроки миграции отсчитывали от года загрязнения почвы радионуклидами, так что к срокам после внесения соли добавляли еще 3 года.

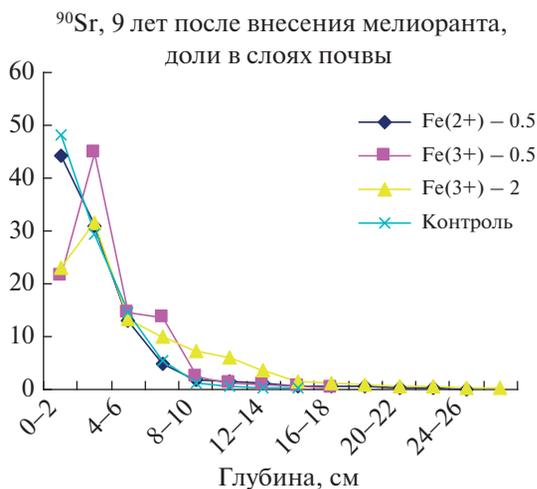
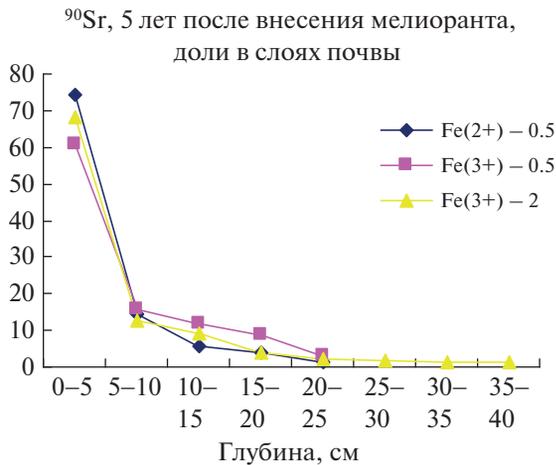


Рис. 3. Распределения ^{90}Sr по профилям почвы для разных доз внесения сульфатов железа и 2-х сроков миграции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Графическое представление профилей содержания ^{90}Sr представлено на рис. 2–4. В более сглаженном виде эти результаты представлены через глубины, до которых продвинулось 50, 95 и 100% (максимальная глубина обнаружения) ^{90}Sr (табл. 2).

Результаты оценки параметров моделей миграции представлены в табл. 3–5. В первую очередь можно отметить, что не во всех случаях использованные варианты моделей миграции оказывались адекватными, т.е. удовлетворяли первому вышеуказанному критерию.

В случае нескольких равноправных решений по первому критерию адекватности применяли дополнительные критерии. Для конвективно-диффузионной модели это было соотношение $D_k \leq D$, которое следует из сути сопоставляемых моделей при малых величинах скорости переноса

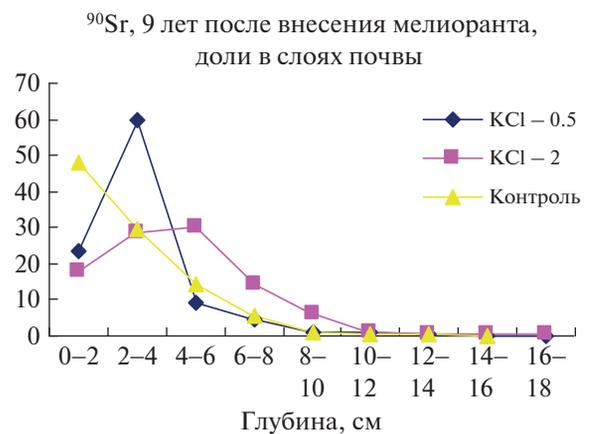
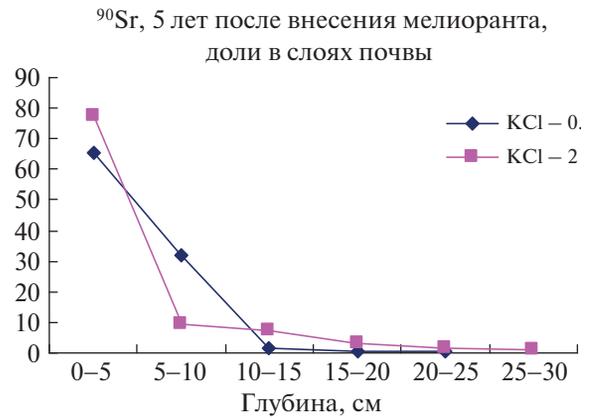


Рис. 4. Распределения ^{90}Sr по профилям почвы для разных доз внесения KCl и 2-х сроков миграции.

с потоком (V). Учитывая видимый отрыв пика концентрации ^{90}Sr от поверхности почвы через 9 лет после внесения солей, можно говорить о большей вероятности тех оценок параметров конвективно-диффузионной модели, где величины V положительные и отличаются от нуля (в табл. 3–5 эти оценки параметров отмечены звездочкой). Для диффузионной модели с кинетикой фиксации параметр L_1 ограничен сверху величиной коэффициента диффузии в растворах (D_1 , справочные данные), а снизу – величиной коэффициента диффузии для почвы в целом (по обычной диффузионной модели).

Рисунки 2–4 показали, что при внесении солей в дозах 0.5 и 2 $\text{кг}/\text{м}^2$ к 9-ти годам после внесения почти всегда появлялся пик концентрации на глубине 2–4 или 4–6 см, что могло свидетельствовать о наличии конвективного переноса ^{90}Sr . Возможно, что подобный пик не был нигде обнаружен к 5-ти годам из-за слишком крупных слоев отбора образцов (по 5 см). Не было обнаружено пика концентрации через 9 лет при внесении малой дозы NH_4Cl ($0.1 \text{ кг}/\text{м}^2$), дозы $0.5 \text{ кг}/\text{м}^2$ сульфа-

Таблица 2. Экспериментальная оценка глубины миграции в почве различных долей ^{90}Sr при внесении разных солей, см

Соль	Доза, кг/м ²	Срок после внесения соли, лет					
		5			9		
		50%	95%	100%	50%	95%	100%
NH ₄ Cl	0.1	~2.9	~9.4	15	~1.7	7.7	16
NH ₄ Cl	0.5	~3.5	14.8	25	~3.7	12.6	20
NH ₄ Cl	2	~3.5	16.5	25	4.9	22.3	34
FeSO ₄	0.5	~3.4	15.1	25	2.4	10.1	26
Fe ₂ (SO ₄) ₃	0.5	~4.1	18.9	25	3.3	8.4	18
Fe ₂ (SO ₄) ₃	2	~3.7	~23	40	~3.7	14.4	28
KCl	0.5	~3.8	~9.6	25	~2.9	~7.1	18
KCl	2	~3.2	~16.3	30	~4.2	~9.3	18
Контроль	0	–	–	–	2	7	16
Размах варьирования (без контроля)		2.9–4.1	9.4–23	15–40	1.7–4.9	7.1–22.3	16–34

Примечание. Прочерк – отсутствие данных.

та двухвалентного железа и в контрольном варианте, а при внесении 2 кг NH₄Cl/м² вместо пика наметилась ступенька.

Проанализируем табл. 2 с точки зрения влияния доз различных солей и времени на глубину миграции ^{90}Sr . Для рассмотрения первого вопроса используем глубину проникновения в почву 95% ^{90}Sr , т.к. эта величина имеет в данном случае

достаточно надежную и в то же время заметно варьирующую оценку по сравнению с 50% и 100% (рис. 5). Из рисунка видно, что эта величина во всех случаях увеличивалась с ростом дозы солей, хотя и с разной интенсивностью.

Зависимость от времени удобно оценить, сравнив глубины проникновения ^{90}Sr для 5 и 9 лет после внесения солей. Сделать это можно как графически, так и построив уравнения регрессии. Если коэффициент регрессии достоверно не отличается от единицы (1), то делаем вывод, что после 5 лет дальнейшее заглупление не происходило. Если коэффициент регрессии достоверно отличается от 1 в ту или другую сторону, то заглупление продолжалось, или имела место быть более сложная ситуация.

В нашем случае получены следующие регрессионные зависимости (использованы вместе все 3 квантиля глубин – 50, 95 и 100%):

$$a) - \text{NH}_4\text{Cl, дозы 0.1 и 0.5 кг/м}^2 - \text{Гл}(9) = 0.434 + 0.837 \text{ Гл}(5), \quad (4)$$

где $R^2 = 0.95$, $F = 16(5,4)$, $s_b = 0.096$, где Гл(5) и Гл(9) – оценки глубин (квантилей) для 5 и 9 лет после внесения соли (табл. 2), s_b – стандартное отклонение для коэффициента регрессии. В этом случае разница между b и 1 (0.163) имеет место в

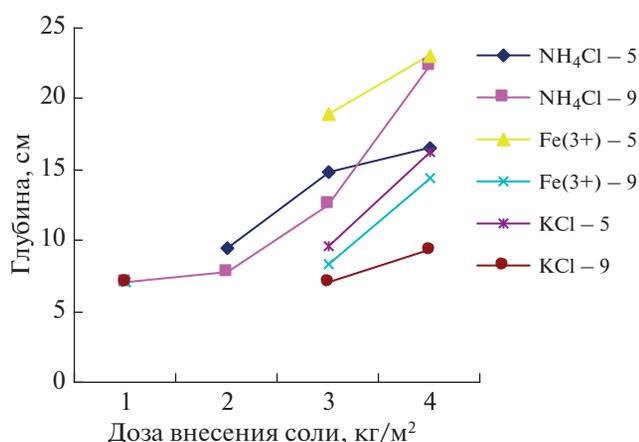


Рис. 5. Глубины проникновения в почву 95% ^{90}Sr за 5 и 9 лет после внесения разных доз солей (1 – 0, 2 – 0.1, 3 – 0.5, 4 – 2 кг/м²).

Таблица 3. Оценки параметров моделей миграции ⁹⁰Sr через 5 и 9 лет после внесения хлористого аммония

Соль и доза внесения, кг/га	Диффузия из мгновенного источника на поверхности почвы		Диффузия из слоя 0-h см		Диффузия с фиксацией, мгновенный источник на поверхности почвы		Конвективная диффузия из мгновенного источника на поверхности почвы		Конвективная диффузия с массообменом на глубине h см			
	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$C_0(0-h), \text{доля}/\text{см}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$C_0(0-h), \text{доля}/\text{см}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$
NH ₄ Cl, 0.1	1.5-3	$\frac{8-11}{6-10}$	$\frac{7-8}{4.4-5.8}$	5 лет после внесения соли								
				600-6	1700-5 (ф)	1	4-10	4-7	4-6	2.2-3		
				3	≤6	1.5-3	-4...+4	-	-	-		
NH ₄ Cl, 0.5	3.5-6	$\frac{12-13}{11-14}$	$\frac{12}{6.4-7.4}$	5 лет после внесения соли								
				600-60	500-25 (ф)	2*	7-10*	~13*	~0.1*	~5		
				30	10-30	4-6	-4...+4	-	-	-		
NH ₄ Cl, 2	4-6	$\frac{20-30}{19-27}$	$\frac{10}{6.6-7.4}$	5 лет после внесения соли								
				600-30	550-10 (ф)	5-6	-10...+4	10	~0.11	~2.4		
				20	7-15	10	-25...-7	21-23	-0.4...+0.6	3.8-4		
Контроль	1.2-1.7	$\frac{1.8-2}{~1.7}$	$\frac{15}{~6.5}$	9 лет после внесения соли								
				7	7-10 (ф)	1.0-1.5	-1...+1.8	1.4-1.6	-0.3...+0.6	6.5-8.5		
				2	0.5-2.6	0.8	-0.6...+0.7	-	-	-		
NH ₄ Cl, 0.1	~(0.95-1.0)	$\frac{2.3}{1.5}$	$\frac{12.5}{7-7.5}$	9 лет после внесения соли								
				600-6	1600-10 (ф)	2-3*	4-7*	1.5-2.5	0.3...1.5	4.5-5.5		
				3	4-8	2-3*	-	-	-	-		
NH ₄ Cl, 0.5	-	$\frac{5.5}{4-6}$	$\frac{17.5-22.5}{11-12}$	9 лет после внесения соли								
				600-30	190-8 (ф)	2-3*	4-7*	5	-0.7...+0.3	9		
				10	2-3	7-10	-5...+3	-	-	-		
NH ₄ Cl, 2	7-9	=	=	9 лет после внесения соли								
				600-30	150-4.5 (ф)	7-10	-5...+3	=	=	=		
				10	≤3	10	≤3	=	=	=		

Примечание. D – коэффициент диффузии в почве в целом, D_k – коэффициент конвективной диффузии в почве в целом, C₀(0-h) – начальная концентрация ⁹⁰Sr в верхнем слое почвы 0-h см (оценена как параметр модели), L₁ – диффузионный параметр в модели с кинетикой необратимой сорбции, β – константа скорости необратимой сорбции (фиксации) ⁹⁰Sr твердой фазой почвы, V – скорость направленного (конвективного) переноса ⁹⁰Sr в почве в целом (плюс означает направление вниз, минус – направление вверх), C_{вх} – концентрация радиостронция во входном потоке на глубине h. (ф) означает, что при данных величинах параметров практически все количество ⁹⁰Sr в профиле почвы фиксировано.

*Данные оценки параметров конвективно-диффузионной модели соответствуют наличию пика концентрации ⁹⁰Sr в профиле почвы через 9 лет после внесения соли. Прочерк – адекватного решения не найдено. То же в табл. 4, 5.

Таблица 4. Оценки параметров моделей миграции ^{90}Sr через 5 и 9 лет после внесения сульфатов железа

Соль и доза внесения, кг/га	Диффузия из мгновенного источника на поверхности почвы		Диффузия из слоя 0– h см		Диффузия с фиксацией, мгновенный источник на поверхности почвы		Конвективная диффузия из мгновенного источника на поверхности почвы		Конвективная диффузия с массообменом на глубине h см		
	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$C_0(0-h), \text{доля}/\text{см}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\frac{h=4}{h=6}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$	$C_{\text{вх}}, \text{доля}/\text{см}$
5 лет после внесения соли											
$\text{FeSO}_4, 0.5$	3–6	$\frac{25}{15-16}$	$\frac{8}{6.2-6.4}$		600–30	700–13 (Ф)	2	4–11	20	$\frac{-0.2...+1}{-}$	$\frac{3.2-3.4}{-}$
					20	8–23	5	–8...+2	–	–	–
					10	2.5–10	10	–30...–10	–	–	–
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 0.5$	9–11	$\frac{30}{25-30}$	$\frac{18}{10}$		6	0.7–5	–	–	–	–	–
					5	≤ 3	9–11	–5...+1	–	–	–
					600–100	200–20 (Ф)	20	–31...–17	33–50	$\frac{-2.5...+3}{-}$	$\frac{-}{3.6-4.4}$
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 2$	7.0–7.8	$\frac{26-34}{\sim 30}$	$\frac{9.4-11}{\sim 7}$		10	400–9 (Ф)	5.4–5.5*	4–5.5*	22–33	$\frac{-3...+2}{-0.5...+1}$	$\frac{3.4-4.2}{\sim 2.4}$
					7	≤ 0.5	10	–10...–4	~ 37	–	–
					600–30	1.5–4	10	–	–	–	–
9 лет после внесения соли											
Контроль	1.2–1.7	$\frac{1.8-2}{\sim 1.7}$	$\frac{15}{\sim 6.5}$		7	7–10 (Ф)	1.0–1.5	–1...+1.8	$\frac{1.4-1.6}{-}$	$\frac{-0.3...+0.6}{-}$	$\frac{6.5-8.5}{-}$
$\text{FeSO}_4, 0.5$	1.3–3.0	$\frac{-}{\sim 5}$	$\frac{-}{\sim 5}$		2	0.5–2.6	0.8	2.3–4	–	–	–
					600–10	700–8 (Ф)	1.25–2.0	–2...+1	–	–	–
					6	4–8	3.2	–9...–3.5	–	–	–
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 0.5$	–	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$		3	1–4	–	–	–	–	–
					2	≤ 2	1–1.2*	4–8	–	–	–
					–	–	2.5–4*	4–7*	–	–	–
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 2$	–	$\frac{5-10}{6.5-9}$	$\frac{15-20}{11-14.5}$		–	–	–	–	$\frac{6}{6.5-10}$	$\frac{-0.8...+1}{-1...+1}$	$\frac{9-10}{4.8-6.5}$
					–	–	–	–	–	–	–

Таблица 5. Оценки параметров моделей миграции ⁹⁰Sr через 5 и 9 лет после внесения хлористого калия

Соль и доза внесения, кг/га	Диффузия из мгновенного источника на поверхности почвы		Диффузия из слоя 0–h см $\frac{h=4}{h=6}$		Диффузия с фиксацией, мгновенный источник на поверхности почвы		Конвективная диффузия из мгновенного источника на поверхности почвы		Конвективная диффузия с массообменом на глубине h см $\frac{h=4}{h=6}$		
	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$C_0(0-h), \text{доля}/\text{см}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$
5 лет после внесения соли											
KCl, 0,5	4–7.5	=	=	600–30	400–13 (Ф)	3.5–7.5	–4...+7	=	=	=	=
		=	=	10	1.5–6.0						
	3.5–5.5	$\frac{15-25}{16-27}$	$\frac{8.4-11}{5.4-6.2}$	600–20	500–10 (Ф)	4–5	–1...+3	$\frac{-}{30^*}$	$\frac{-}{1.3^*}$	$\frac{-}{2.2}$	
Контроль	1.2–1.7	$\frac{1.8-2}{\sim 1.7}$	$\frac{15}{\sim 6.5}$	7	7–10 (Ф)	1.0–1.5	–1...+1.8	$\frac{1.4-1.6}{-}$	$\frac{-0.3...+0.6}{-}$	$\frac{6.5-8.5}{-}$	
	–	$\frac{2.5}{2.2}$	$\frac{\sim 10}{\sim 6}$	2	0.5–2.6	0.15–0.35*	5–8*	$\frac{2.5}{2.1}$	$\frac{-0.5...+0.5}{-2...-0.5}$	$\frac{4.8-5.5}{3-4}$	
	–	$\frac{-}{1.7-3}$	$\frac{-}{11.5-14}$	–	–	–	–	$\frac{1.4^*}{\sim 1.5^*}$	$\frac{0.9-1.2^*}{\sim 1.2^*}$	$\frac{13-17.5}{\sim 6.5}$	
9 лет после внесения соли											

меньшую сторону, она больше s_b в 1.7 раза, что слабо значимо. Все же это уменьшение заглублиения со временем, что вызывает вопросы;

$$\text{б) } - \text{NH}_4\text{Cl, доза } 2 \text{ кг/м}^2 - \text{Гл(9)} = \\ = 0.116 + 1.352 \text{ Гл(5)}, \quad (5)$$

где $R^2 = 0.9999$, $F = 8551(2.1)$, $s_b = 0.0103$. В этом случае отклонение коэффициента регрессии от 1 в большую сторону в 34 раза превышает s_b и соответственно значимо. Вывод однозначен – заглублиение продолжалось;

$$\text{в) } - \text{FeSO}_4, \text{ доза } 0.5 \text{ кг/м}^2 - \text{Гл(9)} = \\ = -2.82 + 1.08 \text{ Гл(5)}, \quad (6)$$

где $R^2 = 0.94$, $F = 8.43(2.1)$, $s_b = 0.271$. Отклонение от 1 мало и незначимо, заглублиение остановилось;

$$\text{г) } - \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, \text{ KCl,} \\ \text{дозы } 0.5 \text{ и } 2 \text{ кг/м}^2 - \text{Гл(9)} = \\ = 0.524 + 0.637 \text{ Гл(5)}, \quad (7)$$

где $R^2 = 0.95$, $F = 17.7(11.10)$, $s_b = 0.047$. Отклонение от 1 в меньшую сторону превышает s_b почти в 8 раз и значимо. Интерпретация опять вызывает вопросы, как для уравнения (4).

Еще одно заключение можно сделать на этом этапе – появление пика концентрации ^{90}Sr через 9 лет после внесения солей не коррелировало с глубиной заглублиения, т.е. предполагаемое конвективное перемещение ^{90}Sr в верхнем слое почвы не затрагивало более глубокие слои.

Сопоставление оценок диффузионных параметров для 2-х типов граничных условий показало и для диффузионной модели и для конвективно-диффузионной, что эти оценки меньше (или значительно меньше) для мгновенного источника на поверхности почвы по сравнению с диффузией из слоя 0–h. Поэтому усреднение оценок параметров по этим граничным условиям нежелательно, и сопоставление их по дозам внесения солей и по времени будем проводить для каждого граничного условия отдельно.

С ростом дозы внесения солей диффузионные параметры (D и D_k) однозначно увеличивались только от дозы 0.1 до дозы 0.5 кг/м² (NH_4Cl), а от дозы 0.5 к дозе 2 кг/м² для всех солей изменения этих параметров были несущественными. Эти результаты не очень согласовались с оценками фактических заглублиений ^{90}Sr (рис. 5). Возможно, это связано с тем, что использованные варианты моделей диффузии и конвективной диффузии и/или их упрощения оказались все же недостаточно адекватными в данном случае. Для кон-

трольного варианта (9 лет) оценки диффузионных параметров близки к наименьшим показателям при внесении солей, что соответствует наименьшим глубинам заглублиения.

Сравнить влияние разных солей на диффузионные параметры можно при одинаковых дозах внесения (0.5 и 2 кг/м²). Для этой цели для каждого срока и каждой дозы внесения были составлены ранжированные ряды величин D и D_k для каждого типа граничных условий. Однозначной картины не получилось, но максимальные величины параметров чаще всего соответствовали внесению трехвалентного железа, а минимальные – внесению KCl и NH_4Cl . Этот результат лишь частично согласовался с рис. 5.

Что касается стабильности диффузионных параметров во времени, то преобладающая ситуация – это уменьшение величин параметров. Это вполне согласуется с приведенными выше уравнениями регрессии, но ставит дополнительные вопросы. Как понимать остановку миграции вглубь почвы или даже обратный процесс?

Как отмечено выше, одним из таких процессов даже для ^{90}Sr может быть необратимая сорбция (фиксация). Это соответствует высказыванию в работе ([16], с. 62) о том, что во всех почвах ВУРС со временем возрастает количество фиксированных форм ^{90}Sr . В то же время получилось (табл. 3–5), что модель диффузии с фиксацией по критериям адекватности дала очень растянутые области оценок сочетаний параметров L_1 и β , сократить которые в рамках имеющейся информации не удастся. Так как использованная модель позволяет оценивать кроме общей концентрации в почве $P(x, t)$, также концентрации в 3-х фазах почвы по глубине и времени, то наличие соответствующих экспериментальных данных о содержании ^{90}Sr в этих фазах могло бы прояснить возникшую ситуацию.

Тем не менее и сейчас можно оценить время, требуемое для почти полной фиксации ^{90}Sr , исходя из принятой модели кинетики (формула (2)). Из нее следует

$$N\phi = \exp(-\beta T_\phi) \quad \text{или} \quad T_\phi = \ln(N\phi)/(-\beta),$$

где $N\phi$ – нефиксированная доля ^{90}Sr , T_ϕ – время фиксации; для параметра β берется нижний показатель области полной фиксации из табл. 3–5. Оцененные таким образом величины T_ϕ представлены в табл. 6 для долей фиксированного ^{90}Sr 95 и 99%.

Поскольку измеренные сроки миграции были 8 и 12 лет, то можно заключить из табл. 6, что этого времени могло быть в большинстве случаев до-

статочны для почти полной фиксации ^{90}Sr , и это соответствует остановке миграции и вышеприведенным уравнениям регрессии.

В отсутствие дополнительных экспериментальных данных будем исходить из вышеизложенных результатов. Модельное описание миграции дало неоднозначные результаты, в том числе из-за большой зависимости оценок параметров от граничных условий. Со временем оценки диффузионных параметров в основном уменьшались, а глубины миграции тоже уменьшались. В конвективно-диффузионной модели часто было получено несколько различающихся сочетаний параметров; среди них и отсутствие достоверного конвективного переноса, и достоверные переносы вниз и вверх. Диффузионная модель с фиксацией подтвердила возможность значительной фиксации ^{90}Sr в большинстве случаев.

В рамках использованных моделей миграции остановку допускает и конвективно-диффузионная модель, когда диффузионный поток, направленный вниз по градиенту концентрации, компенсируется конвективным переносом, направленным вверх. Направление вверх может быть обусловлено как движением влаги в результате испарения и транспирации растениями, осмотическим потоком почвенной влаги вверх к солевому фронту, так и непосредственным переносом вверх по корневым системам растений.

Самое интересное в этом случае – вопрос, что же произошло с солями? KCl и NH_4Cl давно используют для вытеснения обменных катионов почвы. Почему же здесь они не сработали, как ожидалось? Самое простое предположение – то, что они быстро вымылись вглубь почвы, а их короткое пребывание в верхнем слое оказало лишь небольшое и кратковременное влияние, в том числе через образование пика концентрации недалеко от поверхности почвы. Другое предположение состоит в том, что довольно высокие концентрации солей могли коагулировать почвенные коллоиды (особенно, двух- и трехвалентное железо), закрепить их на более крупных частицах почвы, изменяя ее физические свойства. В результате, за первым миграционным толчком от внесения солей мог последовать наблюдаемый спад интенсивности миграции.

Вообще говоря, устойчивость параметров модели миграции во времени может служить одним из критериев адекватности конкретной модели. Однако в полевых условиях имеется много приходящих обстоятельств, как было указано выше, которые не учитываются моделями и затрудняют использование этого критерия.

Таблица 6. Оценка максимального времени почти полной фиксации (на 95–99%) ^{90}Sr почвой, годы

Соль и доза, кг/м ²	5 лет после внесения соли	9 лет после внесения соли
Контроль	–	9.5–15
NH_4Cl , 0.1	19–29	9.5–15
NH_4Cl , 0.5	3.8–5.8	12–18
NH_4Cl , 2	9.5–15	21–33
FeSO_4 , 0.5	7.3–11	12–18
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 0.5	4.8–7.3	–
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 2	11–16	–
KCl , 0.5	7.3–11	–
KCl , 2	9.5–15	–

Примечание. Прочерк – отсутствие данных.

Самое удивительное – это достоверное снижение глубины миграции между 5-ю и 9-ю годами после внесения солей (при этом автоматически уменьшались диффузионные параметры). Исходя из вышесказанного, можно предположить 2 причины этого эффекта: 1 – двухстадийность миграции (в первые годы – движение вниз с солями или в результате десорбции ими, в дальнейшем – движение вверх по указанным выше причинам). 2 – неоднородность почвенного покрова или доз внесения солей, из-за чего отборы образцов через 5 и 9 лет проведены на несопоставимых участках.

Ранее в лабораторных диффузионных опытах для этой почвы без внесения солей была получена величина $D \approx 7 \times 10^{-8}$ см²/с [17], что больше того, что получено в контрольном варианте многолетней миграции в полевых условиях. Использование конвективно-диффузионной модели для данных о 20-летней миграции ^{90}Sr в этой же почве в условиях ВУРС также без внесения солей с предположением о зависимости параметров D_k и V от глубины показало изменения величин V от отрицательных до положительных и рост показателей D_k в пределах верхних 20 см от 1×10^{-8} до 3×10^{-7} см²/с [18]. Изменения величин V и нижняя величина D_k полностью соответствуют данным в контрольном варианте, а рост D_k с глубиной на порядок считаем результатом неоправданной детализации использованной в этой работе модели. С другой стороны, этот рост соответствует предпосылкам двухкомпонентной модели.

ВЫВОДЫ

1. Изучена миграция ^{90}Sr в условиях лесного ландшафта (территория ВУРС) на серой лесной почве при внесении различных солей на поверхность загрязненной радионуклидами почвы через 5 и 9 лет после внесения солей. Найдено, что глубины проникновения ^{90}Sr по профилю почвы возрастали при внесении солей по сравнению с контролем, но чаще всего не увеличивались со временем.

2. Оценены параметры 3-х динамических моделей миграции: диффузионной и конвективно-диффузионной (каждая с 2-мя типами граничных условий) и диффузионной с возможностью необратимой сорбции (фиксации) ^{90}Sr . Адекватные оценки параметров найдены не во всех случаях; кроме того, они сильно зависели от принятых граничных условий.

3. Зависимости оценок параметров моделей миграции от вида соли и дозы внесения были неоднозначными. Диффузионные параметры имели тенденцию к уменьшению со временем. Диффузионная модель с фиксацией показала высокую вероятность значительной фиксации ^{90}Sr во всех вариантах опыта, что согласовалась с замедлением и даже остановкой миграции, наблюдаемой в этом опыте экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с.
2. Махонько К.П. Вид профилей концентрации продуктов деления в почве при глобальных и локальных выпадениях // Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Сб. тр. по агроном. физике. Вып. 18. 1969. С. 48–56.
3. Махонько К.П., Чумичев В.Б. О проникновении некоторых продуктов деления в почву // Там же. С. 57–74.
4. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах: физико-химические механизмы и моделирование / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Энергоиздат, 1981. 98 с.
5. Константинов И.Е., Скотникова О.Г., Солдаева Л.С., Сисигина Т.И. Прогнозирование миграции Cs-137 в почве // Почвоведение. 1974. № 5. С. 54–58.
6. Корнеев Н.А. К чистой среде, чистому миру и светлым помыслам (комбинат “Маяк”, ВУРС, ОНИС в памяти и сердце). Изд. 2-е. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. 104 с.
7. Прохоров В.М., Фрид А.С. Влияние солевой концентрации почвенного раствора на скорость диффузии в почве микроколичеств стронция // Радиохимия. 1965. Т. VII. Вып. 4. С. 496–498 (Миграция в почве и ее моделирование: научн. тр. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. 2006. С. 74–77).
8. Прохоров В.М., Фрид А.С. Связь между адсорбцией и скоростью диффузии микроколичеств стронция в почве // Радиохимия. 1966. Т. VIII. Вып. 6. С. 695–696 (Миграция в почве и ее моделирование: научн. тр. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 84–86).
9. Прохоров В.М., Фрид А.С., Рыжинский М.В. Влияние известкования почвы на скорость диффузии в ней стронция-90 // Агрохимия. 1970. № 2. С. 40–48 (Миграция в почве и ее моделирование: научн. тр.. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 112–122).
10. Прохоров В.М., Рыжинский М.В., Фрид А.С. Влияние фосфата кальция на скорость диффузии и адсорбцию стронция-90 в почве // Агрохимия. 1970. № 12. С. 68–73 (Миграция в почве и ее моделирование: научн. тр.. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 122–129).
11. Граковский В.Г., Фрид А.С. Влияние хлористого кальция на вертикальную миграцию ^{90}Sr в серой лесной почве // Радиацион. биол. Радиоэкол. 2021. Т. 61. № 5. С. 543–554. <https://doi.org/10.31857/S0869803121040044>
12. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Закономерности варьирования величин диффузионных параметров вертикальной миграции тяжелых металлов и фтора в разных почвах при загрязнении // Агрохимия. 2020. № 11. С. 53–65.
13. Фрид А.С., Граковский В.Г. Диффузия ^{137}Cs в почвах // Почвоведение. 1988. № 2. С. 78–86 (Миграция в почве и ее моделирование: научн. тр.. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 196–206).
14. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. М.: Атомиздат, 1974. 215 с.
15. О поведении радиоактивных продуктов деления в почвах, их поступлении в растения и накоплении в урожае / Под ред. В.М. Ключковского. М.: АН СССР, 1956 (Перепечатка: “XXXVII Радиоэкологические чтения, посвящ. действ. члену ВАСХНИЛ В.М. Ключковскому. Обнинск, 27 ноября 2008 г. / Под ред. Р.М. Алексахина”. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2009. С. 83–266).
16. Казаченок Н.Н. Геоэкология техногенных радиоактивных изотопов: монография. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 283 с.
17. Граковский В.Г. Диффузия ионов в почвах // Техногенное воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля. Научн. тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1991. С. 44–53.
18. Голикова И.Н. Математическое моделирование вертикальной миграции радионуклидов в почве // Физико-химические аспекты плодородия почв Нечерноземной зоны. Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Вып. XXXI. М., 1984. С. 49–52.

Effect of Various Salts on the Vertical Migration of ^{90}Sr in Gray Forest Soil

V. G. Grakovsky^a and A. S. Frid^{b,#}

^a*Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Institute"
p. Pyzhevsky 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia*

^b*All-Russian Research Institute of Phytopathology
ul. Institute str., vlad. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia*

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

The vertical migration of ^{90}Sr in the conditions of a forest landscape of East Ural radioactive trace (EURT) on gray forest soil was studied when salts (NH_4Cl , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, KCl) were applied to the soil surface. Sampling was carried out 5 and 9 years after the introduction of salts (8 and 12 years after contamination of the territory). It was found that the penetration depths of ^{90}Sr along the soil profile increased with the introduction of salts compared to the control, but basically did not increase with time. The parameters of 3 dynamic migration models are estimated: diffusive, convective-diffusive (each with 2 types of boundary conditions) and diffusive with the possibility of irreversible sorption (fixation) of ^{90}Sr . It was found that adequate estimates of the parameters of these models strongly depended on the accepted boundary conditions. The dependences of the estimates of the parameters of the migration models on the type of salt and the dose of application were ambiguous. The diffusion parameters tended to decrease with time. The diffusion model with fixation showed the possibility of significant fixation of ^{90}Sr in all variants of the experiment, which was consistent with the slowdown and even stopping of migration observed experimentally in this experiment.

Key words: ^{90}Sr , vertical migration in soil, gray forest soil, EURT, introduction of NH_4Cl , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, KCl , parameters of dynamic migration models, fixation of ^{90}Sr .

УДК 632.15:632.12(470.46)

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ АСТРАХАНСКОГО ГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА НА КАЧЕСТВО ПОЧВ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ

© 2022 г. А. М. Гребенников

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

E-mail: great1956@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2021 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Изучено влияние серосодержащих выбросов (диоксида серы, сероводорода и элементарной серы) Астраханского газового комплекса (АГК) на почвенный покров (почвенные образования на переветренных песках и соровые солончаки) в процессе почвенного обследования. На фиксированных глубинах 0–5, 20–25, 35–40 и 55–60 см почвы отбирали образцы без видимых нарушений и включений элементарной серы, удаленных от границ АГК на 50–100 м; в нарушенных почвах с включениями элементарной серы или ее застывших расплавы на участках, примыкающих к границам АГК с местами складирования элементарной серы; в почвах на участках, сходных по почвенному покрову с территорией, прилегающей к АГК, и удаленных от нее на 7 и 30 км. В отобранных образцах определяли pH_{H_2O} , содержание сульфидов, количество плотного остатка в водной вытяжке, содержание в ней бикарбонатов, хлоридов и сульфатов. Установлено, что воздействие серосодержащих выбросов АГК на прилегающие почвы выразилось в их значительном подкислении и увеличении содержания сульфатов вплоть до засоления, что снижало качество почв. Факторами, усиливающими эти процессы, были нарушенность почв, содержание в них включений серы и наличие слоя застывшего серного расплава.

Ключевые слова: серосодержащие выбросы, подкисление почв, сульфатное засоление, почвенные образования, соровые солончаки.

DOI: 10.31857/S0002188122060072

ВВЕДЕНИЕ

От промышленных предприятий в окружающую среду соединения серы в основном могут поступать в виде сернистого ангидрида, сероводорода и элементарной серы. Сернистый ангидрид, поступая в атмосферу, достаточно быстро трансформируется до серной кислоты, выпадающей на поверхность почвы с осадками или в результате сухого осаждения. Сероводород в атмосфере в основном окисляется до сернистого ангидрида, и дальнейшая трансформация этого вещества происходит в соответствии с вышеописанной схемой. Однако при этом, учитывая, что время жизни сернистого ангидрида и сероводорода в атмосфере составляет ≈ 4 сут [1], а молекулярная масса этих веществ превышает среднюю массу воздуха, при определенных погодных условиях и большом объеме выбросов эти газы могут концентрироваться в приземном слое воздуха и оказать существенное негативное влияние на живые организмы. Прямое действие двуокиси серы приводит к отмиранию отдельных органов растений, ухудше-

нию роста и урожайности, а также качества сельскохозяйственной продукции. Наиболее сильно сернистый ангидрид воздействует на процессы в листьях растений. При этом может снижаться устойчивость растений к засухе, заморозкам и другим неблагоприятным факторам. Различают 5 степеней повреждения растений диоксидом серы в зависимости от его концентрации и продолжительности поглощения листьями: отсутствие повреждений, скрытые, хронические, острые и катастрофические. Активации повреждаемости растений диоксидом серы способствует повышенная температура, влажность воздуха и солнечная радиация, т.е. факторы, повышающие газообмен и поглощение токсичных веществ. При пониженной освещенности и ночью повреждаемость растений уменьшается. Особенно сильно от диоксида серы страдают хвойные породы: пихта, ель, сосна обыкновенная, лиственница и др. [2]. Воздействие диоксида серы в концентрациях больше ПДК может вызвать у человека и животных нарушение функций дыхания и существенное увеличе-

ние заболеваемости различными болезнями дыхательных путей, отмечено действие на слизистые оболочки [3]. Сернистый ангидрид является более токсичным веществом для растений по сравнению с животными и человеком [4]. Например, допустимая максимально-разовая концентрация SO_2 для растений оказалась равной 0.02 мг/м^3 , для животных и человека — 0.05 мг/м^3 [2].

В больших концентрациях сероводород вызывает повреждения листьев, дефолиацию, угнетение роста, что связано с ингибированием цитохром-оксидазы [5]. Однако в малых дозах сероводород способен заметно ускорить рост растений [6]. Содержание во вдыхаемом воздухе сероводорода в количестве 1 мг/л может вызвать быструю смерть человека и животного, а длительное воздействие незначительной его примеси вызывает хроническое отравление, проявляющееся общей слабостью, нарушениями пищеварения, воспалением дыхательных путей [7]. Для растений, по сравнению с человеком и животными, сероводород является менее токсичным веществом [4].

Помимо прямого диоксид серы и сероводород могут оказывать и косвенное воздействие на живые организмы через почву. Накопление этих веществ и продуктов их трансформации в почве происходит в результате сухого осаждения диоксида серы и сероводорода и их поступления на почву с осадками. Это может приводить к уменьшению почвенного плодородия, засолению почв, гибели полезной микрофлоры, нарушению роста, отравлению корневых систем и нарушению минерального питания [8]. В зависимости от величины окислительно-восстановительного потенциала рассматриваемые газы трансформируются в сульфаты в аэробных условиях и в сульфиды при недостатке воздуха в почве. При этом отмечено подкисление почв. Часть соединений серы используется при формировании органического вещества.

Элементарная сера может распространяться на близлежащую территорию от мест ее производства и хранения главным образом в виде тонкодисперсного порошка. Иногда в почвах могут создаваться условия для образования элементарной серы из сернистых соединений. Согласно расчетным диаграммам Пурбе, в зависимости от pH почвы элементарная сера может быть устойчивой в определенном интервале окислительно-восстановительного потенциала. При показателях, меньших нижней границы этого интервала, элементарная сера начинает переходить в сульфиды, при величинах, больших верхней границы, — в сульфаты [9].

Роль серы в жизни растений трудно переоценить. По физиологическому значению в жизни растений среди элементов минерального питания сера занимает 3-е место после азота и фосфора [10]. Сера входит в состав аминокислот цистина, цистеина, метионина и всех без исключения запасных и конституционных белков. Сера в растительном организме выполняет роль регулятора определенного уровня окислительно-восстановительного потенциала. Велика роль серы в таких важнейших процессах в жизни растений, как дыхание, фотосинтез и первичная ассимиляция азота, а также в образовании растительных масел, ферментов, гормонов, антибиотиков и ряда макроэргических компонентов. Сера повышает устойчивость растений к засухе, высоким и низким температурам и улучшает использование растением основных элементов питания. Дефицит серы тормозит восстановление и ассимиляцию азота растениями [10].

Сера также необходима микроорганизмам и животным. В микробной клетке на ее долю приходится $\approx 1\%$ от сухого вещества биомассы [11]. Поступление серы в организм животных происходит в основном с растительными кормами. Сера содержится практически во всех органах животных. По концентрации в них серы они располагаются в примерном убывающем порядке: шерсть — хрящи — печень — кости — мышцы — кожа — кровь [12]. Сера, входя в состав аминокислот цистеина, цистина и метионина, участвует в тех функциях, которые выполняют эти аминокислоты как составные части тканевых протеинов и различных гормонов и витаминов [13]. Дефицит серы у животных вызывает болезни кожи, отеки. Симптомы дефицита серы у жвачных животных можно наблюдать только при длительном скормливании животным синтетических продуктов без серы или очень бедных серой. При этом животные теряют аппетит, выпадает шерсть, отмечены обильное слюноотделение, слезотечение. Отсутствие или дефицит серы в рационе птицы и свиней отрицательно сказываются на росте молодняка и снижают продуктивность взрослых животных. Нежелателен также и избыток неорганической серы. У свиней и птицы наблюдается задержка роста, заболевание рахитом, гастроэнтеритом [14].

Таким образом, увеличение концентрации сульфат-иона в почве до определенного уровня оказывает позитивное влияние на растения, а также на микроорганизмы и животных. Следует также ожидать, что при дальнейшем увеличении количества сульфат-иона в почве можно достигнуть такой его концентрации, превышение которой приведет к негативному влиянию сульфатов

на растения и другие живые организмы. Однако нормативов на содержание сульфатов в почве до настоящего времени не разработано. Существующие величины ПДК для элементной серы и серной кислоты составляют 160 мг серы/кг почвы [15], но применение этого норматива к содержанию сульфатов было бы не корректным, т.к. по воздействию на почву эти вещества нельзя приравнять к серноокислым солям. По той же причине ПДК для сероводорода, равная 0.4 мг серы/кг почвы [15] следует считать не приемлемой для оценки уровня содержания сульфидов в почве. Негативное влияние сульфат-иона на растения, абиотическую и биотическую часть почвы может проявляться при очень высоком его содержании, вызывающем засоление почвы, которое является одним из негативных показателей качества почв [16]. Пороговый показатель содержания солей, начиная с которого они могут оказывать негативное влияние на почву и растительность, зависит от химизма засоления. Существуют 5 типов химизма засоления почв с участием сульфатов, характеризующихся следующими порогами токсичности. Сульфатный, сульфатно-содовый и содово-сульфатный типы засоления имеют пороговую величину, равную 0.15% (1500 мг/кг почвы), сульфатно-хлоридный и хлоридно-сульфатный типы – соответственно 0.05–0.10% (500–1000 мг/кг почвы) [17]. До указанных уровней содержания солей в зависимости от химизма засоления почва не считается засоленной и не нуждается в проведении специальных мелиоративных мероприятий, соли в таком количестве не оказывают негативного влияния на почвы и растительность, а продукция сельского хозяйства, выращенная на таких почвах, не считается экологически опасной для здоровья человека.

Цель работы – оценка влияния серосодержащих выбросов Астраханского газового комплекса (АГК) на качество почв прилегающей территории.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Территории района исследования расположена в пределах песчаного массива Батпайсагыр. Мощность мелкозернистых светло-желтых песчаных отложений варьировала в пределах нескольких метров [18]. Абсолютными доминантами в почвенном покрове района исследования являются примитивные песчаные почвы (почвенные образования на перевеянных песках). Эти образования приурочены к подвижным, слабо- и полужакрепленным пескам и представлены как самостоятельными контурами, так и комплексами с соровыми солончаками, занимающими понижения рельефа с близким залеганием сильно

минерализованных почвенно-грунтовых вод, которые часто вскрываются на глубине 0.5–1.0 м, а иногда выходят на поверхность. Наиболее крупные из соровых понижений представляют собой пологосклонные котловины соленых озер, пересыхающих в жаркое время года. На примыкающих к району исследования территориях встречаются бурые полупустынные почвы как отдельными выделами, так и в комплексе с полупустынными солонками, примитивными песчаными и аллювиальными луговыми почвами [18].

Профиль исследованных почв (почвенных образований на перевеянных песках и соровых солончаков) очень слабо дифференцирован на генетические горизонты. На поверхности почвенных образований на перевеянных песках педологически была выражена маломощная серая пленка (1–3 мм). Остальная толща на всю мощность была представлена однородным желтым песком. Поверхность сорового солончака была покрыта иногда влажной коркой солей мощностью 1.0–3.0 см. Ниже располагалась глееватая с заметным запахом сероводорода, неоднородно окрашенная, буро-сизая толща с ржавыми пятнами, которая с глубиной сменялась в сильной степени оглеенным песком, издающим сильный запах сероводорода.

Для оценки влияния серосодержащих выбросов АГК на почвенный покров в сентябре 2009 г. проводили почвенное обследование, в процессе которого на фиксированных глубинах 0–5, 20–25, 35–40 и 55–60 см отбирали образцы в местах, удаленных от границ АГК на 50–100 м в почвах без видимых нарушений и включений элементной серы. На тех же глубинах отбирали образцы в нарушенных почвах с включениями элементной серы или ее застывших расплавов на участках, примыкающих к границам АГК с местами складирования элементной серы. На указанных глубинах отбирали образцы на участках, сходных по почвенному покрову с территорией, прилегающей к АГК и удаленных от нее на 7 и 30 км. Участок, отстоящий от АГК на 30 км был взят в качестве фонового, поскольку при таком удалении значимое влияние на него серных выбросов этого предприятия было исключено.

В отобранных образцах определяли величину pH_{H_2O} , содержание сульфидов титриметрическим методом, количество плотного остатка в водной вытяжке, содержание в ней бикарбонатов, хлоридов и сульфатов согласно методикам [19–22].

Выводы о влиянии веществ, источником выбросов которых был АГК, были сделаны на основании сопоставления свойств почв фонового участка с почвами и грунтами, расположенными на территории, прилегающей к комплексу. Для

оценки достоверности различий между сравниваемыми почвами по уровню исследованных свойств использовали непараметрический метод Краскела–Валлиса [23], t -критерий Стьюдента для случая неравных дисперсий сравниваемых последовательностей и F -критерий Фишера. Использование этих критериев позволило с позиций 3-х различных подходов оценить степень различия между сравниваемыми последовательностями величин. При этом считали, что различия между последовательностями исследуемого свойства существуют, если это подтверждается применением не менее чем 2-х критериев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено (табл. 1), что в ненарушенных почвах, не содержащих видимых включений элементной серы и расположенных в местах, удаленных от границ АГК на расстояние 50–100 м, в пределах верхних 5 см как в почвенных образованиях на перевейанных песках, так и в солончаках отмечена очень сильноокислая реакция (здесь и далее градации по реакции почв представлены в соответствии с [24]), тогда как на фоновом участке эти почвы в слое 0–5 см характеризовались среднещелочной реакцией. Такую же реакцию в слое 0–5 см имели аналогичные почвы, удаленные от АГК на расстоянии 7 км. Однако уже на следующей глубине и ниже почвы, расположенные на расстоянии 50–100 м от АГК и на фоновом участке имели примерно одинаковую реакцию, соответствующую сильнощелочному диапазону. Почвы, отстоящие от АГК на расстояние 7 км, характеризовались в слое 20–60 см менее щелочной реакцией по сравнению с почвами, расположенными в 50–100 м от АГК и на фоновом участке, что, по видимому, было связано с различиями, обусловленными природными факторами.

В местах с нарушенными почвами, под разливами застывшей серы и содержащими включения этого вещества (от пыли до небольших кусков) отмечали еще более сильное подкисление. Например, под 40-см толщей застывшей серы, в месте ее аварийного разлива на глубинах 0–40 см реакция почвы была очень сильноокислой. При этом уровень кислотности, характерный для слоя 0–5 см ненарушенных почв, расположенных в 50–100 м от границы АГК, под разливом застывшей серы обнаруживался лишь на глубине 35–40 см. Вышерасположенный слой имел значительно более кислую реакцию (pH_{H_2O} составлял 2.00–2.74 ед.). Ниже по профилю величины pH_{H_2O} обнаруживали тенденцию к возрастанию, но при этом не выходили за рамки диапазона, соответствующего очень кислой реакции среды. Высокой степенью

кислотности обладал слой 0–25 см нарушенных почвенных образований на перевейанных песках, которые содержали серу и находились в 50 м от границы АГК. Кислотность этого слоя была несколько меньше по сравнению с аналогичным слоем, расположенным под серным разливом, и соответствовала pH_{H_2O} , равной 2.75–3.07 ед., но значительно превышала кислотность ненарушенных почв, расположенных в 50–100 м от АГК.

Таким образом, воздействие серных выбросов АГК приводило к подкислению верхнего почвенного слоя мощностью 5 см до уровня очень сильноокислой реакции, тогда как, судя по фоновому участку, до воздействия АГК этот слой обладал среднещелочной реакцией. При этом по реакции почвы на глубине 0–5 см обнаруживали максимально возможные отличия от почв на следующей глубине отбора образцов (20–25 см): реакция почв на верхней глубине была очень сильноокислая, на нижней очень сильно щелочная. Одной из причин такого резкого контраста кислотности можно считать низкую буферность исследованных почв, связанную с их песчаным гранулометрическим составом, низким содержанием гумуса и глинистых частиц. В таких условиях даже относительно небольшие количества кислоты, поступающей в почву, способны очень сильно увеличить ее актуальную кислотность, при этом следует ожидать появления резких различий в величине pH в профиле почв.

Подкисление почв значительно усилилось и распространилось на большую глубину в местах с нарушенными почвами, содержащими включения элементной серы. В местах аварийных разливов серы кислотность почв была еще выше и, хотя как в этих местах, так и в почвах, содержащих включения элементной серы, реакция среды характеризовалась экстремальной градацией — очень сильно кислая, в почвах под застывшим разливом серы кислотность была статистически значимо выше по сравнению с почвами, содержащими включения элементной серы.

Таким образом, выбросы АГК, не сопряженные с нарушением почв и появлением в них включений элементной серы, на территориях, прилегающих к этому предприятию, оказывали сильное подкисляющее воздействие на поверхностный слой почв. Нарушения почв и загрязнение их элементной серой приводили к более серьезному подкислению как в плане возрастания величин кислотности, так и увеличения мощности подкисленного слоя. Однако наибольшее подкисление почв было отмечено под слоем застывшего расплава серы. Из этого следует, что поступление элементной серы в почву было одним из значимых факторов ее подкисления, который

Таблица 1. Средние величины pH_{H_2O} и содержания сульфидов в исследованных почвах (\pm ошибка среднего)

№ п/п*	Места отбора образцов почв	Глубина взятия образцов, см	pH_{H_2O}	Содержание сульфидов
1	Почвенные образования на переветренных песках в 50–100 м от границы АГК	0–5	4.17 ± 0.23	0.50 ± 0.06
		20–25	8.68 ± 0.06	0.54 ± 0.05
		35–40	8.65 ± 0.07	0.48 ± 0.04
		55–60	8.53 ± 0.10	0.56 ± 0.04
2	Соровые солончаки в 50–100 м от окраины АГК	0–5	3.61 ± 1.05	0.33 ± 0.02
		20–25	8.96 ± 0.09	0.42 ± 0.04
		35–40	8.90 ± 0.06	0.38 ± 0.02
		55–60	8.78 ± 0.11	0.35 ± 0.07
3	Разлив застывшей серы (слой мощностью 40 см) на поверхности нарушенных почвенных образований на переветренных песках, расположенных вблизи границы АГК	0–5	2.00 ± 0.07	0.33 ± 0.03
		10–15	2.64 ± 0.05	0.31 ± 0.01
		20–25	2.74 ± 0.18	0.33 ± 0.03
		35–40	4.12 ± 0.21	0.37 ± 0.03
		55–60	4.45 ± 0.31	0.36 ± 0.02
4	Нарушенные почвенные образования на переветренных песках с включениями серы, расположенные в 50 м от границы АГК	0–5	2.87 ± 0.31	0.22 ± 0.03
		10–15	3.07 ± 0.18	0.25 ± 0.03
		20–25	2.75 ± 0.11	0.22 ± 0.04
		35–40	2.95 ± 0.12	0.24 ± 0.06
		55–60	3.75 ± 0.23	0.21 ± 0.02
5	Почвенные образования на переветренных песках (склон сорового понижения в 7 км к западу от АГК)	0–5	8.31 ± 0.09	0.39 ± 0.02
		20–25	8.19 ± 0.08	0.39 ± 0.01
		35–40	8.04 ± 0.03	0.46 ± 0.02
		55–60	7.89 ± 0.04	0.37 ± 0.04
6	Соровый солончак (днище понижения в 7 км к западу от АГК)	0–5	8.37 ± 0.03	0.22 ± 0.01
		20–25	8.34 ± 0.03	0.27 ± 0.02
		35–40	7.99 ± 0.02	0.34 ± 0.02
		55–60	7.81 ± 0.03	0.42 ± 0.03
7	Почвенные образования на переветренных песках (фоновый участок в 30 км по направлению на восток-юго-восток от АГК и в 6 км севернее п. Малый Арал)	0–5	8.27 ± 0.04	0.11 ± 0.01
		20–25	8.51 ± 0.03	0.11 ± 0.01
		35–40	8.59 ± 0.02	0.24 ± 0.05
		55–60	8.69 ± 0.06	0.20 ± 0.02
8	Солончак (фоновый участок в 30 км по направлению на восток-юго-восток от АГК и в 6 км севернее п. Малый Арал)	0–5	8.08 ± 0.05	0.13 ± 0.01
		20–25	8.57 ± 0.01	0.16 ± 0.01
		35–40	8.54 ± 0.03	0.18 ± 0.02
		55–60	8.53 ± 0.03	0.15 ± 0.02

*Нумерация та же в табл. 2.

мог быть значительно усилен при повышении температуры серы, что и наблюдали при поступлении расплава этого вещества на поверхность почвы.

Содержание сульфидов в профиле ненарушенных почв, расположенных в 50–100 м от АГК, не изменялось в рамках какой-либо выраженной тенденции с глубиной. Различия по содержанию этих веществ на исследованных глубинах как в профиле почвенных образований на переветренных песках, так и соровых солончаков, не были

статистически значимыми. При этом в соровых солончаках по сравнению с почвенными образованиями на переветренных песках сульфидов сохранилось меньше, но статистического подтверждения этот факт не получил. В профилях аналогичных почв, удаленных на 7 и 30 км от АГК, в большинстве случаев также не обнаружено отличий по содержанию сульфидов на различных глубинах. Профили нарушенных почвенных образований на переветренных песках, содержащих

включения серы и покрытых застывшим серным расплавом, характеризовались практически одинаковым содержанием сульфидов в пределах исследованных глубин.

Близкое расположение к АГК не приводило к появлению локальных аккумуляций сульфидов в почвенном профиле. С учетом этого и относительной однородности распределения сульфидов по исследованным глубинам в почвах, подверженных воздействию АГК, при проявлении тех же тенденций на фоновых участках, можно заключить, что влияние АГК на содержание сульфидов в почве не было существенным.

В профиле ненарушенных почвенных образований на перевеянных песках, расположенных в 50–100 м от АГК, наиболее высоким было содержание сульфатов, значительно меньше содержалось хлоридов и отсутствовали бикарбонаты (табл. 2). Общее содержание солей в слое 0–25 см соответствовало слабой степени засоленности по хлоридно-сульфатному типу, тогда как на глубине 35–40 см почвы не были засоленными. В аналогичных почвах, расположенных в 7 и 30 км от АГК содержалось значительно меньше солей, засоление по исследованному профилю нигде не было отмечено, и в составе солей обнаруживалось небольшое количество бикарбонатов. В солевом профиле солончаков, расположенных в 50–100 м от АГК, абсолютно доминировали сульфаты, которые и определяли химизм и степень засоления этих почв. Рассмотренный профиль был засолен по сульфатному типу и характеризовался очень сильной степенью засоления в слое 0–25 см и сильной степенью – на глубине 35–40 см. По содержанию сульфатов солончаки, удаленные на 50–100 м от АГК, примерно соответствовали солончакам, расположенным в 7 км от комплекса, но при этом солевой состав последних включал значительное количество хлоридов и небольшое содержание бикарбонатов. Степень засоления в слое 0–40 см этих солончаков оценивалась как очень сильная, а на глубине 55–60 см – как сильная по хлоридно-сульфатному типу. Солончак на фоновом участке содержал по профилю значительно меньшее количество сульфатов по сравнению с выше рассмотренными аналогичными почвами. В остальном солевой состав этой почвы был близок к составу солончака, расположенного в 7 км от АГК, но при этом характеризовался более высоким содержанием хлоридов и менее выраженным засолением.

Нарушенные почвенные образования на перевеянных песках, содержащие включения серы и покрытые застывшим серным расплавом, содержали намного больше сульфатов по сравнению с

ненарушенными почвенными образованиями, удаленными на 50–100 м от АГК. Например, содержание сульфатов в нарушенных почвах, содержащих включения серы, было в 3.9–4.6 раза больше по сравнению с их количеством на соответствующих глубинах в ненарушенных почвах. Увеличение содержания сульфатов в профиле нарушенных почв, содержащих включения серы, привело к средней степени их засоления по сульфатному типу, выраженному по всему исследованному профилю. Еще более значительными были различия по содержанию сульфатов между нарушенными почвами под застывшими расплавами серы и ненарушенными почвами, удаленными на 50–100 м от АГК. Первые по отношению к последним содержали сульфатов на соответствующих глубинах в 7.6–40.4 раза больше.

Таким образом, серосодержащие выбросы АГК приводили к возрастанию содержания сульфатов в почвах, изменению химизма и увеличению степени засоления, сопряженному с ухудшением качества почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, воздействие серосодержащих выбросов Астраханского газового комплекса (АГК) на прилегающие почвы выразилось в осаждении на поверхность ненарушенных почв серосодержащих газов и, возможно, очень мелких, визуальными не обнаруживаемых твердых частиц серы, что приводило к сильному подкислению поверхности почвенных образований на перевеянных песках и к существенному увеличению содержания в них сульфат-ионов. При этом поверхностный слой с увеличением концентрации сульфатов оказывался более мощным по сравнению с подкисленным слоем, что, по-видимому, было связано с выносом по принципу электронеутральности вниз по профилю сульфатов, образующих водорастворимые соли в соединениях с большинством катионов, встречаемых в почве. Очень низкая буферность почвенных образований на перевеянных песках и солончаков приводила к резкому уменьшению величины pH_{H_2O} верхнего слоя почв до уровня очень сильнокислой реакции среды, тогда как pH_{H_2O} нижележащего слоя соответствовала сильнощелочному диапазону как в почвах, расположенных в 50–100 м от АГК, так и на фоновом участке. При этом поверхностный слой на фоновом участке характеризовался среднекислой реакцией. Если почвенные образования на фоновом участке были не засолены, так же как и на участке, находящемся в 7 км от АГК, то слой 0–25 см аналогичных почв,

Таблица 2. Содержание анионов и плотный остаток водорастворимых солей в почвах, тип и степень их засоления

№ п/п	Глубина взятия образцов, см	Общая HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Плотный остаток, мг/кг	Тип засоления	Степень засоления
		ммоль(экв)/100 г почвы мг/кг					
1	0–5	–	1.07 380 ± 90	1.59 763 ± 68	2260 ± 430	Хлоридно-сульфатный	Слабая
	20–25	–	0.91 322 ± 50	1.13 542 ± 72	1940 ± 320		
	35–40	–	0.36 127 ± 20	0.49 233 ± 56	981 ± 401		Не засолена
	55–60	34 ± 5	0.31 109 ± 12	0.84 403 ± 44	880 ± 208		
2	0–5	–	2.69 953 ± 113	27.2 13000 ± 580	24100 ± 1100	Сульфатный	Очень сильная
	20–25	–	2.45 870 ± 98	25.0 12000 ± 670	21100 ± 1000		
	35–40	–	1.58 560 ± 45	12.4 5970 ± 129	9870 ± 270		Сильная
	55–60	129 ± 9	1.06 376 ± 29	9.52 4570 ± 110	7770 ± 110		
3	0–5	–	0.17 60 ± 5	12.8 5770 ± 470	10600 ± 1100		
	10–15	–	0.25 85 ± 11	18.9 9100 ± 60	14800 ± 30		
	20–25	–	0.47 165 ± 2	20.3 9750 ± 50	16200 ± 160		
	35–40	–	0.45 156 ± 5	19.6 9420 ± 160	14900 ± 300		Сильная
	55–60	–	0.51 180 ± 9	– 9140 ± 200	11600 ± 300		
4	0–5	–	0.02 6.3 ± 0.5	7.33 3520 ± 470	3730 ± 580		Средняя
	10–15	–	0.03 9.3 ± 0.4	4.81 2310 ± 20	3670 ± 150		
	20–25	–	0.03 11.8 ± 0.5	4.44 2130 ± 130	3210 ± 320		
	35–40	–	0.04 14.3 ± 0.5	3.90 1870 ± 110	2840 ± 390		Слабая
	55–60	–	0.04 12.2 ± 0.8	4.51 2170 ± 130	3260 ± 420		
5	0–5	0.18 112	0.51 180 ± 30	1.38 663 ± 48	860 ± 125	Хлоридно-сульфатный	Не засолена
	20–25	0.20 121	0.34 122 ± 50	0.92 442 ± 72	743 ± 121		
	35–40	0.18 109	0.28 99 ± 18	0.38 184 ± 36	672 ± 101		
	55–60	–	–	–	–		
							–

Таблица 2. Окончание

№ п/п	Глубина взятия образцов, см	Общая HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Плотный остаток, мг/кг	Тип засоления	Степень засоления
		ммоль(экв)/100 г почвы мг/кг					
6	0–5	0.24 147 ± 5	14.8 5260 ± 490	18.2 8760 ± 200	26200 ± 2100		Очень сильная
	20–25	0.22 136 ± 10	12.2 4330 ± 350	15.4 7400 ± 210	22000 ± 1900		
	35–40	0.23 141 ± 8	6.4 2250 ± 310	11.6 5550 ± 300	16700 ± 1000		
	55–60	0.21 129 ± 9	4.5 1590 ± 460	7.3 3520 ± 500	9450 ± 290		
7	0–5	0.22 133 ± 5	0.54 190 ± 75	1.19 573 ± 5	933 ± 174		Не засоленная
	20–25	0.21 130 ± 10	0.51 179 ± 89	0.91 435 ± 15	718 ± 122		
	35–40	0.27 167 ± 9	0.37 130 ± 56	0.76 366 ± 20	899 ± 97		
	55–60	0.17 102 ± 21	0.25 89 ± 14	0.44 210 ± 12	567 ± 23		
8	0–5	0.27 163 ± 2	3.18 1130 ± 60	4.79 2300 ± 50	5410 ± 150		Средняя
	20–25	0.33 202 ± 23	2.16 766 ± 45	3.90 1870 ± 70	4430 ± 140		
	35–40	0.30 180 ± 32	2.00 708 ± 89	3.50 1680 ± 100	4010 ± 190		
	55–60	0.38 234 ± 48	1.84 654 ± 79	3.39 1630 ± 90	3760 ± 210		

расположенных на расстоянии 50–100 м, в связи с увеличением содержания сульфатов характеризовался слабой степенью засоления. Увеличение содержания сульфатов в солончаках, расположенных в 50–100 м от АГК, привело к их очень сильному и сильному сульфатному засолению на исследованных глубинах, тогда как на фоновом участке солончаки соответствовали хлоридно-сульфатному типу засоления преимущественно средней степени. Солончак, находящийся в 7 км от АГК, по количеству солей был примерно сопоставим с солончаком, расположенным на расстоянии 50–100 м от АГК. Однако в первом по отношению к последнему на верхних двух глубинах количество сульфатов было в 1.5–1.6 раза меньше.

По сравнению с ненарушенными почвами, удаленными на 50–100 м от АГК, нарушенные почвенные образования на перевейанных песках, содержащие включения серы и покрытые застывшим серным расплавом, характеризовались более сильным подкислением и распространением

вниз по профилю, что сопровождалось более значительным увеличением содержания сульфатов на исследованных глубинах.

Не установлено влияния АГК на содержание сульфидов в почве, что возможно было вызвано относительно быстрой их трансформацией в сульфаты в условиях преобладания окислительных условий почв района расположения АГК и недолгого их существования в почвах.

Таким образом, воздействие серосодержащих выбросов АГК на прилегающие почвы выразилось в их значительном подкислении и увеличении содержания сульфатов вплоть до засоления, что снижало качество почв. Факторами, усиливающими эти процессы, были нарушение почв, содержание в них включений серы и наличие слоя застывшего серного расплава. По всей видимости два последние фактора можно свести к поступлению серы в почву и увеличению температуры ее взаимодействия с почвой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов В.Н., Тарасова Н.В.* Загрязнение атмосферы и заболеваемость детей Астраханской области // Усп. совр. естествознания. 2002. № 5. С. 62–63.
2. *Николаевский В.С.* Биологические основы газостойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 278 с.
3. *Гудериан Р.* Загрязнение воздушной среды. М.: Мир, 1979. 198 с.
4. *Чудинова Л.А., Орлова Н.В.* Физиология устойчивости растений. Пермь, 2006. 124 с.
5. *Hancock J.T., Whiteman M.* Hydrogen sulfide and cell signaling: Team player or referee? // Plant Physiol. Biochem. 2014. V. 78. P. 37–42.
6. *Rennenberg H.* The fate excess of sulfur in higher plants // Annu. Rev. Plant Physiol. 1984. V. 35. P. 121–153.
7. *Плященко С.И., Хохлов И.И.* Микроклимат и продуктивность животных. Л.: Агропромиздат, 1987. 64 с.
8. *Щербатюк А.П.* Растения как индикаторы состояния урбанизированных экосистем // Вестн. ЗабГУ. 2013. № 2. С. 56–60.
9. *Абрамов А.А.* Собр. соч. Т. 6. Флотация. Физико-химическое моделирование процессов. М., 2010. 607 с.
10. *Шеуджен А.Х.* Биогеохимия. Майкоп: ГУРИПП “Адыгея”, 2003. 1028 с.
11. *Стейниер Р., Эдельберг Э., Ингрэм Дж.* Мир микробов. Т. 1. М.: Мир, 1979. 320 с.
12. *Мак-Дональд П.* Питание животных. М.: Колос, 1970. 459 с.
13. *Георгиевский В.И., Анненков Б.Н., Самохин В.Т.* Минеральное питание животных. М.: Колос, 1979. 459 с.
14. *Косолапов В.М., Чуйков В.А., Худякова Х.К., Косолапова В.Г.* Минеральные элементы в кормах и методы их анализа. М.: ООО “Угрешская типография”, 2019. 272 с.
15. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.”
16. *Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Иванов А.Л., Ильин Л.И., Колесникова Л.Г., Петросян Р.Д., Шилов П.М., Филь П.П., Корчагин А.А.* Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Верс. 1.0 / Коллектив. монография. Иваново: ПресСто, 2021. 260 с.
<https://doi.org/0.51961/9785604637401>
17. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1972. Вып. 5. С. 36–40.
18. *Трушковский А.А.* Почвенные образования на эоловых песках Прикаспийской низменности между реками Волгой и Уралом // Генезис и классификация полупустынных почв. М., 1966. С. 167–221.
19. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.
20. ГОСТ 26424-85. Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке.
21. ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке.
22. ГОСТ 26426-85. Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке.
23. *Благовещенский Ю.Н., Самсонова В.П., Дмитриев Е.А.* Непараметрические методы в почвенных исследованиях. М.: Наука, 1987. 96 с.
24. *Смирнов П.М., Петербургский А.В.* Агрохимия. М.: Колос, 1975. 512 с.

Impact of Emissions from the Astrakhan Gas Complex on the Quality of the Soils of the Adjacent Territory

A. M. Grebennikov

Federal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Institute”

Pyzhevsky p. 7, p. 2, Moscow 119017, Russia

E-mail: gream1956@gmail.com

The influence of sulfur-containing emissions (sulfur dioxide, hydrogen sulfide and elemental sulfur) of the Astrakhan gas Complex (AGC) on the soil cover (soil formations on sifted sands and salt marshes) during the soil survey was studied. At fixed depths of 0–5, 20–25, 35–40 and 55–60 cm of soil, samples were taken without visible disturbances and inclusions of elemental sulfur, 50–100 m away from the boundaries of the AGC; in disturbed soils with inclusions of elemental sulfur or its frozen melts in areas adjacent to the boundaries of the AGC with storage sites of elemental sulfur; in soils in areas similar in soil cover to the territory adjacent to the AGC, and remote from it by 7 and 30 km. In the selected samples, pH_{H2O}, the content of sulfides, the amount of dense residue in the aqueous extract, the content of bicarbonates, chlorides and sulfates in it were determined. It was found that the effect of sulfur-containing AGC emissions on adjacent soils was expressed in their significant acidification and an increase in the content of sulfates up to salinization, which reduced the quality of soils. The factors reinforcing these processes were soil disturbance, the content of sulfur inclusions in them and the presence of a layer of solidified sulfur melt.

Key words: sulfur-containing emissions, acidification of soils, sulfate salinization, soil formations, salt marshes.