

Номер 4

ISSN 0002-1881

Апрель 2023

АГРОХИМИЯ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Влияние содержания подвижного калия в почвах на урожайность зерновых культур и затраты калийных удобрений на ее формирование
С. А. Шафран 3
- Физико-химические свойства чернозема выщелоченного при различной обработке почвы и применении удобрений в севообороте ЦЧР
О. А. Минакова, Д. С. Мерзликina, П. А. Косякин, Е. Н. Манаенкова, О. К. Борнатов 11
- Мониторинг плодородия и экотоксикологического состояния реперных участков дерново-подзолистых почв Ивановской области
А. А. Уткин 19
- Влияние гречишных сидеральных агросообществ на агрофизические свойства почвенных ресурсов Черноземной зоны
А. М. Гребенников 32

Удобрения

- Влияние последействия извести и систематического применения удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность зерновых культур
Н. А. Кирпичников, С. П. Бижан 39
- Длительность последействия минеральных удобрений в опыте Курганского НИИСХ
О. В. Волынкина 44

Регуляторы роста растений

- Влияние предпосевной обработки семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) органическими кислотами природного происхождения в разреженной среде на рост и развитие растений
Н. В. Верховица, Е. Н. Кубарев, Г. Р. Балашов, А. Э. Роберт 51
- Действие композиции биостимулятора с микроэлементами для ускорения роста и повышения продуктивности тыквы
Н. К. Хидирова, М. Р. Баратова, Ш. Косимова, Р. П. Закирова 62

Агроэкология

- Мониторинг агроэкологического состояния пахотных почв Центрально-Черноземного района России
С. В. Лукин 67
- Изменение химических и биологических свойств пахотных почв при разной длительности периода промерзания
В. Н. Пинской, Н. Н. Каширская, А. О. Алексеев, В. В. Малышев, А. В. Борисов 78
- Биологические приемы оптимизации возделывания многолетних злаковых трав в Нечерноземной зоне
В. Н. Баринов 89

Экотоксикология

- Воздействие тяжелых металлов на обилие бактерий рода *Azotobacter* в серо-бурых почвах Апшеронского полуострова
С. И. Наджафова 93

Contents

No. 4, 2023

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Effect of Mobile Potassium Content in Soils on Grain Crop Yields and Potash Fertilizer Costs on Its Formation
S. A. Shafran 3
- Physical and Chemical Properties of Leached Chernozem under Different Soil Treatment and Fertilizer Application in Cropped Rotation Central Black Earth Region
O. A. Minakova, D. S. Merzlikina, P. A. Kosyakin, E. N. Manaenkova, O. K. Borontov 11
- Monitoring of Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Soils of the Ivanovo Region
A. A. Utkin 19
- Influence of Buckwheat Sideral Agricultural Communities on the Agrophysical Properties of Soil Resources of the Chernozem Zone
A. M. Grebennikov 32
-

Fertilizers

- Effect of Lime Aftereffect and Systematic Application of Fertilizers on Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and Grain Yield
N. A. Kirpichnikov, S. P. Bizhan 39
- Duration of the Aftereffect of Mineral Fertilizers in the Experience of the Kurgan Research Institute
O. V. Volynkina 44
-

Plant Growth Regulators

- Effect of Pre-Sowing Treatment of Spring Wheat Seeds (*Triticum aestivum* L.) with Organic Acids of Natural Origin in a Rarefied Medium on Plant Growth and Development
N. V. Verkhovtseva, E. N. Kubarev, G. R. Balashov, A. E. Robert 51
- Effect of the Biostimulator Composition with Trace Elements to Accelerate the Growth and Increase the Productivity of Pumpkin
N. K. Khidirova, M. R. Baratova, Sh. Kosimova, R. P. Zakirova 62
-

Agroecology

- Monitoring of Agroecological Condition of Arable Soils of the Central Chernozem Region of Russia
S. V. Lukin 67
- Changes in the Chemical and Biological Properties of Arable Soils with Different Duration of the Freezing Period
V. N. Pinskoy, N. N. Kashirskay, A. O. Alekseev, V. V. Malyshev, A. V. Borisov 78
- Biological Methods of Optimization of Cultivation of Perennial Grasses in Agriculture of the Non-Chernozem zone
V. N. Barinov 89
-

Ecotoxicology

- Effect of Heavy Metals on the Abundance of Bacteria of the Genus *Azotobacter* in Gray-Brown Soils of the Absheron Peninsula
S. I. Nadjafova 93
-

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО КАЛИЯ В ПОЧВАХ НА УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ЗАТРАТЫ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ЕЕ ФОРМИРОВАНИЕ

© 2023 г. С. А. Шафран

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

*E-mail: shafran38@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 12.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Показано влияние содержания подвижного калия в различных почвах на урожайность зерновых культур и эффективность применения под них калийных удобрений. Результаты исследования показали, что повышение содержания подвижного калия в изученных почвах способствует увеличению урожайности зерновых культур и при этом снижается эффект от внесения калийных удобрений. Несмотря на это суммарная урожайность, полученная за счет повышения калийного уровня почв и прибавки урожайности от внесения калийных удобрений, намного превышала все варианты доз калия на почвах низкообеспеченных K_2O . Прирост урожайности от внесения калийных удобрений составлял в зависимости от культуры 29–46%, тогда как суммарная урожайность возрастала в 2 с лишним раза. При этом снижались затраты калийных удобрений на формирование урожайности зерновых культур. Расход калия удобрений на получение 1 т зерна озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах при внесении K_{30-60} снижался с 19–36 до 10–19 кг/т, на серых лесных почвах – с 12–23 до 10–20 кг/т, яровой пшеницы – с 25–47 до 15–31 кг/т на серых лесных почвах и с 23–43 до 15–30 кг/т – на черноземах выщелоченных.

Ключевые слова: подвижный калий, зерновые культуры, урожайность, дозы калия, прибавка урожая, затраты калийных удобрений.

DOI: 10.31857/S0002188123040117, **EDN:** DJJYLI

ВВЕДЕНИЕ

Анализ материалов Географической сети опытов с удобрениями, агрохимической службы и литературных источников показал, что, несмотря на большое количество проведенных опытов, все-таки крайне мало данных, характеризующих эффективность применения калийных удобрений на зерновых культурах в зависимости от степени обеспеченности почв подвижным калием. Исследования носили локальный характер и не охватывали всего многообразия природно-климатических условий страны, что затрудняет их использование при организации наиболее эффективного применения калийных удобрений. В обычных полевых опытах трудно выделить эффект от увеличения содержания подвижного калия в почве при прочих равных условиях. В свое время делались попытки создать различные уровни содержания K_2O в почве путем создания искусственных калийных фонов по примеру фосфатных, но эта попытка не увенчалась успехом.

В настоящее время в связи с разработкой ВНИИА региональных нормативов окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур такая возможность представилась [1]. Эти нормативы разработаны для основных зерновых культур, которые возделывают в нашей стране. Показатели эффективности азотных, фосфорных и калийных удобрений дифференцированы по типам и подтипам почв и их агрохимическим свойствам.

Цель работы – оценка влияния содержания подвижного калия в почвах на урожайность зерновых культур и эффективность применения под них калийных удобрений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В упомянутых нормативах отражено влияние содержания подвижного калия в почвах на фоне различной их обеспеченности минеральным (нитратным) азотом и подвижным фосфором. На дерново-подзолистых и серых лесных почвах была учтена также реакция почвенной среды, по-

Таблица 1. Влияние содержания подвижного калия в дерново-подзолистых почвах на урожайность зерновых культур при внесении калийных удобрений, ц/га

Содержание в почве K ₂ O, мг/кг	Урожайность, ц/га					
	Дозы калия, кг/га					
	0	30	45	60	90	120
Озимая пшеница						
≤80	13.3	15.9	16.3	16.6	17.0	17.2
81–120	23.5	24.4	24.5	24.6	24.8	24.8
121–170	31.0	31.4	31.5	31.5	31.5	31.5
Озимая рожь						
≤80	8.9	11.8	12.2	12.4	12.8	13.0
81–120	15.8	16.8	16.9	17.0	17.2	17.2
121–170	20.8	21.2	21.3	21.3	21.4	21.4
Ячмень яровой						
≤80	17.2	21.2	21.6	22.0	22.5	22.7
81–120	21.9	23.3	23.4	23.5	23.7	23.8
>120	22.9	23.1	23.2	23.3	23.3	23.6
Овес						
≤80	9.6	12.6	12.9	13.2	13.5	13.6
81–120	17.1	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5
121–170	21.8	22.2	22.3	22.3	22.3	22.4
>170	22.5	22.7	22.7	22.7	22.7	22.7

скольку величина рН оказывала существенное влияние на урожайность культур и эффективность удобрений. Для того чтобы определить прирост урожая вследствие увеличения содержания подвижного калия в почве, от урожайности культуры, полученный в вариантах со средним и повышенным содержанием K₂O, вычитали величину урожайности, относящейся к варианту с низкой обеспеченностью этим питательным веществом. Для того, чтобы выделить более отчетливо разницу во влиянии содержания подвижного калия в почве на урожайность культур, наряду с иллюстрацией абсолютных величин (ц/га) показана относительная, выраженная в %. При этом за 100% принимали урожайность, полученную при низкой обеспеченности почв подвижным калием, т.е. <80 мг/кг, а для яровой пшеницы, возделываемой на серых лесных почвах и черноземах выщелоченных, — при очень низком содержании K₂O.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что повышение содержания подвижного калия в дерново-подзолистых почвах, с одной стороны, ведет к увеличению урожайности зерновых культур, с другой, снижает эффект от внесения калийных

Таблица 2. Прирост урожайности зерновых культур от увеличения содержания подвижного калия в дерново-подзолистых почвах, %

Содержание в почве K ₂ O, мг/кг	Урожайность, ц/га					
	Дозы калия, кг/га					
	0	30	45	60	90	120
Озимая пшеница						
≤80	100	120	123	125	128	129
81–120	177	183	184	185	186	186
121–170	233	236	236	237	237	237
Озимая рожь						
≤80	100	133	137	139	144	146
81–120	177	188	190	191	193	193
121–170	233	238	239	239	235	235
Ячмень яровой						
≤80	100	123	126	128	131	132
81–120	127	135	136	137	138	138
>120	133	134	135	135	135	136
Овес						
≤80	100	131	134	138	—	—
81–120	178	189	190	191	—	—
121–170	227	231	232	232	—	—
>170	234	236	236	236	—	—

удобрений. Несмотря на это суммарная урожайность, полученная за счет повышения калийного уровня почв и прибавки урожайности от внесения калийных намного превышала не только контрольный вариант, но и варианты с применением калийных удобрений (табл. 1).

Наряду с этим, исследования показали, что озимая пшеница оказалась более отзывчива на увеличение содержания подвижного калия в почве. Переход почв из низкой группы по содержанию K₂O в повышенную позволил повысить урожайность этой культуры в 2.3 раза и довести ее до 31 ц/га без внесения удобрений. Урожайность других культур на почве, в которой содержание K₂O находилось в пределах 121–170 мг/кг, составила 21–23 ц/га, что также значительно больше по сравнению с урожайностью, полученной на почве, содержащей подвижного калия <80 мг/кг. Приведенные данные свидетельствовали о том, что зерновые культуры по которым были проведены исследования, оказались более отзывчивыми на увеличение урожайности при повышении калийного уровня дерново-подзолистых почв по сравнению с внесением калийных удобрений даже в вариантах с низкой обеспеченностью K₂O, где прирост урожайности варьировал от 123 до 236% в зависимости от доз и культур (табл. 2).

Таблица 3. Влияние содержания подвижного калия в различных почвах на эффективность применения калийных удобрений под озимую пшеницу

Содержание K ₂ O в почве, мг/кг	Урожайность без удобрений, ц/га	Прибавка урожайности, ц/га				
		Дозы калия, ц/га				
		30	45	60	90	120
Дерново-подзолистые почвы						
≤80	13.3	2.6	3.0	3.3	3.7	3.9
81–120	23.5	0.9	1.0	1.1	1.3	1.3
121–170	31.0	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Серые лесные почвы						
≤80	23.0	2.3	2.6	2.8	3.0	3.1
81–120	28.8	1.9	2.1	2.3	2.5	2.5
121–170	28.9	1.3	1.5	1.6	1.8	1.8
Черноземы выщелоченные						
81–120	23.5	1.3	1.4	1.5	1.7	1.8
121–170	29.9	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7
Черноземы обыкновенные						
81–120	20.5	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
>120	26.1	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5

Таблица 4. Влияние содержания подвижного калия в различных почвах на эффективность применения калийных удобрений под озимую рожь

Содержание K ₂ O в почве, мг/кг	Урожайность без удобрений, ц/га	Прибавка урожайности, ц/га				
		Дозы калия, ц/га				
		30	45	60	90	120
Дерново-подзолистые почвы						
≤80	8.9	2.9	3.3	3.5	3.9	4.1
81–120	15.8	1.0	1.1	1.2	1.4	1.4
>120	20.8	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6
Серые лесные почвы						
≤80	8.6	3.8	4.2	4.6	5.1	5.3
81–120	15.4	1.3	1.4	1.5	1.8	1.8
>120	20.2	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7
Черноземы выщелоченные						
81–120	15.9	1.6	1.9	2.0	2.3	2.3
>120	20.9	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8

При повышении содержания подвижного калия прибавка урожая зерна резко снижалась и составляла 0.4–1.9 ц/га (табл. 1). Все это позволило сделать вывод о том, что для получения стабильной урожайности зерновых культур в зоне распространения дерново-подзолистых почв необходимо поддерживать содержание подвижного калия в почве на уровне повышенной обеспеченности, т.е. 120–170 мг/кг.

Наряду с изучением отзывчивости различных зерновых культур на содержание подвижного калия в одном из типов почв на их урожайность, немалый интерес представляют исследования, на-

правленные на выявление влияния этих же факторов в почвах различного генезиса. Такие данные представила возможность получить для озимых пшеницы и ржи, а также яровой пшеницы и ячменя.

Данные, полученные для озимой пшеницы, свидетельствовали о том, что эта культура хорошо отзывалась на увеличение содержания K₂O в дерново-подзолистых почвах при низкой их обеспеченности подвижным калием. Прирост урожайности в данном случае составил 17.7 ц/га, тогда как на серых лесных почвах – только 5.9 ц/га. Это

Таблица 5. Влияние содержания подвижного калия в различных почвах на эффективность применения калийных удобрений под яровую пшеницу

Содержание К ₂ О в почве, мг/кг	Урожайность без удобрений, ц/га	Прибавка урожайности, ц/га				
		Дозы калия, ц/га				
		30	45	60	90	120
Приволжский округ						
Серые лесные почвы						
≤40	8.2	3.8	4.2	4.6	5.1	5.2
41–80	14.6	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8
81–120	18.6	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7
>120	19.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
Черноземы оподзоленные и выщелоченные						
≤40	8.5	4.7	5.2	5.6	6.1	6.3
41–80	15.2	1.6	1.8	1.9	2.1	2.1
81–120	19.3	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9
>120	20.0	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
Сибирский округ						
Серые лесные почвы						
≤40	8.6	2.4	2.7	2.9	3.2	3.3
41–80	15.4	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1
81–120	19.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
>120	20.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
Черноземы выщелоченные						
41–80	14.4	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5
81–120	18.4	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
>120	19.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

можно объяснить тем, что на последних почвах урожайность озимой пшеницы намного превышала сбор зерна, полученного в варианте с низкой обеспеченностью К₂О по сравнению с дерново-подзолистыми почвами. Этим же можно объяснить и получение более низкой прибавки урожайности от калийных удобрений на серых лесных почвах по сравнению с дерново-подзолистыми. На черноземных почвах прирост урожайности был невысоким, поскольку в изученной выборке отсутствовали опыты, в которых исследования проводили на почвах с низким содержанием К₂О.

Аналогичные результаты получены для озимой ржи, урожайность которой также повышалась при увеличении содержания подвижного калия в почвах. В отличие от озимой пшеницы большой разницы в эффективности применения калийных удобрений между дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами не выявлено. Можно отметить только незначительное превышение прибавки урожайности от внесения калийных удобрений на серых лесных почвах по сравнению с дерново-подзолистыми. На черноземах выщелоченных действие калия было невысоким, т.к. в выборке не было данных опытов,

проведенных на почвах с низким содержанием К₂О (табл. 4).

В опытах с яровой пшеницей выявлена та же закономерность, что и с озимыми культурами, несмотря на то что эксперименты с ними были проведены в регионах, заметно различавшихся природно-климатическими условиями. С увеличением содержания подвижного калия повышалась урожайность яровой пшеницы. Переход почв с очень низкой обеспеченностью подвижным калием в повышенную способствовал удвоению урожайности яровой пшеницы независимо от типов почв и регионов возделывания (табл. 5).

В связи с тем что в выборке для яровой пшеницы имелись опыты, в которых содержание подвижного калия относилось к очень низкой группе обеспеченности, появилась возможность установить высокий эффект от калийных удобрений для регионов средней части Приволжья и Сибири, хотя до этого считали, что внесение калийных удобрений под яровую пшеницу малоэффективно.

Окупаемость калийных удобрений прибавкой урожайности яровой пшеницы на почвах Приволжского округа с очень низким содержанием К₂О варьировала в зависимости от дозы от 4.4 до 15.6, в Сибири – от 2.7 до 8.0 кг/кг.

Таблица 6. Влияние содержания подвижного калия в различных почвах на эффективность применения калийных удобрений под ячмень яровой

Содержание K ₂ O в почве, мг/кг	Урожайность без удобрений, ц/га	Прибавка урожайности, ц/га				
		Дозы калия, ц/га				
		30	45	60	90	120
Дерново-подзолистые почвы						
≤80	17.2	4.0	4.4	4.8	5.3	5.5
81–120	21.9	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9
>120	22.6	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8
Серые лесные почвы						
≤80	18.6	3.1	3.5	3.8	4.2	4.4
81–120	23.7	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5
>120	24.5	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6
Черноземы оподзоленные и выщелоченные						
≤80	19.5	3.4	3.8	4.2	4.6	4.8
81–120	24.8	1.1	1.3	1.4	1.6	1.7
>120	25.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7

Яровой ячмень считается более требовательной культурой к условиям калийного питания, поскольку у него более короткий период потребления питательных веществ по сравнению с другими зерновыми культурами. Ячмень с каждой тонной урожая выносит в среднем на 23% калия больше, чем яровая пшеница и на 14% больше, чем озимая рожь.

Из всех изученных культур ячмень лучше всех отзывался на внесение калия. При низкой обеспеченности почв K₂O прибавка урожая от калийных удобрений составляла на дерново-подзолистых почвах в зависимости от доз 3.8–5.5 ц/га, на серых лесных почвах – 3.1–4.4 ц/га, а окупаемость соответственно 4.6–13.3 и 3.7–10.3 кг/кг. В связи с тем, что в выборке черноземов оподзоленных и выщелоченных имелись данные опытов, в которых почва характеризовалась низким содержанием подвижного калия, представилась возможность выявить эффективность применения калийных удобрений под яровой ячмень. Согласно полученным данным, действие калийных удобрений оказалось достаточно высоким и даже несколько превышало показатели, полученные на серых лесных почвах. На почвах, в которых содержание K₂O было больше 120 мг/кг, прибавка урожайности приближалась к нулевой отметке (табл. 6).

Среди многочисленных методов установления доз минеральных удобрений под сельскохозяйственные культуры особое место занимает нормативный, который базируется на обобщении большого количества экспериментальных данных. К таковым относятся региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур [1]. Используя эти дан-

ные, были установлены величины затрат калийных удобрений на формирование 1 т урожайности основных зерновых культур в зависимости от содержания в почвах подвижного калия и доз калийных удобрений. Расчеты выполняли по методике, изложенной ранее, для получения аналогичных данных для азотных удобрений [2].

Результаты исследования показали, что величина затрат калийных удобрений на формирование урожайности зерновых культур зависит от 2-х основополагающих факторов. Это содержание подвижного калия в почвах и дозы калийных удобрений. Закономерность такова: с увеличением обеспеченности почв K₂O снижаются удельные затраты на применение калийных удобрений. Это относится ко всем зерновым культурам, для которых проводили исследование. Наряду с этим отмечено, что наиболее заметно снижались затраты калийных удобрений в тех случаях, когда диапазон варьирования содержания подвижного калия был наиболее высоким. Например, в опытах с озимой пшеницей на дерново-подзолистых почвах содержание K₂O менялось в пределах 3-х классификационных групп, т.е. от низкой до повышенной. При этом разница в затратах на формирование 1 т урожая этой культуры уменьшалась почти в 2 раза (табл. 7).

В аналогичных условиях затраты калийных удобрений на формирование урожайности озимой ржи снижались в 1.5–1.7 раза, что объясняется биологическими особенностями культур. Вместе с тем общая закономерность сохранялась.

Серые лесные почвы в опытах характеризовались подобными закономерностями в отношении степени их обеспеченности подвижным калием. Тем не менее, затраты калийных удобрений на

Таблица 7. Затраты калийных удобрений на формирование урожайности озимых зерновых культур, кг/т

Содержание K ₂ O в почве, мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Озимая пшеница					
Центральный округ					
Дерново-подзолистые почвы					
≤80	19	28	36	53	70
81–120	12	18	24	36	48
121–170	10	14	19	29	38
Центральный и Поволжский округа					
Серые лесные почвы					
≤80	12	18	23	35	46
81–120	10	15	19	29	38
121–170	10	15	20	29	39
Центральный округ					
Черноземы выщелоченные и оподзоленные					
81–120	12	18	24	36	47
121–170	10	15	20	29	39
Черноземы обыкновенные					
81–120	14	21	27	41	54
>120	11	17	23	34	45
Озимая рожь					
Центральный округ					
Дерново-подзолистые почвы					
≤80	25	37	48	70	92
81–120	18	27	36	52	70
>120	14	21	29	42	56
Центральный и Приволжский округа					
Серые лесные почвы					
≤80	24	35	45	66	86
81–120	18	27	36	52	70
>120	15	22	29	43	57
Приволжский округ					
Черноземы выщелоченные					
81–120	17	25	34	49	65
>120	14	21	28	41	55

формирование урожайности изученных культур несколько отличались от данных, полученных на дерново-подзолистых почвах. Наиболее существенно такая разница касалась озимой пшеницы, урожайность которой на серой лесной почве при низком содержании K₂O заметно превышала сбор зерна при такой же обеспеченности калием на дерново-подзолистых почвах. Озимая рожь практически также отзывалась на внесение калийных удобрений на серых лесных почвах, как и на дерново-подзолистых, поскольку их затраты на формирование 1 т урожая на обоих почвах мало отличались друг от друга.

Таблица 8. Затраты калийных удобрений на формирование урожайности яровой пшеницы в зависимости от содержания подвижного калия в почве, кг/т

Содержание K ₂ O в почве, мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Приволжский округ					
Серые лесные почвы					
≤40	25	36	47	68	90
41–80	20	28	37	55	73
81–120	16	23	31	47	62
>120	15	23	31	46	62
Черноземы выщелоченные					
≤40	23	33	43	62	81
41–80	18	26	35	52	69
81–120	15	23	30	45	59
>120	15	22	30	44	59
Уральский округ					
Серые лесные почвы					
81–120	15	22	3	44	59
>120	14	22	29	43	57
Черноземы выщелоченные					
≤80	20	29	36	57	75
81–120	17	26	34	51	68
<120	17	26	34	51	68
Сибирский округ					
Серые лесные почвы					
≤40	27	40	52	76	101
41–80	19	28	37	55	73
81–120	15	23	30	45	60
>120	15	22	29	44	59
Черноземы выщелоченные					
≤80	19	27	36	54	71
81–120	16	24	31	47	63
<120	16	23	31	47	62

В опытах, проведенных на черноземах выщелоченных большой вариации содержания подвижного калия не выявлено. Вместе с тем установлено, что затраты на формирование 1 т урожайности были значительно меньше по сравнению с дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами.

Как уже отмечали, ряд опытов с яровой пшеницей был проведен на почвах с очень низким содержанием подвижного калия не только в европейской части страны, но и в азиатской. Такие исследования были проведены в основном на серых лесных почвах и черноземах выщелоченных. Несмотря на различные природно-климатические условия регионов общая закономерность

Таблица 9. Затраты калийных удобрений на формирование урожайности ярового ячменя в зависимости от содержания подвижного калия в почве, кг/т

Содержание K_2O в почве, мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Центральный и Северо-Западный округа					
Дерново-подзолистые почвы					
≤80	14	21	27	—	—
81–120	13	19	26	—	—
<120	13	19	26	—	—
Центральный округ					
Серые лесные почвы					
≤80	14	20	27	39	52
81–120	12	18	24	36	48
<120	12	18	24	36	48
Черноземы выщелоченные					
≤80	13	19	25	37	49
81–120	12	17	23	34	45
<120	11	17	23	34	46
Приволжский округ					
Дерново-подзолистые почвы					
≤120	12	18	24	36	48
>120	12	18	24	36	49
Черноземы выщелоченные					
≤120	15	22	29	44	59
>120	13	19	26	38	51
Уральский округ					
Черноземы выщелоченные					
≤120	13	19	25	38	50
>120	11	17	23	34	46

влияния содержания подвижного калия на затраты калийных удобрений в формировании урожайности яровой пшеницы сохранилась, т.е. с увеличением обеспеченности почв K_2O снижался расход калия удобрений на создание 1 т урожая. Наибольшие затраты установлены на почвах с очень низким содержанием подвижного калия. Это относится как к серым лесным почвам, так и черноземам выщелоченным. Большой разницы между типами почв, относящихся к различным регионам не отмечено. Например, расход калийных удобрений на формирование урожайности 1 т яровой пшеницы на серых лесных почвах Приволжского округа при внесении K_{30-60} составил 25–47 кг на полях с очень низким уровнем обеспеченности K_2O , а в Сибирском округе при таких же условиях – 27–53 кг (табл. 8). При повышенной обеспеченности подвижным калием эти вели-

Таблица 10. Затраты калийных удобрений на формирование урожайности овса в зависимости от содержания подвижного калия в почве, кг/т

Содержание K_2O в почве, мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Северо-Западный и Центральный округа					
Дерново-подзолистые почвы					
≤80	24	35	45	67	88
81–120	17	25	33	49	65
121–170	14	20	27	40	54
<170	13	20	26	40	53
Приволжский округ					
Серые лесные почвы					
≤40	16	23	31	46	61
81–120	15	22	30	43	59
Уральский округ					
Черноземы выщелоченные					
150–180	15	22	29	43	57
>180	14	22	29	43	58

чины составили соответственно 15–31 и 15–29 кг/т. На черноземах выщелоченных были получены близкие результаты. В опытах, относящихся к Уральскому округу, представилась возможность оценить меньший диапазон варьирования содержания подвижного калия в почвах, но тем не менее полученные данные позволили иметь представление о расходе калийных удобрений на формирование урожайности яровой пшеницы в этом регионе. Больших расхождений в этих величинах, относящихся к одним и тем же группам обеспеченности, по сравнению с соседними регионами не обнаружено.

В опытах с ячменем яровым изменения величины расхода калийных удобрений на формирование его урожайности менялись в меньшей степени по сравнению с рассмотренными выше культурами (табл. 9), что было вызвано иными биологическими особенностями данной культуры. Ячмень, как уже отмечали выше, лучше потребляет почвенный калий по сравнению с другими зерновыми культурами.

В отличие от ячменя затраты калийных удобрений на формирование 1 т овса на дерново-подзолистых почвах с низким содержанием подвижного калия в дозах K_{30-60} составляли 24–45 кг/га, что было больше на 1/3 по сравнению с ячменем (табл. 10).

ВЫВОДЫ

1. Результаты исследования показали, что повышение содержания подвижного калия в почвах способствует, с одной стороны, увеличению урожайности зерновых культур, с другой, снижает эффект от внесения калийных удобрений. Подобная закономерность отмечена для всех изученных почв и культур. При этом суммарная урожайность, полученная за счет повышения обеспеченности почв калием, и прибавки урожая от внесения калийных удобрений намного превышала сбор зерна при всех дозах внесения K_2O в вариантах почв с низким содержанием подвижного калия. Прирост урожайности зерновых культур при переходе почв из группы, низко обеспеченной K_2O , в повышенную группу значительно превышал прибавку урожайности от внесения калийных удобрений. При содержании подвижного калия в дерново-подзолистых почвах <80 мг/кг прибавка урожая озимой пшеницы от внесения калийных удобрений составляла 2.6–3.9 ц/га, на серых лесных почвах – 1.3–1.8 ц/га. Урожайность при этом возрастала от внесения калийных удобрений на 20–46%, а за счет повышения калийного уровня почв – в 2 с лишним раза.

2. Зерновые культуры по разному отзывались на повышение содержания подвижного калия в почвах. При трансформации дерново-подзолистых почв из низкой группы по содержанию K_2O в повышенную происходило увеличение урожайности озимой пшеницы в 2.3 раза, что позволило повысить ее до 31 ц/га без внесения удобрений, тогда как урожайность других зерновых культур в таких же условиях составляла 21–23 ц/га.

3. При повышении содержания подвижного калия в почвах прибавка урожая зерна резко снижалась и составляла 0.4–1.8 ц/га. Это позволило сделать вывод о том, что для получения стабильной урожайности зерновых культур необходимо поддерживать содержание подвижного калия на уровне повышенной обеспеченности, т.е. 120–170 мг/кг.

4. Установлено, что яровая пшеница хорошо отзывалась на внесение калийных удобрений на почвах очень низкой обеспеченности подвижным калием. На серых лесных почвах средней части Приволжья прибавка урожая составила 3.8–5.2 ц/га при окупаемости 4.4–15.6 кг/кг, на черноземах выщелоченных и оподзоленных – соответственно 4.7–6.3 ц/га и 5.3–15.6 кг/кг.

5. Повышение содержания подвижного калия в почвах способствовало снижению затрат калийных удобрений на формирование 1 т урожайности зерновых культур. При внесении K_{30-60} затраты удобрений на производство 1 т зерна озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах снижались с 19–36 до 10–19 кг/т, на серых лесных почвах – с 12–23 до 10–20 кг/т, яровой пшеницы – с 25–47 до 15–31 кг/т на серых лесных почвах и с 23–43 до 15–30 кг/т на черноземах выщелоченных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур. М.: ВНИИА, 2016. 96 с.
2. Шафран С.А. Затраты азотных удобрений на формирование урожайности зерновых культур в зависимости от агрохимической окультуренности почв // Агрохимия. 2022. № 5. С. 38–46.

Effect of Mobile Potassium Content in Soils on Grain Crop Yields and Potash Fertilizer Costs on Its Formation

S. A. Shafran

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

E-mail: shafran38@mail.ru

The influence of the content of mobile potassium in various soils on the yield of grain crops and the effectiveness of the use of potash fertilizers for them is shown. The results of the study showed that an increase in the content of mobile potassium in the studied soils contributes to an increase in the yield of grain crops and at the same time reduces the effect of potash fertilizers. Despite this, the total yield obtained due to an increase in the potash level of soils and an increase in yield from the application of potash fertilizers far exceeded all variants of potassium doses on soils with low K_2O . The increase in yield from the application of potash fertilizers was 29–46%, depending on the crop, while the total yield increased by more than 2 times. At the same time, the costs of potash fertilizers for the formation of grain yields decreased. The consumption of potassium fertilizers for obtaining 1 ton of winter wheat grain on sod-podzolic soils when applying K_{30-60} decreased from 19–36 to 10–19 kg/t, on gray forest soils – from 12–23 to 10–20 kg/t, spring wheat – from 25–47 to 15–31 kg/t on gray forest soils and from 23–43 to 15–30 kg/t – on leached chernozems.

Key words: mobile potassium, grain crops, yield, potassium doses, yield increase, potash fertilizer costs.

УДК 631.41:631.445.41:631.51:631.81:631.582(470.32)

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ В СЕВООБОРОТЕ ЦЧР

© 2023 г. О. А. Минакова¹, Д. С. Мерзликина¹, П. А. Косякин^{1,*},
Е. Н. Манаенкова¹, О. К. Боронтов¹

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

*E-mail: kosiakinp@mail.ru

Поступила в редакцию 02.10.2022 г.

После доработки 14.01.2023 г.

Принята к публикации 15.01.2023 г.

В зоне неустойчивого увлажнения ЦЧР в 1985–2021 гг. в паровом звене плодосменного 9-польного севооборота изучено влияние отвальной, безотвальной и комбинированной обработок почвы на не-удобренном и удобренном (N59P59K59 + навоз 11 т/га севооборотной площади) фонах. Цель работы – изучить влияние систем основной обработки почвы и удобрений на физико-химические свойства почвы за 4 ротации. Почва – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый среднemoshный с содержанием гумуса в пахотном слое 5.3–5.6%, со средней обеспеченностью питательными веществами и оптимальными физическими свойствами. За первые 2 ротации произошло снижение показателя рН_{KCl} на 0.04–0.46 ед. относительно исходного. В 4-й ротации актуальная кислотность составила 6.06–6.18 ед. Минимальные изменения кислотности были отмечены при комбинированной обработке почвы. В 4-й ротации при комбинированной обработке почвы сумма поглощенных оснований увеличивалась в наибольшей степени (на 10–12%). Физико-химические свойства в посевах озимой пшеницы были более благоприятными, чем в посевах сахарной свеклы. Буферность почвы в 4-й ротации имела тенденцию к увеличению по сравнению со 2-й ротацией. Разноглубинная отвальная обработка увеличивала буферность чернозема.

Ключевые слова: чернозем выщелоченный, обработка почвы, удобрения, физико-химические свойства почвы.

DOI: 10.31857/S0002188123040087, EDN: DIMWUQ

ВВЕДЕНИЕ

Переход на ресурсосберегающие, почвозащитные технологии возделывания сельскохозяйственных культур – одно из основных направлений совершенствования систем земледелия. Анализ факторов влияния показал, что обработка почвы и удобрения имеют ведущее значение в приемах регулирования и воспроизводства плодородия почвы [1]. Установлено, что при возделывании сахарной свеклы ее урожайность на 51% зависела от погодных условий в августе и сентябре. Содержание питательных веществ в почве при увеличении увлажнения увеличивалось в 2 и более раза, а урожайность – с 24.9 до 41.2 ц/га [2]. Эффективность их применения определяется совокупным положительным влиянием на свойства почвы в севообороте, а периодическое сочетание отвальной обработки почвы с безотвальным рыхлением обеспечивает создание оптимального па-

хотного слоя почвы, благоприятного для большинства возделываемых сельскохозяйственных культур [3–5].

Минеральные удобрения являются эффективным способом повышения урожайности сельскохозяйственных культур, однако они оказывают существенное влияние на гумусовое состояние, питательный режим, биологическую активность и, как следствие, физико-химические свойства почвы [5–7].

Изменение физико-химических и питательных свойств почвы происходит в том числе и при сельскохозяйственном использовании почвы, выпадении кислотных дождей. Известкование кислых почв способно вернуть почве ее оптимальную реакцию [8–10].

Важную роль в формировании оптимальных свойств почвы играет способ ее обработки [11–13]. Исследователями отмечено снижение буфер-

ности чернозема при экстенсивных методах производства зерна [14, 15]. Установлено, что глубокая отвальная обработка почвы значительно улучшает физико-химические свойства как черноземов, так и серой лесной почвы [16, 17]. Интенсивнее это происходит при применении ярусной вспашки [18]. Исследования, проведенные в стационарных опытах, доказали, что минимизация обработки почвы приводит к снижению буферности почв [19]. Однако некоторые исследования свидетельствуют о равнозначном влиянии различных обработок почвы на ее физико-химические свойства [20, 21]. Недостаточность и противоречивость информации о влиянии обработок почвы на ее свойства выдвигает необходимость поиска оптимизации агротехники возделывания культур в ЦЧР. Цель работы – изучение некоторых физико-химических свойств чернозема выщелоченного при различной обработке почвы и применении удобрений в севообороте ЦЧР.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в паровом звене 9-польного плодосменного севооборота со следующим чередованием культур: черный пар, озимая пшеница, сахарная свекла, ячмень с подсевом клевера, клевер на 1 укос, озимая пшеница, сахарная свекла, однолетние травы, кукуруза на зеленый корм.

Схема обработки почвы:

А – контроль, разноглубинная отвальная обработка под все культуры севооборота: под зерновые культуры и травы – на глубину 20–22 см, под черный пар и кукурузу – на 25–27 см, под сахарную свеклу – улучшенная зябь (дисковое лущение на глубину 8–10 см, лемешное или плоскорезное лущение – на 12–14 см и вспашка на 30–32 см);

Г – безотвальная (плоскорезная) обработка под все культуры: под черный пар и кукурузу – на глубину 25–27 см, под зерновые культуры и травы – на 20–22 см, под сахарную свеклу – по схеме улучшенной зяби на 30–32 см;

Д – комбинированная обработка: безотвальная (плоскорезная) под озимую пшеницу после клевера на 14–16 см, под ячмень и однолетние травы – на 20–22 см, отвальная обработка под черный пар и кукурузу – на 25–27 см, под сахарную свеклу – на 30–32 см по схеме улучшенной зяби.

Удобрения вносили под основную обработку почвы по схеме:

1 – контроль без удобрений, 2 – ежегодно навоз 50 т/га в черном пару и навоз 50 т/га под сахарную свеклу в звене с клевером. Минеральные удобрения: под озимую пшеницу в звене с кле-

ром N60P60K60, под сахарную свеклу в звене с черным паром – N160P160K160, в звене с клевером – N150P150K150, под ячмень – N40P40K40, под однолетние травы и клевер – N20P20K20, под кукурузу – N80P80K80. Всего было внесено 11 т навоза и N59P59K59 на 1 га севооборотной площади. В качестве минерального удобрения вносили нитроаммофоску (16 : 16 : 16).

Почва – чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый, с содержанием гумуса в пахотном слое 5.3–5.6%, со средним уровнем обеспеченности NPK и оптимальными агрофизическими свойствами [5]. Опыт стационарный многофакторный (год закладки – 1985). Размер делянки для обработки почвы составил 121 м², для внесения удобрений – 112 м², учетной – 20 м². Повторность трехкратная, размещение делянок – методом расщепленных блоков.

Количество осадков за вегетационные периоды 1985–1986 гг. составило 300 мм, ГТК – 1.2, за 2006–2008 гг. – 287 мм и 1.0, за 2019–2021 гг. – 186 мм и 0.7 соответственно.

Полевые и лабораторные исследования выполнены в соответствии с методическими рекомендациями в длительных полевых стационарных опытах.

В опыте использовали: плуг общего назначения ПН-4-35 и оборотный плуг ПНО-3-35 (с 2019 г.), плоскорез КППГ-250, дисковый лушильник ЛДГ-10 и дисковую борону БДТ-3 и БД-3,2-2 (с 2019 г.), разбрасыватели минеральных удобрений МВУ-5, РУМ-500 (с 2015 г.), при этом за годы проведения опыта технология обработки почвы существенно не претерпевала изменений.

В опыте возделывали районированные сорта и гибриды: в 2006–2008 гг. – озимую пшеницу сорта Безостая 360, сахарную свеклу гибрид РМС 73, в 2019–2021 гг. – сорт Крастал и гибрид РМС 121 соответственно.

В почвенных образцах определяли: рН – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85), гидролитическую кислотность – по Каппену (ГОСТ 26212-91), сумму поглощенных оснований – по Каппену–Гильковицу (ГОСТ 27821-88), степень насыщенности почвы основаниями и емкость поглощения – расчетным методом [22]. Статистическая обработка данных проведена по [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перед закладкой опыта на старопахотном поле были проведены уравнительные посеы. Почва характеризовалась среднекислой реакцией среды. Величина рН_{H₂O} составила в пахотном слое почвы 5.65 ед., гидролитической кислотности –

5.56 ммоль-экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований – 24.2 ммоль-экв/100 г почвы, степень насыщения – 81% (табл. 1). После 3-х ротаций севооборота в 2006–2008 гг. во всех вариантах произошло подкисление почвы. Величина pH_{H_2O} составила в пахотном слое 5.52–5.60, pH_{KCl} – 4.55–4.81. Особенно сильно подкисление проявилось при безотвальной обработке почвы, где показатель без удобрений составил 4.69 ед., с их применением – 4.55. Кислотность подпахотного слоя была близка к нейтральной и составила 5.65–5.71 ед. Внесение удобрений привело к еще большему подкислению. При разноглубинной отвальной обработке без удобрений pH_{KCl} составил в слое 0–30 см – 4.74, в слое 30–50 см – 4.91. При применении удобрений показатель был равен 4.64 и 4.73 соответственно. Обменная кислотность в пахотном слое составляла 4.55–4.81, в подпахотном – 4.69–5.02. Различия между показателями были незначительными.

Комбинированная обработка почвы в большей степени, чем безотвальная и разноглубинная отвальная, стабилизировала кислотность почвы. Например, гидролитическая кислотность составляла при закладке опыта в пахотном слое 5.56 и 4.89 ммоль-экв/100 г почвы – в подпахотном. За первые ротации она увеличивалась на 0.2–2.7 ммоль-экв/100 г почвы, особенно в отсутствии удобрений. В пахотном слое увеличение показателя было особенно выражено при безотвальной обработке почвы с внесением удобрений – до 7.87 ммоль-экв/100 г почвы.

Примененные агротехнические приемы в севообороте также влияли на величины суммы поглощенных оснований и степени насыщенности почвы основаниями. В подпахотном слое почвы происходила потеря поглощенных оснований с 27.9 до 24.7 ммоль-экв/100 г почвы и стабилизация суммы поглощенных оснований в пахотном слое почвы. Наиболее высокая величина данного показателя была отмечена в варианте с разноглубинной отвальной обработкой без применения удобрений, низкая – с безотвальной обработкой и внесением удобрений.

Снижение суммы поглощенных оснований и возрастание гидролитической кислотности сдвинули показатели в сторону подкисления. Степень насыщенности почвы основаниями в пахотном слое увеличивалась на 1–3% по сравнению с исходными показателями и составила в 2006–2008 гг. 76–83%. В подпахотном слое, напротив, произошло снижение показателя с 85 до 81–83%.

Подкисление пахотного слоя при безотвальной обработке почвы происходит как в связи с возрастанием содержания углекислого газа в составе почвенного воздуха, так и с увеличением

количества кислых продуктов трансформации растительных остатков, метаболизма микроорганизмов в верхнем, аэрируемом слое почвы [24, 25]. Удобрения при такой обработке перемешиваются в меньшем объеме почвы. Напротив, перемешивание большего объема почвы (вспашка при отвальной разноглубинной и комбинированной обработках) снижает кислотность и улучшает ее физико-химические свойства. При отвальной разноглубинной и комбинированной обработках почвы происходило увеличение содержания валового гумуса на 0.02–0.09% и его активных форм в 1.1–1.4 раза, что также является фактором улучшения физико-химических свойств почвы [26]. Изменения кислотно-основных свойств чернозема связаны с заменой иона кальция ионом водорода в почвенном поглощающем комплексе вследствие поглощения сахарной свеклой ионов Ca^{2+} , применением физиологически кислых удобрений, выпадения кислотных дождей [11, 27]. Комбинированная обработка в большей степени, чем безотвальная сдерживала снижение суммы обменных катионов.

Исследования, проведенные в 4-й ротации севооборота, показали изменение направленности кислотно-восстановительных процессов в почве. Величина pH_{KCl} под посевами сахарной свеклы составила в пахотном слое 4.88–4.93, в подпахотном – 4.93–4.98 ед., озимой пшеницы – 4.83–5.15 и 4.89–5.38 соответственно, что свидетельствовало о положительном влиянии севооборота и отвальной разноглубинной обработки почвы. Гидролитическая кислотность в почве под посевами сахарной свеклы в пахотном слое понижалась на 9–30% без удобрений, и на 23–36% при их применении по сравнению с ее величиной во 2-й ротации севооборота и составила 4.94–5.50 ммоль-экв/100 г почвы. Более низкие показатели отмечены при разноглубинной отвальной обработке с применением удобрений, более высокие – при безотвальной обработке.

Под посевами озимой пшеницы при применении удобрений гидролитическая кислотность увеличивалась в большей степени, чем при возделывании сахарной свеклы, особенно при безотвальной обработке, где в слое 0–30 см она составила 7.05 ммоль-экв/100 г почвы.

Сумма поглощенных оснований увеличивалась от 3-й ротации к 4-й. Под посевами сахарной свеклы в 2006–2008 гг. при безотвальной обработке с внесением удобрений она составляла 24.6 ммоль-экв/100 г почвы, в последующем в 2019–2021 гг. – 26.8 ммоль-экв/100 г почвы. Сумма поглощенных оснований в почве под посевами озимой пшеницы была ненамного больше, чем под посевами сахарной свеклы (24.5–27.2 ммоль-экв/100 г почвы). Подтверждено, что

Таблица 1. Влияние систем обработки почвы и удобрений на физико-химические свойства чернозема выщелоченного

Система		Слой почвы, см	рН _{H₂O}	рН _{KCl}	H _г	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Емкость поглощения	Степень насыщенности основаниями, %
обработки	удобрения							
1985–1986 гг.								
Закладка опыта		0–30	5.65	5.01	5.56	24.2	29.8	81
		30–50	5.75	5.06	4.89	27.9	32.8	85
2006–2008 гг., сахарная свекла								
А	0	0–30	5.59	4.74	5.91	26.9	32.8	82
		30–50	5.70	4.91	5.06	24.7	29.8	83
	NPK	0–30	5.52	4.64	6.62	24.7	31.3	79
		30–50	5.68	4.73	4.99	25.1	30.1	83
Г	0	0–30	5.61	4.69	6.68	25.8	32.5	79
		30–50	5.65	4.87	5.05	24.8	29.8	83
	NPK	0–30	5.52	4.55	7.87	24.7	32.6	76
		30–50	5.65	4.84	5.49	24.6	30.1	81
Д	0	0–30	5.52	4.81	7.21	25.0	32.2	78
		30–50	5.71	4.69	5.07	24.5	29.6	83
	NPK	0–30	5.00	4.74	7.46	24.7	32.2	77
		30–50	5.65	5.02	5.08	24.5	29.6	83
2019–2021 гг., сахарная свекла								
А	0	0–30	6.13	4.93	5.38	24.4	29.3	83
		30–50	6.10	4.93	5.12	26.8	31.7	85
	NPK	0–30	6.00	4.93	5.08	24.8	29.7	84
		30–50	6.12	4.98	4.94	25.6	30.6	84
Г	0	0–30	6.06	4.88	5.58	26.4	31.3	84
		30–50	6.09	4.95	5.50	25.6	30.6	84
	NPK	0–30	6.08	4.91	5.05	24.2	29.1	83
		30–50	6.11	4.95	5.34	26.3	31.3	84
Д	0	0–30	6.18	4.93	5.04	26.8	31.7	84
		30–50	6.15	4.97	5.25	25.2	30.5	83
	NPK	0–30	6.10	4.93	5.49	25.9	30.8	84
		30–50	6.10	4.94	5.50	25.4	30.3	84
2019–2021 гг., озимая пшеница								
А	0	0–30	6.05	5.15	5.38	26.6	32.0	83
		30–50	6.17	5.12	5.02	27.2	32.0	85
	NPK	0–30	6.05	4.83	6.53	24.6	31.1	79
		30–50	6.00	4.85	6.18	25.6	31.8	80

Таблица 1. Окончание

Система		Слой почвы, см	рН _{H₂O}	рН _{KCl}	H _r	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Емкость поглощения	Степень насыщенности основаниями, %
обработки	удобрения							
Г	0	0–30	6.03	4.89	6.46	25.4	31.9	79
		30–50	6.04	5.12	6.71	26.2	30.9	85
	NPK	0–30	6.54	4.83	7.05	24.5	30.5	77
		30–50	6.00	4.91	5.49	25.2	30.7	82
Д	0	0–30	6.01	4.92	6.25	25.2	31.5	80
		30–50	6.10	5.10	4.68	26.5	31.7	83
	NPK	0–30	6.06	4.88	6.85	24.6	31.5	78
		30–50	6.19	5.38	4.88	26.2	31.1	84
<i>HCP</i> ₀₅ обработки			0.20	0.24	0.54	1.4	1.5	2
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения			0.28	0.35	0.60	1.5	1.9	3
<i>HCP</i> ₀₅ слой почвы			0.04	0.05	0.07	0.4	0.6	3

Примечание. Схема обработки почвы: А – контроль, разноглубинная отвальная обработка под все культуры севооборота: под зерновые культуры и травы – на глубину 20–22 см, под черный пар и кукурузу – на 25–27 см, под сахарную свеклу – улучшенная зябь (дисковое лушение на глубину 8–10 см, лемешное или плоскорезное лушение – на 12–14 см и вспашка на 30–32 см); Г – безотвальная (плоскорезная) обработка под все культуры: под черный пар и кукурузу – на глубину 25–27 см, под зерновые культуры и травы – на 20–22 см, под сахарную свеклу – по схеме улучшенной зяби на 30–32 см; Д – комбинированная обработка: безотвальная (плоскорезная) под озимую пшеницу после клевера на 14–16 см, под ячмень и однолетние травы – на 20–22 см, отвальная обработка под черный пар и кукурузу – на 25–27 см, под сахарную свеклу – на 30–32 см по схеме улучшенной зяби. То же в табл. 2, 3.

разноглубинная отвальная обработка почвы больше, чем другие обработки, способствовала сохранению содержания оснований в почвенном поглощающем комплексе.

Емкость поглощения оснований составила в пахотном слое под посевами сахарной свеклы 29.1–31.7, под посевами озимой пшеницы – 30.5–32.0 ммоль-экв/100 г почвы, что свидетельствовало о незначительном влиянии агротехники возделывания культур на этот показатель.

Степень насыщенности основаниями в пахотном слое под посевами озимой пшеницы варьировала от 77 до 83, в подпахотном слое – от 80 до 85%. Под посевами сахарной свеклы данный показатель более стабилен: в пахотном слое он увеличивался и составил 83–84, в подпахотном – 83–85%. Значительные показатели насыщенности почвы основаниями были характерны для отвальной обработки почвы в контроле.

За годы исследования произошло изменение буферности чернозема. При закладке опыта кривая буферности имела пологий вид в кислотном интервале и более резкая – в щелочном. Например, при добавлении 12 мл 0.1 н. HCl рН почвы составил 3.28 ед., при добавлении 12 мл 0.1 н. NaOH – 9.62 ед. (табл. 2).

В 2006–2008 гг. отмечено снижение величины рН как в кислотном интервале (при добавлении 12 мл 0.1 н. HCl до 3.06 ед.), так и в щелочном (до 9.28 ед.). Самой низкой буферностью характеризовалась почва при безотвальной обработке без удобрений, где при добавлении щелочи величины рН были максимальными.

При применении удобрений буферность почвы снижалась при всех обработках почвы. Более резкое снижение отмечено при безотвальной обработке, а большая буферность почвы была при разноглубинной отвальной обработке. В 2019–2020 гг. установлено увеличение величины рН в кислотном интервале и его снижение в щелочном интервале по сравнению с предыдущим сроком определения. Например, при разноглубинной отвальной обработке и применении удобрений величина рН в кислотном интервале составила в 2006–2008 гг. 3.06, 3.75 и 4.34 ед., в 2019–2020 гг. – 3.10, 3.78 и 4.38 ед. соответственно.

Урожайность озимой пшеницы во 2-й ротации составила 2.8–3.7 т/га, в 4-й – 3.5–4.4 т/га (табл. 3). Более высокая урожайность была при разноглубинной отвальной и комбинированной обработках почвы с внесением удобрений, постоянная безотвальная обработка снижала урожайность в

Таблица 2. Буферность пахотного (0–30 см) слоя чернозема выщелоченного при различной обработке под посевами сахарной свеклы, ед. рН

Система		Добавлено 0.1 н. кислоты/щелочи, мл						
обработки	удобрения	12	6	3	0	3	6	12
1985–1986 гг.								
Закладка опыта		3.28	4.07	4.69	5.89	7.26	8.65	9.62
Песок		1.90	2.70	3.90	8.40	11.0	12.2	12.9
2006–2008 гг.								
А	0	3.00	3.82	4.40	5.52	6.92	7.80	9.00
	NPК	3.06	3.75	4.34	5.46	6.78	7.62	8.83
Г	0	3.16	3.89	4.47	5.87	7.04	8.01	9.28
	NPК	3.10	3.83	4.38	5.70	7.02	7.68	8.94
Д	0	3.13	3.87	4.44	5.68	7.03	7.93	9.25
	NPК	3.10	3.86	4.46	5.66	7.02	7.86	9.00
2019–2020 гг.								
А	0	3.12	3.90	4.42	5.60	7.00	7.71	8.91
	NPК	3.10	3.78	4.38	5.50	6.61	7.59	8.65
Г	0	3.14	3.90	4.46	5.79	6.98	7.91	9.38
	NPК	3.12	3.81	4.44	5.71	6.91	7.69	8.94
Д	0	3.14	3.88	4.51	5.71	7.08	7.84	9.00
	NPК	3.10	3.84	4.45	5.57	6.70	7.71	8.80

Таблица 3. Урожайность озимой пшеницы и сахарной свеклы в зависимости от обработки почвы и удобрений, т/га

Система		Озимая пшеница		Сахарная свекла	
обработки	удобрения	2006–2008 гг.	2019–2021 гг.	2006–2008 гг.	2019–2021 гг.
А	0	3.0	3.5	31.3	32.2
	NPК	3.7	4.4	42.1	37.0
Г	0	2.6	3.5	25.3	24.9
	NPК	3.5	4.2	38.7	33.2
Д	0	2.8	3.8	30.2	27.8
	NPК	3.6	4.3	42.3	40.0
<i>HCP</i> ₀₅ обработки		0.2	0.3	2.5	2.8
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения		0.5	0.5	3.6	3.7

контроле на 7–14, в удобренных вариантах – на 3–5%. Урожайность озимой пшеницы в 2019–2021 гг. была больше на 24%, чем в 2006–2008 гг., ввиду большего количества осадков за первую половину вегетации, что доказывало их значительное влияние и было отмечено другими исследователями [28].

Урожайность сахарной свеклы в опыте варьировала от 24.9 до 42.3 т/га. Более высокая урожайность отмечена при комбинированной обработке почвы с внесением удобрений – 40.0–42.3 т/га, безотвальная обработка без применения удобрений снижала урожайность культуры на 16–23, с их применением – на 8–13%. Уменьшение количества выпавших осадков в 2019–2021 гг. снижало

продуктивность сахарной свеклы в среднем на 8%. На урожайность сахарной свеклы и озимой пшеницы в большей степени оказывали влияние применение удобрений, обработки почвы, погодные условия, но незначительно – сортовые особенности [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы обработки почвы изменили физико-химические свойства чернозема выщелоченного к 4-й ротации 9-польного севооборота относительно исходных показателей. В пахотном слое актуальная кислотность составила 6.00–6.18, против 5.65 ед. при закладке опыта, гидролитическая

кислотность — 5.04–7.05 и 5.56 ммоль-экв/100 г, сумма поглощенных оснований — 29.0–32.0 и 24.2 ммоль-экв/100 г соответственно. В 4-й ротации актуальная и обменная кислотность снижались на 0.28–0.48 ед. по сравнению со 2-й ротацией, а гидролитическая кислотность — на 1.00–1.82 ммоль-экв/100 г почвы.

Разноглубинная отвальная основная обработка почвы в большей степени оптимизировала физико-химические свойства чернозема выщелоченного, тогда как безотвальная обработка ухудшала их. Применение удобрений привело к увеличению кислотности и снижению содержания суммы оснований.

Буферность почвы в 4-й ротации увеличилась по сравнению с 3-й ротацией. Разноглубинная отвальная основная обработка почвы и применение удобрений увеличивали буферность сильнее, чем безотвальная и комбинированная обработки почвы.

При возделывании озимой пшеницы гидролитическая кислотность почвы увеличивалась по сравнению с возделыванием сахарной свеклы на 6–12%, тогда как величина суммы поглощенных оснований не изменялась. Емкость поглощения составила 30.5–32.0, а при возделывании сахарной свеклы — 29.1–31.7 ммоль-экв/100 г почвы.

Наибольшая урожайность озимой пшеницы составила 4.4 т/га при разноглубинной отвальной обработке почвы, сахарной свеклы — 42.1–42.3 т/га при разноглубинной отвальной и комбинированной обработках почвы.

Для сохранения и улучшения физико-химических свойств чернозема выщелоченного, увеличения продуктивности сельскохозяйственных культур в севообороте ЦЧР следует применять комбинированную систему основной обработки почвы, состоящую из отвальной обработки черного пара и под кукурузу на глубину 25–27 см, под сахарную свеклу — на глубину 30–32 см по схеме улучшенной зяби, под зерновые культуры и травы (озимую пшеницу после непаровых предшественников и однолетних трав) — плоскорезное рыхление на глубину 14–16 см, под ячмень после сахарной свеклы — на глубину 20–22 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витер А.Ф., Турусов В.И., Гармашов В.М., Гаврилова С.А. Обработка почвы как фактор регулирования почвенного плодородия. Воронеж: Истоки, 2011. 208 с.
2. Минакова О.А., Боронтов О.К., Косякин П.А., Александрова Л.В., Манаенкова Е.Н., Подвигина Т.Н. Влияние погодных условий на эффективность
- удобрений и обработки почвы в зерносвекловичном севообороте в условиях ЦЧР. Воронеж: Воронеж. ЦНТИ — филиал РЭА Минэнерго России, 2018. 138 с.
3. Зезюков Н.И., Дедов А.В., Девятова Т.А. Снижение почвенной кислотности черноземных почв // Проблемы экологии в сельском хозяйстве. Тез. докл. научн. конф. Пенза: Приволж. дом научн.-техн. пропаганды. 1993. С. 74–75.
4. Азизов З.М. Изменение физико-химических свойств чернозема южного от приемов основной обработки и удобрений // Плодородие. 2011. № 6 (63). С. 23–25.
5. Боронтов О.К., Косякин П.А., Манаенкова Е.Н. Влияние основной обработки и удобрений на питательный режим и физические свойства почвы при возделывании сахарной свеклы // Земледелие. 2019. № 2. С. 33–35.
6. Минакова О.А., Александрова Л.В., Подвигина Т.Н. Изменение физико-химических свойств чернозема выщелоченного и урожайность сахарной свеклы при длительном применении удобрений в ЦЧР // Агрохимия. 2021. № 2. С. 37–46.
7. Косякин П.А. Роль микроудобрений в хелатной форме в повышении урожайности сахарной свеклы в плодосменном севообороте ЦЧР // АгроФорум. 2019. № 5. С. 55–57.
8. Ибадуллаев К.Б., Горохова Ж.Ю., Куликова М.А., Ступаков А.Г. Динамика агрохимических и физических свойств почвы при длительном применении удобрений и урожайность культур // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия. Сб. докл. научн.-практ. конф. Курск. отд-я МОО «Общ-во почвоведов им. В.В. Докучаева». Курск, 2013. С. 72–77.
9. Журавлев Д.Ю., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Изменение физико-химических свойств черноземных почв Саратовского правобережья в процессе их использования // Сб. научн. докл. Международ. научн.-практ. конф. Каменная Степь, 2012. С. 311–314.
10. Жеряков Е.В. Регулирование физико-химических свойств черноземных почв // Агрохимические приемы повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтном земледелии. Мат-лы научн.й конф. М.: ВНИИА, 2006. № 2. С. 33–35.
11. Минеев В.Г. Агрохимия. Учебник, 2-е изд. Перераб. и допол. М.: Колос, 2004. 720 с.
12. Соловйченко В.Д., Самыкин В.Н., Логвинов И.В. Влияние агроприемов на изменение кислотности и биологической активности чернозема // Биологизация адаптивно-ландшафтной системы земледелия — основа повышения плодородия почвы, роста продуктивности сельскохозяйственных культур и сохранения окружающей среды. Мат-лы Всерос. научн.-практ. конф. БелНИИСХ, 12–13 июня 2012 г. С. 272–275.
13. Hendrix P.F., Han C.R., Groffman P.M. Soil respiration in conventional and no-tillage agroecosystems under different winter cover crop rotations // Soil Till. Res. 1988. V. 12. P. 135–148.

14. Уваров Г.И., Карабутов А.П., Боровская Я.Ю. Приемы регулирования кислотности чернозема в севообороте // Сахарная свекла. 2011. № 4. С. 26–28.
15. Dewan H.C., Rich C.I. Titration of acid soils// Soil Sci. Soc. Am. J. 1970. V. 34. № 1. P. 38–44.
16. Шеуджен А.Х., Нецадим Н.Н., Гайдукова Н.Г., Шабанова И.В. Влияние природных и антропогенных факторов на физико-химические свойства чернозема выщелоченного и его загрязнение тяжелыми металлами // Агрохимия. 2019. № 1. С. 19–28.
17. Никульников И.М., Боронтов О.К. Физико-химические свойства чернозема и продуктивность культур в системах основной обработки почвы в севообороте // Докл. РАСХН. 2009. № 2. С. 32–34.
18. Габбасова И.М., Назырова Ф.И., Хакимова Г.И. Влияние основной обработки почвы и удобрений в семипольном севообороте на физико-химические свойства серой лесной почвы // Агрохимия. 2007. № 10. С. 24–31.
19. Ильясов М.М., Яппаров А.Х., Алиев Ш.А., Шаронова Н.Л. Влияние минимализации основной обработки почвы на физико-химические свойства выщелоченного чернозема // Агротех. вестн. 2015. № 6. С. 2–5.
20. Гармашов В.М., Турусов В.И., Гаврилова С.А. Изменение свойств чернозема обыкновенного при различных способах основной обработки // Земледелие. 2014. № 6. С. 17–19.
21. Пуртова Л.Н., Емельянов А.Н. Показатели физико-химических свойств и биологической активности агрогенных почв при различных приемах агротехнической обработки // Международ. научн.-исслед. журн. 2019. № 8 (86). С. 51–56.
22. Физико-химические методы исследования почв / Под ред. Н.Г. Зырина, Д.С. Орлова. М.: Изд-во МГУ, 1980. 381 с.
23. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.
24. Стахурлова Л.Д., Свистова И.Д., Щеглов Д.И. Биологическая активность как индикатор плодородия черноземов в различных биоценозах // Почвоведение. 2007. № 6. С. 769–774.
25. Окороков В.В., Окорокова Л.А., Фенова О.А. Изменения физико-химических свойств серых лесных почв Ополья при длительном применении удобрений // Докл. РАСХН. 2015. № 3. С. 34–38.
26. Боронтов О.К., Косякин П.А., Безлер Н.В., Манаenkova Е.Н. Влияние основной обработки почвы на микробиологическую активность, питательный режим чернозема выщелоченного и продуктивность сахарной свеклы в Центрально-Черноземном регионе // Земледелие. 2022. № 2. С. 44–49.
27. Мацнев И.Н. Изменение уровня гумусированности и кислотности почвы Тамбовской области // Вестн. Мичурин. ГАУ. 2006. № 1. С. 79–81.
28. Черкасов Г.Н., Соколов Н.С., Воронин А.Н., Понедельченко М.Н., Трапезников С.В. Влияние агрометеорологических характеристик и удобрений на содержание подвижных элементов питания в почве и урожайность озимой пшеницы в ЦЧР России // Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно-ландшафтных системах земледелия: сб. докл. Международ. научн.-практ. конф. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2008. С. 395–401.

Physical and Chemical Properties of Leached Chernozem under Different Soil Treatment and Fertilizer Application in Cropped Rotation Central Black Earth Region

O. A. Minakova^a, D. S. Merzlikina^a, P. A. Kosyakin^{a, #},
E. N. Manaenkova^a, and O. K. Borontov^a

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

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

In the zone of unstable humidification of the Central Black Earth Region in 1985–2021, in the steam link of the fruit-replaceable 9-pole crop rotation, the influence of dump, dumpless and combined soil treatments on non-ventilated and fertilized (N59P59K59 + manure 11 t/ha of crop rotation area) backgrounds was studied. The purpose of the work is to study the influence of basic tillage and fertilizer systems on the physico-chemical properties of the soil in 4 rotations. The soil is leached heavy loamy medium-sized chernozem with a humus content of 5.3–5.6% in the arable layer, with an average supply of nutrients and optimal physical properties. During the first 2 rotations, the pH_{KCl} indicator decreased by 0.04–0.46 units relative to the initial one. In the 4th rotation, the actual acidity was 6.06–6.18 units. Minimal changes in acidity were noted during combined tillage. In the 4th rotation, with combined tillage, the amount of absorbed bases increased to the greatest extent (by 10–12%). Physico-chemical properties in winter wheat crops were more favorable than in sugar beet crops. Soil buffering in the 4th rotation tended to increase compared to the 2nd rotation. The multi-depth dump treatment increased the buffering of the chernozem.

Key words: leached chernozem, tillage, fertilizers, physico-chemical properties of the soil.

УДК 631.452:632.12:631.445.24(470.315)

МОНИТОРИНГ ПЛОДОРОДИЯ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕПЕРНЫХ УЧАСТКОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 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 25.11.2022 г.

После доработки 27.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Представлены результаты агрохимических и экотоксикологических исследований пахотного слоя реперных участков дерново-подзолистых почв сельскохозяйственного назначения Ивановской обл., которые проводили с целью установления уровня плодородия по основным агрохимическим показателям, содержанию серы и микроэлементов, экотоксикологического состояния – по валовым и подвижным формам тяжелых металлов и мышьяка. Установлено ухудшение таких показателей плодородия почв как обеспеченность аммонийным и нитратным азотом, подвижным калием, суммой поглощенных оснований и емкость катионного обмена. Отмечено увеличение содержания подвижного фосфора, обменных кальция, магния и других поглощенных оснований при неизменном содержании органического вещества. Произведена оценка плодородия изученных почв по расчету почвенно-экологического индекса. Установлена обеспеченность почв микроэлементами и подвижной серой. Содержание валовых и подвижных форм металлов в почвах, за исключением мышьяка в почвах отдельных участков, не превышали предельно допустимых концентраций и кларков. Исследованные почвы относятся к слабозагрязненным и не являются опасными для культурных растений и здоровья человека. По коэффициентам корреляции Пирсона и Спирмена установлены характеры взаимовлияния обменной кислотности, содержания органического вещества и гранулометрического состава почв с содержанием доступных форм микроэлементов, валовых и подвижных форм металлов и мышьяка.

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

DOI: 10.31857/S0002188123040130, **EDN:** DJMRDT

ВВЕДЕНИЕ

В результате воздействия техногенных факторов, приводящих к проявлению негативных последствий в природной среде (технологические выбросы промышленных производств, выбросы при авариях, деятельность транспорта и т.п.) и глобальных геохимических процессов происходит загрязнение природной среды различными экотоксикантами, по этой причине охрана окружающей среды является одной из серьезных проблем современного человечества. Рациональное использование земельного фонда России не обходится без охраны почв и эффективного использования их плодородия. Загрязнение сельскохозяйственных угодий может оказывать негативное влияние на жизнедеятельность населения страны.

Для оценки степени и характера загрязнения угодий в целях сохранения и восстановления пло-

дородия почв, улучшения природной среды и охраны здоровья человека возникает необходимость систематического наблюдения и контроля за их состоянием [1]. Локальный мониторинг земель сельскохозяйственного назначения на реперных участках представляет собой систему наблюдений за состоянием сельскохозяйственных угодий для своевременного выявления изменений совокупности показателей почвы, влияющих на ее плодородие, а также предупреждения и устранения негативных процессов, происходящих в природной среде.

Агрохимическое и экотоксикологическое обследование почв обеспечивают землепользователя всей необходимой информацией по содержанию подвижных форм питательных элементов, гумуса, реакции почвенной среды, обеспеченности почвы обменными формами оснований, до-

ступными микроэлементами (МЭ) и присутствием в почве токсикантов и т.п. [2, 3].

Высокоэффективное ведение сельского хозяйства возможно только при соблюдении правильного подхода к проблемам, связанным с использованием, восстановлением и сохранением почвенного плодородия [4, 5]. В последние десятилетия в европейской части Нечерноземной зоны отмечается потеря плодородия многими почвами и их постепенный переход в разряд малоплодородных и загрязненных земель, что создает угрозу вывода их из сельскохозяйственного оборота [6–9].

Современная изменчивость параметров плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. и оценка их экотоксикологического состояния, в научной литературе освещены недостаточно и требуют дополнительного изучения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

Цель работы – оценить существующий уровень эффективного плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. по основным агрохимическим показателям и содержанию МЭ, экотоксикологическое состояние по содержанию подвижных и валовых форм соединений тяжелых металлов (ТМ): свинца, кадмия, меди, никеля, цинка, хрома, ртути и металлоида мышьяка.

Особое внимание к изученным экотоксикантам вызвано тем, что большинство из них относится к I и II классам химической опасности, их соединения обладают высокой токсичностью для многих живых организмов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – дерново-подзолистые почвы, доля которых в почвенном покрове пахотных земель Ивановской обл. составляет 92% [10]. Почвенно-агрохимическое и экотоксикологическое обследование почв проводили в 2014 и 2021 гг. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на 11 реперных участках, расположенных в отдельных районах Ивановской обл. (рис. 1), путем закладки почвенных разрезов и отбора образцов почв из пахотного слоя (0–20 см) для анализов.

Реперные участки располагались в основном на пахотных землях и кормовых естественных угодьях, преобладающая растительность участков – культурные растения, в редких случаях – разнотравье. Общая площадь обследованных дерново-подзолистых почв реперных участков – 207,7 га. Почвенно-экологический индекс (ПЭИ) определяли по методике, разработанной Почвенным институтом им. В.В. Докучаева [11].

Весной с каждого реперного участка в зависимости от его площади с помощью тростевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец, массой ≈ 0.5 кг составляли из 30 точечных проб и в среднем отбирали с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Анализы почв были выполнены по принятым в агрохимической практике методикам: обменная кислотность (pH_{KCl}) – ГОСТ Р 58594-2019, гидролитическая кислотность (H_f) – ГОСТ 26212-91, подвижные фосфор (P_2O_5) и калий (K_2O) – ГОСТ Р 54650-2011 (по Кирсанову в модификации ЦИНАО), аммиачный азот ($N-NH_4$) – ГОСТ 26489-85 (по ЦИНАО), нитратный азот ($N-NO_3$) – ГОСТ 26951-86, обменные основания кальция и магния (Ca^{2+} и Mg^{2+}) – ГОСТ 26487-85, органическое вещество ($C_{орг}$) – ГОСТ 26213-91 (по Тюрину в модификации ЦИНАО), сумма поглощенных оснований (S) – ГОСТ 27821-88 (по Каппену), подвижная сера ($S_{подв}$) – ГОСТ 26490-85 (по ЦИНАО), подвижный бор (B) – ГОСТ Р 50688-94 (по Бергеру и Труогу в модификации ЦИНАО), подвижный молибден (Mo) – ГОСТ Р 50689-94 (по Григгу в модификации ЦИНАО), обменный марганец (Mn) – ГОСТ 26486-85 (по ЦИНАО), подвижный кобальт (Co) – ГОСТ 50687-94 (по Пейве–Ринькису), фракции физической глины и ила (по Качинскому) – методика [12]. Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почвы основаниями (I) определяли расчетным способом.

Определение в почвах подвижных форм ТМ проводили в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера при pH 4.8, валовых форм Hg – в вытяжке 1.0 н. HNO_3 , методом атомно-абсорбционной спектроскопии [13–15], валовые формы As – фотометрическим методом в вытяжке $HNO_3 + H_2SO_4$ (1 : 1) [16].

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения признака с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Средние уровни изученных показателей в исследованных образцах при нормальном распределении сравнивали между собой с помощью выборочного t -критерия Стьюдента для зависимых переменных ($p < 0.05$), при ненормальном – с помощью критерия Вилкоксона ($p < 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном распределении – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

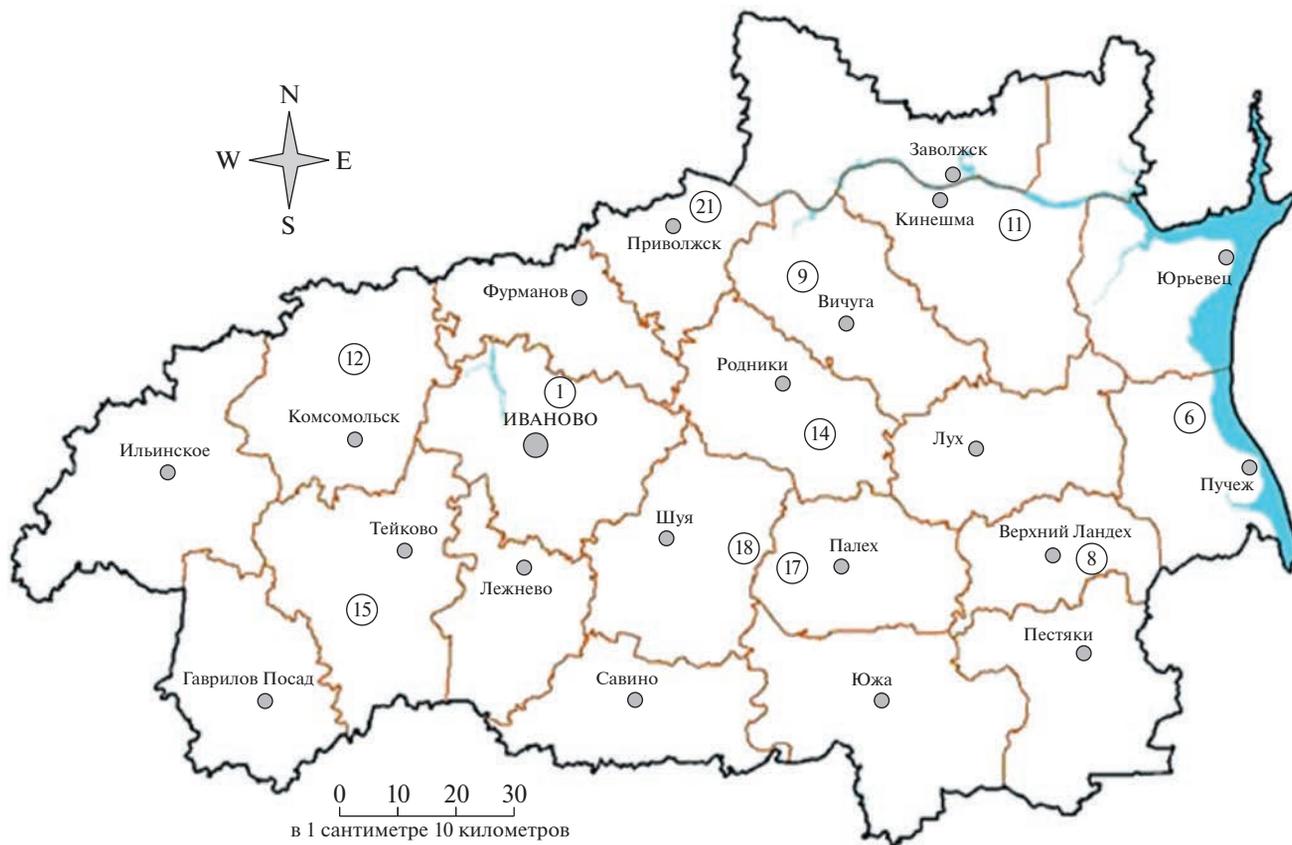


Рис. 1. Карта-схема Ивановской обл. с обозначением реперных участков мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За 7 лет наблюдения (с 2014 по 2021 г.), средняя величина обменной и гидролитической кислотности почв участков снизилась на 0.2 ед. и 0.20 смоль(экв)/кг почвы соответственно (табл. 1). Расчет *t*-критерия Стьюдента для зависимых переменных показал, что отмеченные изменения величин pH_{KCl} и H_T за период мониторинга почв были достоверными ($p < 0.05$). Почвы большей части участков по величине pH_{KCl} оставались преимущественно нейтральными, по величине H_T имели очень низкую степень кислотности, что явилось результатом увеличения объемов известкования исследованных почв за рассматриваемый период.

Известно, что природа проявления pH_{KCl} тесно связана с H_T . Подтверждение этому было отмечено в нашем исследовании. Прослежены достоверные ($p < 0.05$) корреляционные взаимосвязи заметной силы в 2021 г.: $r(H_T/pH_{KCl}) = -0.65$ и весьма высокой силы в 2014 г.: $r = -0.97$ (при $P = 0.95$).

Средние величины обеспеченности почв участков $C_{орг}$ в 2014 и 2021 гг. достоверно не различались между собой, оставаясь на низком уровне

не обеспеченности, как и обеспеченность почв большинства участков.

Подвижные формы $N-NH_4$, $N-NO_3$, P_2O_5 и K_2O являются основными соединениями питания растений, и этим определяется важность их изучения в почвах. Следует отметить, что содержание в дерново-подзолистых почвах большинства участков $N-NH_4$ и $N-NO_3$ соответствовало очень низкой обеспеченности, что свидетельствовало о необходимости увеличения применения доз азотных удобрений для обеспечения потребности культур. За 7-летний период мониторинга среднее содержание $N-NH_4$ и $N-NO_3$ снизилось на 5.9 и 59.1% соответственно. Вероятно, что в основном потеря нитратов происходила по причине их вымывания вниз по профилю почвы и из-за выноса урожаем культур.

Расчет *t*-критерия Стьюдента для содержания $N-NH_4$ показал, что оно с 2014 по 2021 г. изменилось не существенно, а расчет критерия Вилкоксона для содержания $N-NO_3$ установил достоверность различия величин содержания нитратов в 2014 и 2021 гг.

С 2014 г. средняя обеспеченность дерново-подзолистых почв участков подвижным P_2O_5 из-

Таблица 1. Агрохимические свойства пахотного слоя дерново-подзолистых почв реперных участков

Реперный участок, №	Район	Фракция, %*		N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	C _{орг.} %	pH _{KCl}	H _r	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	ЕКО	V, %	ПЭИ, балл
		<0.001	<0.01													
1	Ивановский	4.8	18.3	1.7	3.1	186	156	2.1	5.2	1.37	5.9	2.1	11.8	13.2	89.6	53.1
				1.9	1.4	250	160	2.0	5.8	0.89	5.0	2.5	10.8	11.7	92.4	71.2
6	Пучежский	2.0	9.3	2.8	4.3	203	66	2.1	5.6	0.83	7.9	2.6	10.7	11.5	92.8	48.5
				2.0	1.0	250	90	1.7	6.3	1.13	4.6	2.8	9.1	10.2	89.0	55.3
8	Верхнеландеховский	3.5	16.0	2.9	2.3	90	130	1.9	5.0	1.26	8.4	2.3	12.5	13.8	90.8	45.6
				1.3	1.5	59	62	1.6	5.5	0.85	4.4	1.7	8.2	9.1	90.6	44.2
9	Вичугский	3.0	14.1	0.5	1.7	198	57	2.3	6.1	0.67	7.9	2.5	27.9	28.6	97.7	62.9
				2.6	1.3	225	75	2.1	6.2	0.47	7.6	3.4	27.6	28.1	98.3	63.5
11	Кинешемский	5.5	25.0	1.3	9.5	39	76	2.4	5.5	1.04	4.4	1.8	16.0	17.0	93.9	47.2
				2.5	1.2	130	75	2.2	5.9	0.75	9.4	3.5	16.2	17.0	95.6	58.3
12	Комсомольский	5.7	20.0	2.2	1.7	250	92	2.1	6.2	0.46	8.5	2.8	17.0	17.5	97.4	57.0
				1.4	0.9	111	57	2.1	6.2	0.31	5.1	2.8	20.7	21.0	98.5	52.0
14	Родниковский	5.2	31.0	1.6	5.9	56	87	1.8	5.1	1.29	6.1	1.9	12.2	13.5	90.4	47.1
				0.8	2.3	21	54	2.0	5.4	0.95	7.9	3.0	11.8	12.8	92.6	45.6
15	Тейковский	2.3	9.0	1.3	12.5	228	185	2.0	6.5	0.38	7.6	2.8	16.8	17.2	97.8	60.0
				0.4	4.1	250	110	2.5	6.2	0.51	5.1	2.1	9.9	10.4	95.1	58.4
17	Палехский	3.3	16.3	2.7	2.1	58	95	2.2	6.0	0.66	5.5	2.3	12.5	13.2	95.0	46.9
				2.7	2.5	250	90	3.0	6.8	0.35	7.6	2.0	19.4	19.8	98.2	60.5
18	Шуйский	4.9	16.2	0.5	1.7	40	66	3.1	5.7	0.99	4.6	2.2	17.2	18.2	94.6	53.8
				0.6	1.5	40	62	3.0	5.7	0.80	8.4	3.6	20.3	21.1	96.2	56.7
21	Приволжский	5.1	19.9	1.5	3.2	147	60	2.8	6.4	0.48	6.2	2.6	38.6	39.1	98.8	62.9
				0.9	1.9	145	57	2.6	6.5	0.29	8.7	4.0	30.8	31.1	99.1	67.5
<i>M</i>		4.1	17.7	1.7	4.4	136	97	2.3	5.8	0.86	6.6	2.3	17.6	18.4	94.4	53.2
<i>±m</i>		0.4	1.9	1.6	1.8	157	81	2.3	6.0	0.66	6.7	2.9	16.8	17.5	95.1	57.5
				0.3	0.3	28	9	0.1	0.1	0.09	0.6	0.2	2.3	2.3	1.1	2.5

Примечания. 1. В таблице приведены средние арифметические значения, *M* – среднее арифметическое, *m* – ошибка среднего арифметического. То же в табл. 2, 3. 2. Над чертой – 2014 г., под чертой – 2021 г. То же в табл. 2–4.

*Фракцию (%) определяли на момент закладки разреза.

менилась с повышенной до высокой, подвижным K₂O – уменьшилась, оставшись в пределах той же градации. Увеличение обеспеченности почв P₂O₅ можно объяснить применением фосфорсодержащих удобрений, уменьшение K₂O – сокращением внесения калийсодержащих удобрений. Отмеченные изменения в содержании P₂O₅ и K₂O в 2014 и 2021 гг. подчинялись закону ненормально-го распределения и были недостоверными.

Дерново-подзолистые почвы большинства участков с 2014 по 2021 г. преимущественно имели среднюю и повышенную степень обеспеченности обменными Ca²⁺ и Mg²⁺ соответственно. С 2014 г. среднее содержание Ca²⁺ и Mg²⁺ увеличилось на 1.5 и 26.1% соответственно, но тем не ме-

нее продолжало соответствовать средней и повышенной степеням обеспеченности основаниями.

Расчет *t*-критерия Стьюдента показал, что изменения в содержании Ca²⁺ и Mg²⁺ в 2-х зависимых выборках за 2014 и 2021 гг., были несущественными. Средняя доля присутствия обменных Ca²⁺ и Mg²⁺ в общем составе поглощенных катионов в 2014 и 2021 гг. составляла 63.4% (lim = 38.2–92.4%) и 58.6% (lim = 22.8–97.7%) соответственно, что свидетельствовало о важной роли этих элементов в процессах химизма дерново-подзолистых почв Ивановской обл.

Емкостно-сорбционные показатели (*S* и ЕКО) почв участков к 2021 г. снизились на 4.6 и 5.2% соответственно, а средняя величина *V* возросла на 0.7% по сравнению со показателями 2014 г. Срав-

нение между собой величин рассмотренных показателей в 2-х зависимых выборках показало, что отмеченные изменения не были достоверными ($p > 0.05$).

Средние величины S и V соответствовали повышенной степени поглощения и высокой степени насыщенности основаниями на протяжении всего периода наблюдения, соответственно.

Согласно градации распределения глинистых частиц, почвы большинства участков имели супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав.

Расчет ПЭИ позволил объективно оценить состояние почвы по агрохимическим свойствам, а также учесть такие факторы почвообразования как климатические условия и рельеф местности, выявить негативные процессы, которые приводили к деградации и снижению плодородия. Установлено, что с 2014 по 2021 г. в среднем на реперных участках отмечали повышение показателя ПЭИ на 4.4 балла или на 8.2% к исходному уровню (табл. 1). Увеличение ПЭИ в 2021 г. можно объяснить тем, что климатические условия 2021 г. были более благоприятными, чем условия 2014 г., которые сказались на формировании климатического показателя, а также улучшением обеспеченности почв участков подвижным P_2O_5 и снижением обменной кислотности за счет увеличения применения фосфорных и известковых удобрений. В то же время к наиболее вероятным причинам снижения ПЭИ отдельных участков можно отнести уменьшение обеспеченности подвижными формами K_2O в результате снижения применения калийных удобрений.

Одним из факторов, влияющим на плодородие почвы, урожайность и качество растительной продукции, является обеспеченность почв доступными формами МЭ питания растений [17]. Провели анализ данных содержания в дерново-подзолистых почвах реперных участков доступных форм МЭ (табл. 2).

Бор. Среднее содержание и пределы изменений водорастворимых форм В в почвах участков согласовалось с данными, приведенными в монографии Панасина для этих почв (0.43–1.7 мг/кг) [18]. Согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны подвижными формами В [19] и исходя из изменений его содержания в почвах большинства реперных участков в 2014 г., его содержание преимущественно отвечало средней степени обеспеченности. К 2021 г. количество участков, имеющих высокую обеспеченность почв В, возросло.

В своих работах Добровольский, Чернова и Бекецкая отмечали, что основными факторами, влияющими на уровни содержания МЭ и ТМ в

почвах, являются количество органического вещества, реакция среды и гранулометрический состав почвы [20, 21].

Механизмы адсорбции В компонентами почв пока изучены недостаточно. Однако адсорбция В в определенной мере зависит от величины pH_{KCl} , содержания $C_{орг}$ и тяжелых гранулометрических фракций почвы [22]. На дерново-подзолистых почвах реперных участков Ивановской обл. между величинами pH_{KCl} , содержанием $C_{орг}$ и суммы илестых и глинистых частиц и содержанием В установлены недостоверные корреляционные взаимосвязи, преимущественно – слабой и реже – умеренной силы (табл. 2).

За период с 2014 по 2021 г. содержание В в изученных почвах увеличилось на 25.9%, однако, как показал расчет критерия Вилкоксона, отмеченное изменение не было достоверным.

Молибден. Содержание подвижных форм Мо в почвах участков согласуется с пределами его содержания в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах (0.11–0.15 мг/кг), отмеченными в работе [23]. По градации обеспеченности почв Мо [19] большинство почв участков в 2014 г. имели низкую обеспеченность элементом, к 2021 г. количество участков, имеющих среднюю обеспеченность, увеличилось.

Поведение минеральных форм подвижного Мо в почвах зависит от уровня pH_{KCl} [22]. Установлено, что между содержанием подвижного Мо и величиной pH_{KCl} в 2014 г. была установлена существенная ($p < 0.05$) корреляционная взаимосвязь заметной силы, в 2021 г. – несущественная умеренная. Содержание подвижного Мо хуже коррелировало с содержанием $C_{орг}$ и суммы фракций илестых и глинистых частиц, чем с величиной pH_{KCl} (табл. 2), что нашло подтверждение при изучении содержания подвижного Мо в дерново-подзолистых почвах Кировской обл. [9].

Сравнение содержания Мо в 2-х выборках с помощью t -критерия Стьюдента показало, что содержание Мо в почвах не существенно увеличилось на 15.4%.

Кобальт. Содержание подвижного Со в почвах участков согласовалось с пределами его содержания в дерново-подзолистых почвах (0.12–3.0 мг/кг), отмеченными в работе [24]. В 2014 г. большинство почв участков имели низкую обеспеченность Со, к 2021 г. – среднюю, что сказалось на средней величине обеспеченности почв элементом [19].

Распределение Со в почве зависит от содержания физической глины и илестых фракций, $C_{орг}$, оксидов железа и величины pH_{KCl} [22]. Между содержанием подвижного Со и показателями pH_{KCl} , содержанием $C_{орг}$, и илестых и глинистых частиц

Таблица 2. Концентрации МЭ и $S_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистых почвах, мг/кг

Реперный участок, №	Район	В	Мо	Со	Mn	$S_{\text{подв}}$
1	Ивановский	<u>0.43</u>	<u>0.10</u>	<u>0.89</u>	<u>66.3</u>	<u>4.5</u>
		0.72	0.08	2.01	58.0	2.3
6	Пучежский	<u>0.44</u>	<u>0.11</u>	<u>0.81</u>	<u>60.0</u>	<u>4.2</u>
		0.56	0.09	1.63	73.0	4.2
8	Верхнеландеховский	<u>0.53</u>	<u>0.10</u>	<u>0.62</u>	<u>60.5</u>	<u>4.0</u>
		0.52	0.17	0.79	70.0	2.3
9	Вичугский	<u>0.42</u>	<u>0.14</u>	<u>1.07</u>	<u>73.2</u>	<u>4.4</u>
		0.52	0.13	1.36	80.0	3.0
11	Кинешемский	<u>0.56</u>	<u>0.15</u>	<u>1.01</u>	<u>78.4</u>	<u>3.9</u>
		0.66	0.08	1.55	67.0	2.1
12	Комсомольский	<u>0.41</u>	<u>0.14</u>	<u>0.93</u>	<u>51.3</u>	<u>4.1</u>
		0.55	0.14	1.70	71.0	3.0
14	Родниковский	<u>0.47</u>	<u>0.12</u>	<u>0.95</u>	<u>70.0</u>	<u>5.2</u>
		0.74	0.21	1.69	58.0	1.5
15	Тейковский	<u>0.69</u>	<u>0.13</u>	<u>0.90</u>	<u>65.1</u>	<u>2.8</u>
		0.81	0.23	1.22	65.0	1.8
17	Палехский	<u>0.43</u>	<u>0.17</u>	<u>0.80</u>	<u>75.3</u>	<u>5.1</u>
		0.35	0.16	1.34	25.0	2.3
18	Шуйский	<u>0.47</u>	<u>0.13</u>	<u>0.91</u>	<u>70.1</u>	<u>4.8</u>
		1.08	0.23	1.61	61.0	4.1
21	Приволжский	<u>1.12</u>	<u>0.14</u>	<u>1.30</u>	<u>69.8</u>	<u>5.0</u>
		0.92	0.09	1.84	69.0	3.5
	М	<u>0.54</u>	<u>0.13</u>	<u>0.93</u>	<u>67.3</u>	<u>4.4</u>
		0.68	0.15	1.52	63.4	2.7
	±m	<u>0.06</u>	<u>0.01</u>	<u>0.05</u>	<u>2.3</u>	<u>0.2</u>
		0.06	0.02	0.10	4.3	0.3
	$r(C_{\text{орг}}/MЭ)$	<u>0.06*</u>	<u>0.34</u>	<u>0.52</u>	<u>0.35</u>	<u>0.30</u>
		0.37	-0.04	0.14	-0.39*	0.14
	$r(pH_{KCl}/MЭ)$	<u>0.05*</u>	<u>0.60**</u>	<u>0.53</u>	<u>-0.03</u>	<u>-0.25</u>
		-0.33	-0.31	0.09	0.19*	0.28
	$r(\text{сумма } <0.001 \text{ и } <0.01/MЭ)$	<u>0.04*</u>	<u>0.13</u>	<u>0.31</u>	<u>0.25</u>	<u>0.50</u>
		0.16	-0.07	0.39	-0.34*	-0.39
	В	=				
		-				
	Мо	<u>-0.06*</u>	=			
		0.29	-			
	Со	<u>0.16*</u>	<u>0.39</u>	=		
		0.39	-0.43	-		
	Mn	<u>0.11*</u>	<u>0.49</u>	<u>0.35</u>	=	
		-0.26*	-0.25*	-0.08*	-	
	$S_{\text{подв}}$	<u>-0.19*</u>	<u>0.18</u>	<u>0.25</u>	<u>0.32</u>	=
		0.26	-0.23	0.26	0.51*	-

*Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена.

**Значимые коэффициенты корреляции при $P = 0.95$. То же в табл. 4.

в дерново-подзолистых почвах участков установлены недостоверные корреляционные взаимосвязи заметной, умеренной и слабой силы соответственно (табл. 2). Оценка содержания S_o с помощью 2-выборочного t -критерия Стьюдента показала, что увеличение его присутствия в почвах на 63.4% было существенным.

Марганец. Для дерново-подзолистых почв России характерно наличие наибольших количеств обменных форм Mn (50–150 мг/кг почвы) [22]. Среднее содержание обменного Mn в 2014–2021 гг. соответствовало высокой степени обеспеченности [19]. В своей работе Битюцкий [22] отмечает, что концентрация Mn в почвах зависит от реакции среды и содержания гумуса. Зырин указывает на то, что значительная часть подвижного Mn почв сосредоточена в тонкодисперсных частицах и в связях с органическим веществом [25]. В нашем исследовании между содержанием обменного Mn и величиной pH_{KCl} установлены слабые недостоверные корреляции, между содержанием $S_{орг}$ – корреляции умеренной силы, между содержанием частиц ила и глины – корреляции слабой и умеренной силы (табл. 2). На отсутствие взаимосвязей четкого характера между содержанием обменного Mn и pH_{KCl} в дерново-подзолистых почвах Удмуртии и Кировской обл. России, Беларуси отмечено в работах [9, 26, 27]. Отсутствие высоких и значимых связей между рассмотренными свойствами дерново-подзолистых почв и содержанием подвижного Mn в них может быть связано с тем, что значительное влияние на содержание подвижного Mn оказывает окислительно-восстановительный потенциал почвы и содержание лабильного органического вещества [28]. Как показал расчет критерия Вилкоксона, содержание Mn в 2021 г. не существенно снизилось на 5.8% к уровню 2014 г.

Предположительно, повышение обеспеченности подвижными формами V , Mo и Co связано прежде всего с поступлением в дерново-подзолистые почвы дополнительных количеств данных элементов от техногенных источников загрязнения, а также с удобрениями.

Сера. Общее содержание серы в почве определяется почвообразующими породами и содержанием органического вещества. Установлено, что с органическим веществом почвы может быть связано до 70–90% валовых запасов серы. Между содержанием $S_{орг}$ и серы в его составе установлена прямая корреляционная связь линейной зависимости. Однако между содержанием валовых и подвижных форм серы в почвах не всегда отмечена прямая линейная корреляция [29]. В нашем исследовании между содержанием $S_{орг}$ и $S_{подв}$ в почвах была выявлена умеренной и слабой тесноты недостоверная корреляционная взаимосвязь.

Корреляции между $S_{подв}$ и величиной pH_{KCl} , между $S_{подв}$ и содержанием суммы частиц ила и глины имели разные направленности, но одинаковые по силе взаимосвязи.

Исходя из среднего содержания $S_{подв}$, дерново-подзолистые почвы в течение всего периода мониторинга имели низкий уровень обеспеченности $S_{подв}$ (<1 мг/кг почвы) [30]. С 2014 г. среднее содержание $S_{подв}$ в почвах реперных участков к 2021 г. достоверно снизилось на 38.6%, что можно объяснить уменьшением применения органических и серосодержащих удобрений, систематическим ежегодным выносом элемента из почвы урожаем и вымыванием сульфатов из пахотного слоя почв участков.

Между доступными формами изученных МЭ в дерново-подзолистых почвах отмечены недостоверные корреляционные взаимосвязи прямой и обратной зависимости, изменяющиеся по годам (табл. 2). По-видимому, концентрации доступных форм МЭ в почвах больше зависели от присутствия других сопутствующих химических элементов.

В настоящее время для минеральных почв по-прежнему не разработаны величины 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 изменяются в зависимости от различных почвенно-климатических условий их образования, деятельности человека и т.п. Поэтому, для оценки концентрации ТМ и As использовали методику, применяемую в геохимии, заключавшуюся в сравнении полученных величин валовых или подвижных концентраций экотоксикантов в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. с имеющимися валовыми и подвижными ПДК и кларками ТМ в земной коре [31].

Валовые концентрации ТМ в почвах дают полную характеристику почвы относительно актуального содержания в них экотоксикантов. Более объективными являются данные по содержанию подвижных или доступных для растений форм металлов. Данные о концентрациях подвижных и валовых форм ТМ и As в почвах участков представлены в табл. 3.

В настоящем исследовании также решили выявить взаимосвязи между доступными содержаниями изученных МЭ, валовыми и подвижными формами ТМ и указанными свойствами дерново-подзолистых почв, которые оценивали по величинам коэффициентов линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена, при $P = 0.95$ (табл. 2, 4).

Таблица 3. Концентрации форм ТМ и As в дерново-подзолистых почвах, мг/кг

Реперный участок, №	Район	Подвижные формы						Валовые формы	
		Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Hg	As
1	Ивановский	<u>0.17</u>	<u>0.72</u>	<u>0.042</u>	<u>0.40</u>	<u>0.40</u>	<u>0.63</u>	<u>0.016</u>	<u>1.80</u>
		0.10	1.13	0.035	0.60	0.30	н/о*	0.027	2.47
6	Пучежский	<u>0.12</u>	<u>0.61</u>	<u>0.051</u>	<u>1.28</u>	<u>0.26</u>	<u>0.81</u>	<u>0.011</u>	<u>1.30</u>
		0.11	1.04	0.050	0.68	0.50	н/о	0.027	1.33
8	Верхнеландеховский	<u>0.10</u>	<u>0.69</u>	<u>0.048</u>	<u>0.37</u>	<u>0.60</u>	<u>0.93</u>	<u>0.008</u>	<u>1.70</u>
		0.08	0.90	0.026	0.57	0.50	н/о	0.014	2.20
9	Вичугский	<u>0.12</u>	<u>0.68</u>	<u>0.043</u>	<u>0.70</u>	<u>0.25</u>	<u>0.68</u>	<u>0.012</u>	<u>3.80</u>
		0.09	1.50	0.074	1.36	0.32	н/о	0.027	3.27
11	Кинешемский	<u>0.15</u>	<u>0.90</u>	<u>0.042</u>	<u>0.38</u>	<u>0.56</u>	<u>0.65</u>	<u>0.014</u>	<u>4.05</u>
		0.11	1.61	0.069	0.84	0.50	н/о	0.027	3.81
12	Комсомольский	<u>0.12</u>	<u>0.94</u>	<u>0.043</u>	<u>0.35</u>	<u>0.36</u>	<u>0.58</u>	<u>0.016</u>	<u>1.78</u>
		0.10	0.80	0.039	0.85	0.39	н/о	0.027	1.14
14	Родниковский	<u>0.11</u>	<u>1.06</u>	<u>0.060</u>	<u>0.23</u>	<u>0.38</u>	<u>0.38</u>	<u>0.018</u>	<u>3.25</u>
		0.11	0.83	0.042	0.66	0.28	н/о	0.027	3.20
15	Тейковский	<u>0.11</u>	<u>1.72</u>	<u>0.035</u>	<u>0.68</u>	<u>0.30</u>	<u>0.71</u>	<u>0.014</u>	<u>1.13</u>
		0.09	1.90	0.061	0.97	0.35	н/о	0.014	0.90
17	Палехский	<u>0.15</u>	<u>1.79</u>	<u>0.035</u>	<u>1.25</u>	<u>0.42</u>	<u>0.84</u>	<u>0.017</u>	<u>1.83</u>
		0.15	0.75	0.079	0.69	0.36	н/о	0.027	0.86
18	Шуйский	<u>0.19</u>	<u>1.08</u>	<u>0.063</u>	<u>0.52</u>	<u>0.47</u>	<u>0.52</u>	<u>0.014</u>	<u>2.90</u>
		0.11	1.75	0.047	1.16	0.60	н/о	0.027	2.37
21	Приволжский	<u>0.25</u>	<u>1.13</u>	<u>0.045</u>	<u>0.33</u>	<u>0.36</u>	<u>1.15</u>	<u>0.014</u>	<u>2.38</u>
		0.16	2.38	0.070	1.07	1.39	н/о	0.027	2.65
	<i>M</i>	<u>0.14</u>	<u>1.03</u>	<u>0.046</u>	<u>0.59</u>	<u>0.40</u>	<u>0.72</u>	<u>0.014</u>	<u>2.36</u>
		0.11	1.33	0.054	0.86	0.50	н/о	0.025	2.20
	$\pm m$	<u>0.01</u>	<u>0.12</u>	<u>0.003</u>	<u>0.11</u>	<u>0.03</u>	<u>0.06</u>	<u>0.001</u>	<u>0.30</u>
		0.01	0.16	0.005	0.08	0.09	н/о	0.002	0.31
	ПДК	3	23	–	6	4	6	2.1	2
	Кларк мировой	55	70	0.2	12.5	75	100	0.08	1.8

*н/о – не определяли. То же в табл. 4.

Медь. Среднее содержание подвижных форм Cu, переходящих в вытяжку ААБ рН 4.8, за весь период наблюдения в почвах участков отличалось существенно меньшими показателями по сравнению с усредненным содержанием, характерным для дерново-подзолистых почв европейской части России [32].

Байдина и Ильин указывали, что обычно наибольшее содержание подвижной Cu находится в верхних горизонтах почв, обогащенных органическим веществом [33, 34]. В нашем случае отмечено подтверждение этому факту, о чем свидетельствовали коэффициенты корреляции заметной и достоверно высокой силы взаимосвязи.

Шихова и Егошина отмечали, что содержание подвижной Cu в пахотных горизонтах дерново-

подзолистых почв Кировской обл. не зависело от величины рН_{KCl} [9]. Факт наличия слабой взаимосвязи между подвижной Cu и показателем рН_{KCl} установлен и в нашем исследовании.

Подвижные формы Cu прочно связываются глинистыми и илистыми частицами суглинистых и глинистых почв. Однако в виду того, что дерново-подзолистые почвы участков имели небольшую долю присутствия в своем гранулометрическом составе указанных частиц, то и взаимосвязь, объясняющая эту зависимость, отличалась низкими и недостоверными величинами (табл. 2). Как показал расчет критерия Вилкоксона, за исследованный период отмечено достоверное снижение содержания подвижных форм Cu на 27.3%.

Таблица 4. Коэффициенты линейной парной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена между свойствами дерново-подзолистых почв и концентрациями в них ТМ и As

Свойства почвы/ТМ	ТМ							
	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Hg	As
r (C _{орг} /ТМ)	<u>0.85**</u>	<u>0.17*</u>	<u>0.28</u>	<u>0.19</u>	<u>0.10</u>	<u>0.19</u>	<u>-0.01</u>	<u>0.33</u>
	0.52	0.41	0.57	0.44	0.30*	н/о	0.23	-0.20
r (рН _{KCl} /ТМ)	<u>0.25*</u>	<u>0.48*</u>	<u>-0.49</u>	<u>0.20*</u>	<u>-0.55</u>	<u>0.32</u>	<u>0.15</u>	<u>-0.16</u>
	0.43*	0.18	0.73**	0.24	0.25*	н/о	0.23*	-0.51
r (сумма <0.001 и <0.01/ТМ)	<u>0.28*</u>	<u>0.21*</u>	<u>0.34</u>	<u>-0.79**</u>	<u>0.41</u>	<u>-0.38</u>	<u>0.54</u>	<u>0.59</u>
	0.40*	-0.14	-0.14	-0.19	-0.05*	н/о	0.49*	0.61**
Cu	=	=	=	=	=	=	=	=
Zn	<u>0.27*</u>	=	=	=	=	=	=	=
	0.05*	=	=	=	=	=	=	=
Cd	<u>-0.03*</u>	<u>-0.32*</u>	=	=	=	=	=	=
	0.48*	0.44	=	=	=	=	=	=
Pb	<u>0.04*</u>	<u>-0.15*</u>	<u>-0.30*</u>	=	=	=	=	=
	0.14*	0.67**	0.53	=	=	=	=	=
Ni	<u>0.12*</u>	<u>0.17*</u>	<u>0.14</u>	<u>-0.31*</u>	=	=	=	=
	0.37*	0.40*	0.11*	0.28*	=	=	=	=
Cr	<u>0.01*</u>	<u>0.04*</u>	<u>-0.41</u>	<u>0.25*</u>	<u>0.04</u>	=	=	=
	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	=	=	=
Hg	<u>0.21*</u>	<u>0.59*</u>	<u>-0.05</u>	<u>-0.32*</u>	<u>-0.18</u>	<u>-0.48</u>	=	=
	0.65**	-0.15*	0.30*	0.22*	0.00*	н/о	=	=
As	<u>0.38*</u>	<u>0.00*</u>	<u>0.30</u>	<u>-0.25*</u>	<u>0.20</u>	<u>-0.35</u>	<u>0.14</u>	=
	0.07	0.27	0.06	0.24	-0.04*	н/о	0.37*	=

Цинк. Среднее содержание подвижного Zn в исследованных почвах во многом соответствовало среднему содержанию ТМ в дерново-подзолистых почвах центральных районов Нечерноземной зоны России [35].

Природа взаимосвязи подвижных соединений Zn с содержанием C_{орг} и показателем рН_{KCl}, по наблюдениям многих авторов, имеет сложный и неоднозначный характер, что может проявляться в недостоверных и низких корреляциях [9, 18, 22], завися от доли присутствия в органическом веществе почв лабильных фракций, режима увлажнения, окислительно-восстановительного потенциала почвы и др. Судя по рассчитанным величинам коэффициентов корреляций, подвижные соединения Zn слабо и умеренно коррелировали с содержанием C_{орг} и показателем рН_{KCl} (табл. 4). Во многом схожие с нашими величинами коэффициентов корреляций, между содержаниями подвижного Zn и C_{орг} были получены в работе

Шиховой и Егошиной для дерново-подзолистых почв Кировской обл. ($r = 0.30$) [9]. Корреляция между содержаниями подвижных форм Zn и суммы количества частиц глины и ила в изученных почвах имела различное направление и слабую степень связи. В 2021 г. среднее содержание подвижного Zn в почвах незначительно ($p > 0.05$) увеличилось на 29.1% к уровню 2014 г.

Кадмий. Отмеченные пределы изменений и средние величины содержания подвижных форм Cd в почвах участков соотносятся с данными, указанными в монографии [9], полученными для дерново-подзолистых почв.

В накоплении подвижного Cd почвами большую роль играет органическое вещество и особенно его лабильные формы, содержание которых в дерново-подзолистых почвах невелико [9, 36]. В силу этого, исследованные почвы имели недостоверную заметную и слабую положительную корреляционную взаимосвязь между содер-

жаниями $C_{\text{орг}}$ и подвижных форм Cd. Между содержанием подвижного Cd и показателем pH_{KCl} в 2021 г. прослежена отчетливая положительная достоверная корреляция, в 2014 г. – отрицательная слабая.

Andersson утверждал, что Cd активнее связывается органическим веществом, чем тонкодисперсными частицами глинистых минералов, и его концентрация в почве положительно коррелирует с содержанием $C_{\text{орг}}$ [37], что нашло свое подтверждение в нашем исследовании.

Распределение подвижного Cd в почвах участков подчинялось закону нормального распределения. Анализ сравнения зависимых выборок показал, что отмеченное увеличение средней концентрации металлического токсиканта на 17.4% не было достоверным.

Свинец. Содержание подвижного Pb в изученных почвах было близко к его содержанию в дерново-подзолистых почвах Русской равнины [9]. Среди многих видов почв самым высоким средством к поглощению Pb обладают гумусированные почвы [36]. Шихова и Егошина отмечали, что для подвижных форм Pb характерна прямая корреляция с величиной кислотности почвы [9]. Однако в нашем случае дерново-подзолистые почвы имели слабую и умеренную корреляцию с величиной pH_{KCl} и содержанием $C_{\text{орг}}$. Илистые и глинистые частицы преимущественно легких по гранулометрическому составу исследованных почв не принимали активного участия в снижении концентрации подвижного Pb, о чем свидетельствовали рассчитанные коэффициенты корреляции (табл. 4). Содержание форм подвижного Pb в почвах участков отвечало ненормальному распределению, а анализ сравнения зависимых выборок выявил, что снижение средней концентрации Pb на 27.3% не было существенным.

Никель. Концентрации подвижных форм Ni в изученных почвах участков во многом повторяли результаты, отмеченные для этих почв в работе [9], где было показано, что растворимость Ni в дерново-подзолистых почвах находится в обратной зависимости от величины pH_{KCl} . Однако в нашем исследовании влияние величины pH_{KCl} не однозначно сказывалось на содержании подвижного Ni, что очевидно могло быть связано с различиями в окислительно-восстановительном состоянии почв, качественном состоянии гумуса и режиме увлажнения почв [38].

Отмечено, что содержание подвижного Ni слабо коррелировало с гранулометрическим составом дерново-подзолистых почв Кировской обл. [9], особенно тогда, когда почвы содержали мало илистых и глинистых частиц. Подтверждение этому факту можно найти и в нашем исследова-

нии, т.к. малое присутствие в исследованных почвах глинистых и особенно илистых частиц практически не коррелировало с содержанием подвижного Ni (табл. 4). Увеличение содержания подвижного Ni в почвах участков за период мониторинга на 25.0%, как показал расчет критерия Вилкоксона, не было существенным.

Данные по содержанию подвижного Cr в почвах европейской части России весьма разнородны. Например, в суглинистых дерново-подзолистых почвах России его содержание изменяется от 0.5 до 4 мг Cr/кг при средней концентрации 2.6 мг/кг [9]. Обследованные дерново-подзолистые почвы Ивановской обл. не превышали усредненные показатели и пределы содержания подвижного Cr в дерново-подзолистых почвах России.

Отмечено, что для подвижного Cr характерно отсутствие четких закономерностей его поведения не только в пахотном слое, но и по всему профилю дерново-подзолистых почв, отсутствие связи с содержанием $C_{\text{орг}}$ и величиной pH_{KCl} [9]. Рассчитанные нами коэффициенты корреляции показали слабую взаимосвязь между содержанием $C_{\text{орг}}$, величиной pH_{KCl} и содержанием подвижного Cr. Возможно, что на содержание подвижного Cr в большей степени влияет качественный состав органического вещества, а не его общее содержание в дерново-подзолистых почвах. Между содержаниями тонкодисперсных почвенных частиц и подвижного Cr отмечена отрицательная заметная корреляция.

Ртуть. Фоновые валовые концентрации Hg в незагрязненных дерново-подзолистых почвах оцениваются приблизительно от 0.04 до 0.75 мг/кг почвы [39]. Содержание валовой Hg в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. было примерно в 2 раза меньше нижнего предела ее содержания. По данным ряда авторов [40, 41], органическое вещество почв обладает высокой способностью к поглощению Hg, а снижение обменной кислотности с 3.0 до 6.0 приводит к уменьшению концентрации Hg, т.е. ее иммобилизации [42]. В месте с тем влияние содержания органического вещества и величины pH_{KCl} практически никак не сказывалось на содержании валовой Hg в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. Более заметное влияние на поглощение валовой Hg оказывало содержание фракций ила и глины, что подтверждено положительными корреляциями с заметными силами взаимосвязи (табл. 4). За период мониторинга содержание валовой Hg в почвах участков, как показал анализ сравнения 2-х выборок, достоверно возросло на 75.7%.

Мышьак. Средние фоновые валовые концентрации As в дерново-подзолистых суглинистых почвах оценены в 2.2 мг/кг [43]. В целом содержа-

ние As в верхнем слое незагрязненной почвы обычно меняется в интервале от 0.2 до 16 мг/кг [44], что вполне отвечает оценке Ковды [28], считавшим накопление As в почвах в интервале 2.0–20 мг/кг относительно безопасным.

Установлено, что максимальные концентрации металлоида, как правило, связаны с почвами обогащенными органическим веществом [36]. В нашем исследовании подтверждение этому факту не обнаружилось, т.к. рассчитанные коэффициенты корреляции имели недостоверную разнонаправленную слабую и умеренную взаимосвязь между содержаниями $C_{орг}$ и As.

О влиянии кислотности почвы на подвижность соединений As в литературных источниках приведены противоречивые сведения [44]. Изменение уровня pH_{KCl} дерново-подзолистых почв Ивановской обл. имело обратную корреляционную взаимосвязь слабой и заметной силы с концентрацией валовых форм As (табл. 4). Наиболее заметное и достоверное влияние на изменение содержания валового As проявлялось со стороны небольшого присутствия в почвах тонкодисперсных почвенных частиц – ила и глины, которые, тем не менее, эффективно адсорбировали As на своей поверхности. Средняя концентрация валовых форм As в почвах участков к 2021 г. несущественно ($p > 0.05$) снизилась на 6.8% к исходному уровню 2014 г. Увеличение концентрации As в почвах агроценозов связано главным образом с поступлением в них поллютанта вместе с пестицидами [44], поэтому отмеченное нами снижение концентрации металлоида можно объяснить отказом от применения мышьяксодержащих пестицидов, а также ежегодными выносами As урожаем культур.

Во всех случаях концентрации подвижных форм изученных ТМ и валовых форм Hg в дерново-подзолистых почвах были значительно меньше ПДК и величин кларков. Присутствие валовых форм As в почвах половины участков превышало кларк в 1.22–2.25 раза и валовую величину ПДК – в 1.10–2.02 раза, что создавало опасность перехода металлоида из почвы в растительную продукцию и далее по трофической цепи в организм человека. В то же время, принимая во внимание величину pH_{KCl} и гранулометрический состав почв тех участков, где превышался уровень валовой ПДК_{As}, было отмечено, что содержание валового As не превышало величины валовой ОДК_{As} [45].

В большинстве случаев между формами содержания исследованных ТМ в дерново-подзолистых почвах отмечали взаимосвязи слабой и умеренной силы и реже – заметной. Установлено, что только между содержанием подвижных форм

Pb и Zn, валовой формы Hg и подвижной формы Cu имелась достоверная положительная взаимосвязь (табл. 4), что может свидетельствовать о том, что между ними существуют некие общие механизмы взаимодействия с органическими, минеральными и органо-минеральными компонентами дерново-подзолистых почв.

ВЫВОДЫ

1. За период мониторинга реперных участков дерново-подзолистых почв отмечено достоверное снижение величин pH_{KCl} и H_r , а также содержания N-NO₃, недостоверное увеличение содержания подвижного P₂O₅, обменных Ca²⁺ и Mg²⁺, V, недостоверное снижение содержания подвижных N-NH₄, K₂O, а также S и ЕКО, при неизменном содержании $C_{орг}$. Оценка исследованных почв с 2014 по 2021 г. по системе ПЭИ выявила слабую тенденцию к его увеличению на 4.4 балла.

2. Среднее содержание и пределы изменений содержания подвижных форм В, Мо, Со и Мп соответствовали типичным показателям, характерным для дерново-подзолистых почв России. В 2021 г. в почвах реперных участков отмечено недостоверное увеличение обеспеченности подвижными формами В и Мо и достоверное увеличение содержания Со. С 2014 г. среднее содержание Мп в почвах к 2021 г. снизилось недостоверно, S_{подв} – достоверно. Корреляции между содержанием МЭ в почвах, величиной pH_{KCl} , содержанием $C_{орг}$, наличием глинистых и илистых частиц в основном имели недостоверные зависимости слабой и умеренной силы.

3. Среднее содержание и пределы изменений содержания подвижных и валовых форм Cu и Hg соответственно отличались заметно меньшими показателями, по сравнению с усредненным содержанием и пределами, характерными для дерново-подзолистых почв. Концентрации подвижных форм Zn, Cd, Pb, Ni, Cr и валового As в почвах участков во многом согласовывались с показателями, характерными для легких дерново-подзолистых почв. За период мониторинга в почвах участков недостоверно увеличились концентрации Zn, Cd и Ni, содержание Hg увеличилось существенно, Pb и As – снизились несущественно, для содержания Cu было отмечено достоверное снижение.

4. Концентрации подвижных форм изученных ТМ и валовых форм Hg в почвах были значительно меньше ПДК и величин кларков. Присутствие валового As в почвах некоторых участков превышало кларк в 1.22–2.25 раза и валовую ПДК_{As} в 1.10–2.02 раза, что создает опасность перехода As

из почвы в растительную продукцию и организм человека.

5. Оценка корреляций между содержанием форм ТМ, показателем pH_{KCl} , содержанием $S_{орг}$, суммы илистых и глинистых частиц и между содержаниями самих ТМ в почвах показала, что отмеченные взаимосвязи имели довольно сложный характер проявления по силе, во многом зависящий от сезонной динамики каждого из них и от других, не изучавшихся в работе, свойств почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Плющиков В.Г., Кузнецов А.В., Павлихина А.В.* Методы агроэкологического мониторинга на реперных участках. М.: Россельхозакадемия, 2002. 58 с.
2. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова. Метод. рук.-во. М.: Росинформагротех, 2005. 784 с.
3. *Самсонова В.П., Кротов Д.Г., Лавринова Е.Ю.* Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области // *Агрохимия*. 2017. № 7. С. 11–18. <https://doi.org/10.7868/S000218811707002X>
4. *Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С.* Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агрохим. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
5. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
6. *Уткин А.А.* Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188122060126>
7. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Оценка уровня плодородия и агроэкологического состояния выработанных торфяных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2021. № 9. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0002188121090118>
8. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 12–21. <https://doi.org/10.31857/S0002188122030139>
9. *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.
10. *Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д.* Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищество научн. изд. КМК, 2006. 509 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 спектрометрии. 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.: Госком СССР по гидрометеорологии, 1990. 36 с.
16. Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом. М.: ЦИНАО, 1993. 13 с.
17. *Ильин В.Б., Сысо А.И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
18. *Панасин В.И.* Микроэлементы и урожай. Калининград: ОГУП “Калининград. кн. изд-во”, 2000. 276 с.
19. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
20. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
21. *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.
22. *Битюцкий Н.П.* Микроэлементы и растение. Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 232 с.
23. *Бакирова В.Г., Минибаев В.Г., Тюменева Р.Б.* Содержание различных форм марганца, кобальта и молибдена в дерново-подзолистых и серых лесных оподзоленных почвах Марийской и Чувашской АССР // *Научные основы повышения плодородия почв*. Саранск, 1983. С. 114–118.
24. *Пейве Я.В.* Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.
25. *Зырин Н.Г.* Узловые вопросы учения о микроэлементах в почвоведении. Доклад на соискание уч. степ. д-ра биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 1968. 39 с.
26. *Клебанович Н.В.* Влияние кислотности дерново-подзолистых почв Беларуси на содержание подвижных форм микроэлементов // *Весці Акад. Аграр. Навук Беларусі*. 1998. № 3. С. 37–40.
27. *Кузнецов Н.К.* Микроэлементы в почвах Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 1994. 285 с.
28. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
29. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.
30. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2016. № 5. С. 39–47.

31. *Taylor S.R.* Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1964. V. 28. № 8. P. 1273–1285.
32. *Катальмов М.В.* Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 330 с.
33. *Байдина Н.Л.* Содержание элементов-биофилов в черноземах и дерново-подзолистых почвах Приобья // *Изв. СО АН СССР. Сер. Биол.* 1985. Вып. 3. № 18. С. 26–31.
34. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в система почва–растение. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
35. *Ермолаев С.А., Сычев В.Г., Плющиков В.Г.* Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв России // *Плодородие.* 2001. № 1. С. 4–9.
36. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / Под общ. ред. М.М. Овчаренко. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.
37. *Andersson A.J.* The distribution of heavy metals in soil material as influenced by the ionic radius // *Swed. J. Agric. Res.* 1977. V. 7. P. 79–83.
38. *Водяницкий Ю.Н., Добровольский В.В.* Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 1998. 216 с.
39. *Зырин Н.Г., Садовникова Л.К.* Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1985. 209 с.
40. *Удоденко Ю.Г.* Накопление и распределение ртути в почвах и педобионтах заповедных территорий (на примере Воронежского и Окского заповедников): Дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 2014. 158 с.
41. *Lindquist O., Johansson K., Bringmark L., Timm B., Aastrup M., Andersson A., Hovsenius G., Håkanson L., Iverfeldt Å. and Meili M.* Mercury in Swedish environment resent on causes, consequences and corrective methods // *Water Air Soil Pollut.* 1991. V. 55. 157 p.
42. *Yin Y., Allen H., Sanders P.* Adsorption of mercury (II) by soil: effects of pH, chloride, and organic matter // *J. Environ. Qual.* 1996. № 4. P. 837–844.
43. *Черненко Т.В.* Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.
44. *Кабата Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
45. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2 “Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (вместе с “СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные правила и нормы...”).

Monitoring of Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Soils of the Ivanovo 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 agrochemical and ecotoxicological studies of the arable layer of reference plots of sod-podzolic soils for agricultural purposes of the Ivanovo region are presented, which were carried out in order to establish the level of fertility according to the main agrochemical indicators, the content of sulfur and trace elements, ecotoxicological state – by gross and mobile forms of heavy metals and arsenic. The deterioration of such indicators of soil fertility as the availability of ammonium and nitrate nitrogen, mobile potassium, the amount of absorbed bases and the capacity of cation exchange has been established. An increase in the content of mobile phosphorus, exchangeable calcium, magnesium and other absorbed bases was noted with an unchanged content of organic matter. The fertility of the studied soils was assessed by calculating the soil-ecological index. The provision of soils with trace elements and mobile sulfur has been established. The content of gross and mobile forms of metals in soils, with the exception of arsenic in the soils of individual sites, did not exceed the maximum permissible concentrations and clarks. The studied soils are slightly polluted and are not dangerous for cultivated plants and human health. According to the Pearson and Spearman correlation coefficients, the characters of the mutual influence of metabolic acidity, the content of organic matter and the granulometric composition of soils with the content of available forms of trace elements, gross and mobile forms of metals and arsenic are established.

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

УДК 631.41:631.584.5:631.445.41(470.32)

ВЛИЯНИЕ ГРЕЧИШНЫХ СИДЕРАЛЬНЫХ АГРОСООБЩЕСТВ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЕННЫХ РЕСУРСОВ ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ

© 2023 г. А. М. Гребенников

¹Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

*E-mail: gream1956@gmail.com

Поступила в редакцию 07.11.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

В полевом опыте изучено влияние бинарных сидеральных гречишных смесей на объемную массу, коэффициент структурности и степень агрегатности пахотного и подпахотного горизонтов чернозема типичного тяжелосуглинистого. Показано, что смешивание посевов в сидеральных агросообществах в большинстве случаев приводило к возрастанию урожайности последующих зерновых культур и улучшению рассматриваемых агрофизических свойств. Наиболее существенное позитивное влияние на агрофизические свойства как пахотного, так и подпахотного горизонтов, а также на увеличение урожайности зерновых культур оказал агроценотический эффект в бинарных смесях гречиха сорта Деметра + подсолнечник и гречиха сорта Крылатая + подсолнечник. В вариантах в почве под агросообществами соя + гречиха сорта Крылатая и гречиха сорта Деметра + гречиха сорта Крылатая, напротив, отмечено незначительное улучшение этих показателей, а иногда и их ухудшение в обоих горизонтах.

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

DOI: 10.31857/S000218812304004X, **EDN:** DНУВОВ

ВВЕДЕНИЕ

Применение в России гречихи в качестве сидерального удобрения было рекомендовано еще в XVIII веке первым русским агрономом А.Т. Болотовым [1]. Удобрительная ценность гречишных сидератов обусловлена способностью создания к моменту цветения этой культуры высокопродуктивной биомассы, содержащей в сбалансированном соотношении большое количество элементов питания растений [2, 3]. Применение сидеральных удобрений приводит к улучшению комплекса свойств почв, определяющих их потенциальное плодородие и фитосанитарное состояние [4–8]. Особенно актуальным это является для почв, длительное время используемых в земледелии [9, 10]. Добиться увеличения урожайности сидеральной массы и повышения содержания в ней элементов питания растений, а следовательно, и более позитивного воздействия на свойства почв, возможно, если в качестве сидератов использовать не одну культуру, а смесь экологически и аллелопатически совместимых культур. Некоторыми авторами отмечено, что смешанные

посевы по сравнению с монокультурой обладают значительно более высоким потенциалом средообразования [11]. Это связано с более выраженной способностью смешанных агросообществ по сравнению с чистыми посевами повышать плодородие почвы и поддерживать экологическое равновесие между компонентами агроэкосистемы благодаря наличию регуляторных механизмов обратной связи. Такие возможности агросообществ обусловлены их приближением по биоразнообразию (по сравнению с чистыми посевами) к естественным фитоценозам, что выражается в способности смешанных посевов эффективным образом влиять на среду произрастания, частично используя при этом механизмы воздействия естественного растительного покрова на окружающую среду, средообразующую роль которого широко использовал человек в многовековой практике залежных и переложных систем земледелия [11].

При использовании для сидерации смешанных агросообществ в сравнении с чистыми посевами их компонентов часто отмечали более значительное улучшение всего комплекса свойств почв, определяющих плодородие, а также фито-

санитарного состояния культур, выращиваемых после заделки сидератов [12–14]. Однако информация о влиянии сидеральных смесей с гречихой на их продуктивность и свойства почв, представленная в литературе, чрезвычайно скупа, требует дальнейших исследований, но при этом иногда встречаются сведения, указывающие на преимущества использования сидеральных смесей с гречихой по отношению к чистым посевам культур, составляющих эти смеси. Например, к моменту заделки сидеральная смесь горох + гречиха аккумулировала значительно больше органического вещества, чем сидерат, представленный чистыми посевами компонентов этой смеси. При этом в 1-метровом слое почвы под сидеральной смесью оставалось значительно больше продуктивной влаги, чем в таком же по мощности слое под чистыми посевами компонентов этой смеси [15]. При выращивании смеси гречихи с люпином происходило улучшение физических, биологических и химических свойств почв, а также снижалась засоренность и степень повреждения культур вредителями и болезнями [16].

Цель работы – оценка влияния гречишных сидератов, выращиваемых в чистых посевах и в смесях с другими культурами, на агрофизические свойства черноземных почв.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевом опыте с сидератами, состоящими из чистых посевов гречихи сортов Деметра и Крылатая, сои сорта Октябрьская, подсолнечника сорта Енисей и из бинарных смесей указанных сортов гречихи между собой, а также с соей и подсолнечником, проводили отдельный учет продуктивности сидеральных агросообществ и урожайности последующих зерновых культур. Опыты проводили в трехкратной повторности на стационаре Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева (Курская обл.) в период с 2001 по 2005 гг. Почвы опытного участка были представлены тяжелосуглинистыми мощными типичными черноземами.

На учетной площади каждой делянки, составляющей 280 м² (5,6 × 50 м), сплошным методом определяли продуктивность сидеральных культур и урожайность озимой и яровой пшеницы, которые по годам исследования чередовались с посевами сидератов.

В годы закладки и окончания проведения опытов в пахотном (0–25 см) и подпахотном (25–40 см) горизонтах определяли объемный вес почвы. В год окончания опытов в тех же горизонтах определяли ее гранулометрический и микроагрегатный состав. Полученные результаты использовали для расчета фактора структурности и степени

агрегатности, отражающих водоустойчивость и водопрочность почвенной структуры. Для определения агрофизических свойств, использовали методики, приведенные в [17].

Для оценки влияния фактора смешивания посевов на изменение исследованных показателей был разработан метод построения вариантов сравнения [18]. Суть этого метода состояла в расчетном построении для каждого смешанного агросообщества варианта сравнения из соответствующих чистых посевов таким образом, чтобы единственным различием между смешанным агросообществом и вариантом сравнения было наличие фактора смешивания в первом случае и отсутствие – во втором. Для исследованных показателей вариант сравнения рассчитывали по следующей формуле: $V_{Si} = (P_i \times W_i) : \text{Sum}(W_i)$, где V_{Si} – вариант сравнения для i -той культуры, P_i – величина исследованного показателя в чистых посевах i -той культуры, W_i – доля i -той культуры в смешанном посеве, определенная как количество семян этой культуры, отнесенных к норме высева, соответствующей нормальным по плотности посевам ($W_i = Q_i/N_i$), Sum – указатель суммы. Если величина исследованного показателя имела начальную и конечную величину, как у объемного веса, определенного при закладке и окончании опыта, то P_i было равно разности между конечной и начальной величинами этого показателя. Влияние фактора смешивания на продуктивность агроценоза и свойства почв определяли как разность между величинами этих показателей в смешанном агросообществе и в варианте сравнения.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования были получены средние величины продуктивности надземной фитомассы в чистых посевах сидератов и их бинарных смесях, урожайности зерновых культур и физических свойств почв в пахотном и подпахотном горизонтах (табл. 1).

Как следует из табл. 1, максимальная продуктивность была достигнута в смешанных агроценозах. Особенно высокой продуктивностью отличались агросообщества подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха

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

Сидерат	Продуктивность, г сухого вещества/м ² *	Урожайность зерновых, ц/га**	Снижение объемной массы, г/см ³		Коэффициент структурности		Степень агрегатности	
			1	2	%		1	2
					1	2		
Соя	410	32.7	0.06	0.03	93.1	91.8	84.7	85.6
Подсолнечник	720	32.3	0.04	0.02	95.5	93.9	84.7	85.3
Гречиха сорта Крылатая	520	32.8	0.06	0.03	92.4	91.2	82.2	78.3
Гречиха сорта Деметра	570	32.0	0.07	0.02	93.1	91.7	85.8	81.3
Гречиха сорта Крылатая + гречиха сорта Деметра	538	31.8	0.08	0.04	92.8	91.7	84.5	80.2
Соя + гречиха сорта Крылатая	540	32.7	0.06	0.03	93.1	91.2	84.8	83.0
Соя + гречиха сорта Деметра	710	33.3	0.09	0.05	94.5	93.0	87.1	85.0
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	890	33.8	0.08	0.06	95.6	94.1	85.6	83.6
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	905	34.3	0.09	0.06	96.0	94.5	87.9	85.1

Примечание. В графе 1 – Апах, 2 – А подпах. То же в табл. 3–5.

* $HCP_{05} = 67$ г сухого вещества/м².

** $HCP_{05} = 1.2$ ц/га.

сорта Деметра. Среди чистых посевов максимальная продуктивность отмечена в вариантах с подсолнечником. Продуктивность чистых посевов этой культуры была значительно больше продуктивности сортосмеси гречихи и смеси сои с гречихой сорта Крылатая, примерно соответствовала продуктивности смеси соя + гречиха сорта Деметра, но при этом значительно уступала вариантам, в которых подсолнечник произрастал в смеси с одним из сортов гречихи.

Максимальная урожайность зерновых культур также была отмечена в вариантах с агрообобществами подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра. Наиболее высокая урожайность в вариантах с чистыми посевами сидератов была достигнута в варианте с гречихой сорта Крылатая. Однако урожайность зерновых в этом варианте опыта незначительно превосходила соответствующие величины в вариантах с чистыми посевами и существенно не отличалась от аналогичных показателей вариантов, где в качестве сидератов использовали бинарные смеси.

За период проведения опыта объемная масса пахотного горизонта уменьшилась под всеми вариантами. Под чистыми посевами этот показатель снизился на 0.04–0.07 г/см³, под смешанными – на 0.06–0.09 г/см³. Снижение объемной массы пахотного горизонта под смешанными агрообобществами, за исключением варианта соя + гречиха сорта Крылатая превосходило уменьшение плотности этого горизонта в вариантах с чистыми посевами и составляло 0.08–0.09 г/см³.

В рамках сходных тенденций происходило изменение плотности подпахотного горизонта. Его объемная масса под чистыми посевами уменьшилась на 0.02–0.03 г/см³, под смешанными агрообобществами – на 0.03–0.06 г/см³. Так же как для пахотного горизонта, величина снижения объемной массы подпахотного горизонта под всеми смешанными агрообобществами, за исключением варианта соя + гречиха сорта Крылатая, превосходила уменьшение плотности этого горизонта под всеми вариантами чистых посевов и составляло 0.04–0.06 г/см³.

Из рассмотренных данных следует, что использование в качестве сидератов смешанных агрообобществ по сравнению с чистыми посевами культур приводило к более выраженной тенденции к снижению объемной массы пахотного и подпахотного горизонтов. Это было связано с преимущественным положительным влиянием агроценотического эффекта на плотность черноземов в рассмотренных агрообобществах.

Наиболее высокие величины коэффициента структурности в пахотном горизонте, равные 95.6 и 96.0%, были отмечены под агрообобществами гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и гречиха сорта Деметра + подсолнечник. Эти величины не существенно превышали показатель коэффициента структурности в пахотном горизонте в вариантах под чистыми посевами подсолнечника, равный 95.0%. Величины коэффициента структурности в пахотном горизонте в остальных вариантах опыта с чистыми и смешанными посевами были меньше и изменялись в пределах 92.4–94.5%.

Таблица 2. Агроценотический эффект в вариантах с сидеральными агросообществами и в посевах зерновых культур на почве этих вариантов

	Сидеральные агросообщества			Зерновые культуры		
	Ра	Рвс	АЭ	Уа	Увс	АЭ
Гречиха сорта Крылатая + гречиха сорта Деметра	538	545	–7	31.8	32.4	–0.6
Соя + гречиха сорта Крылатая	540	465	75	32.7	32.7	0.0
Соя + гречиха сорта Деметра	710	490	220	33.3	32.4	0.9
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	890	620	270	33.8	32.5	1.3
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	905	645	260	34.3]	32.1]	2.2

Примечание. Ра, Рвс, АЭ, Уа и Увс – соответственно продуктивность сидеральных агросообществ, продуктивность вариантов сравнения, агроценотический эффект, урожайность зерновых в вариантах, ранее занятых сидеральными агросообществами, урожайность зерновых в вариантах сравнения.

В подпахотном горизонте, так же как пахотном, наиболее высокими величинами коэффициента структурности 94.1 и 94.5% характеризовались агросообщества гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и гречиха сорта Деметра + подсолнечник. Незначительно меньше была величина коэффициента структурности в подпахотном горизонте под чистыми посевами подсолнечника, которая равнялась 93.9%. Величины коэффициента структурности в подпахотном горизонте в остальных вариантах опыта с чистыми и смешанными посевами были меньше и составляли 91.2–93.0%.

Величина коэффициента структурности как в пахотном, так и подпахотном горизонтах была наиболее высокой под бинарными смесями подсолнечника с разными сортами гречихи. Однако смешивание культур в меньшей степени приводило к улучшению структурного состояния черноземов. Например, в пахотном и подпахотном горизонтах под чистыми посевами подсолнечника коэффициент структурности был больше, чем в большинстве вариантов со смешанными посевами.

Наиболее высокими показателями степени агрегатности пахотного горизонта, равными 87.9 и 87.1%, характеризовались смешанные агросообщества гречиха сорта Деметра + подсолнечник и соя + гречиха сорта Деметра. В порядке уменьшения этого показателя следовали чистые посевы гречихи сорта Деметра и агросообщество гречиха сорта Крылатая + подсолнечник, степень агрегатности под которыми в пахотном горизонте была соответственно равной 85.8 и 85.6%. В пахотном горизонте в остальных вариантах с чистыми и смешанными посевами степень агрегатности составляла 82.2–84.8%. В подпахотном горизонте, в отличие от пахотного, максимальные величины степени агрегатности отмечали под чистыми посевами сои (85.6%) и подсолнечника (85.3%). Под агросообществами гречиха сорта Деметра + подсолнечник и соя + гречиха сорта Деметра степень агрегатности подпахотного горизонта была несущественно меньше и соответ-

ственно равнялась 85.1 и 85.0%. В остальных вариантах степень агрегатности подпахотного горизонта составляла 78.3–83.6%.

Для продуктивности сидеральных агросообществ и урожайности зерновых культур, выращенных на тех же делянках, на которых располагались сидеральные агросообщества, были рассчитаны агроценотические эффекты, как разность между величинами продуктивности сидеральных агросообществ (урожайности зерновых на этих делянках) и продуктивности этих агросообществ (урожайности зерновых культур) в вариантах сравнения. Варианты сравнения для продуктивности сидеральных агросообществ и урожайности зерновых культур рассчитывали по соответствующим показателям чистых посевов в соответствии с вышеприведенным методом построения вариантов сравнения (табл. 2). Для расчета агроценотических эффектов использовались данные табл. 1.

Под влиянием агроценотического эффекта продуктивность сидеральных агросообществ изменялась неодинаковым образом. Она значительно возрастала в агросообществах гречиха сорта Деметра + подсолнечник, гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и соя + гречиха сорта Деметра, менее заметно увеличивалась в смеси соя + гречиха сорта Крылатая, незначительно уменьшалась в сортосмеси гречихи. Примерно такие же тенденции прослеживали для воздействия фактора смешивания на урожайность зерновых культур.

Аналогичным образом были рассчитаны агроценотические эффекты для исследованных агрофизических свойств черноземов (табл. 3). Воздействие агроценотического эффекта обеспечило тенденцию к уменьшению объемной массы пахотного горизонта под большинством исследованных агросообществ. В наибольшей степени это было выражено в почве под агросообществами подсолнечник + гречиха сорта Крылатая и подсолнечник + гречиха сорта Деметра, плотность пахотного горизонта под которыми умень-

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

Вариант	Изменение объемной массы, г/см ³		Коэффициент структурности		Степень агрегатности	
			%			
	1	2	1	2	1	2
Гречиха сорта Крылатая + + гречиха сорта Деметра	0.01	0.01	-0.5	0.3	0.5	0.4
Соя + гречиха сорта Крылатая	0.00	-0.01	0.3	-0.3	1.3	1.0
Соя + гречиха сорта Деметра	0.02	0.02	1.4	1.3	1.8	1.5
Подсолнечник + гречиха сорта Крылатая	0.03	0.03	1.6	1.6	2.1	1.7
Подсолнечник + гречиха сорта Деметра	0.03	0.04	1.7	1.7	2.6	1.8

шилась на 0.03 г/см³. Влияние агроценотического эффекта на разрыхление пахотного горизонта под агроценозом соя + гречиха сорта Деметра было меньше и составило 0.02 г/см³. В пахотном горизонте под сортосмесью воздействие фактора смешивания привело к уменьшению объемной массы всего на 0.01 г/см³, а под агроценозом соя + гречиха сорта Крылатая этот фактор не оказывал никакого влияния на величину объемной массы.

Так же как в пахотном горизонте, влияние агроценотического эффекта приводило к тенденции к снижению объемной массы подпахотного горизонта в большинстве исследованных агроценозов. Изменение объемной массы подпахотного горизонта под агроценозами в основном происходило так же как в пахотном горизонте, с той лишь разницей, что подпахотный горизонт по сравнению с пахотным оказался более разрыхленным под агроценозом подсолнечник + гречиха сорта Деметра и более уплотненным под смесью соя + гречиха сорта Крылатая.

Наиболее существенное влияние фактор смешивания оказал на коэффициенты структурности пахотного горизонта под агроценозами гречиха сорта Деметра + подсолнечник, гречиха сорта Крылатая + подсолнечник и соя + гречиха сорта Деметра, что выразилось в увеличении этого показателя соответственно на 1.7, 1.6, и 1.4%. Значительно меньше увеличился коэффициент структурности под агроценозом соя + гречиха сорта Крылатая, а в пахотном горизонте под сортосмесью гречих влияние фактора смешивания привело к некоторому снижению этого показателя. В подпахотном горизонте изменение коэффициента структурности под влиянием фактора смешивания во многом было сходно с изменением этого показателя в пахотном горизонте. При этом коэффициент структурности в подпахотном горизонте в отличие от пахотного слоя незначительно увеличивался под сортосмесью гречих и

несущественно уменьшался под агроценозом соя + гречиха сорта Крылатая.

Наиболее заметное влияние фактор смешивания оказал на увеличение степени агрегатности как пахотного, так и подпахотного горизонта под агроценозами гречиха сорта Деметра + подсолнечник, гречиха сорта Крылатая + подсолнечник, соя + гречиха сорта Деметра. Увеличение степени агрегатности в обоих горизонтах было меньше под агроценозом соя + гречиха сорта Крылатая. Под сортосмесью гречих увеличение степени агрегатности как в пахотном, так и в подпахотном слое было наименее выраженным и незначительным.

Для оценки связи между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур и изменением агрофизических свойств почв, а также степени зависимости между агроценотическими эффектами этих показателей были рассчитаны коэффициенты корреляции. Как следует из табл. 4, продуктивность сидератов в опыте была достоверно связана с урожайностью последующих зерновых культур, т.к. величина коэффициента корреляции между этими показателями (0.75) была больше критической величины этого коэффициента на 5%-ном уровне значимости при 7-ми степенях свободы, равном 0.67. Продуктивность сидератов и последующая урожайность зерновых культур была достоверно связана с изменением объемной массы пахотного горизонта и величинами коэффициента структурности в обоих горизонтах. В остальных случаях продуктивность сидератов и урожайность зерновых культур не обнаруживала достоверных связей с агрофизическими свойствами почв.

Коэффициент корреляции между величинами агроценотических эффектов сидеральных агроценозов и урожайностей зерновых культур указывал на тесную связь между этими показателями (0.93) и был больше критической величины этого коэффициента на 5%-ном уровне значимости при 3-х степенях свободы, равном 0.88 (табл. 5).

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

Показатели урожая	Урожайность зерновых, ц/га	Снижение объемной массы, г/см ³		Коэффициент структурности		Степень агрегатности	
				%			
		1	2	1	2	1	2
Продуктивность сидератов, г сухого вещества/м ²	0.75	0.46	0.73	0.91	0.91	0.65	0.40
Урожайность зерновых, ц/га	–	0.52	0.82	0.68	0.67	0.55	0.44

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между агроценотическими эффектами продуктивности сидератов, урожайности зерновых культур и агрофизических свойств почв ($R_{\text{крит}} = 0.88$)

Показатели урожая	Урожайность зерновых, ц/га	Снижение объемной массы, г/см ³		Коэффициент структурности		Степень агрегатности	
				%			
		1	2	1	2	1	2
Продуктивность сидератов, г сухого вещества/м ²	0.93	0.86	0.78	1.00	0.88	0.95	0.99
Урожайность зерновых, ц/га	–	0.85	0.84	0.94	0.88	0.98	0.95

Величины агроценотических эффектов сидеральных агрообществ и урожайностей зерновых культур были достоверно связаны с соответствующими показателями коэффициента структурности и степени агрегатности и не образовывали значимых зависимостей с этими показателями как в пахотном, так и подпахотном горизонтах.

Из сопоставления величин коэффициентов корреляции (табл. 4, 5) следует, что зависимость урожайности зерновых культур от продуктивности сидератов и показателей агрофизических свойств почв, а также степень влияния продуктивности сидератов на величины агрофизических свойств была существенной, но менее выраженной по сравнению с более тесными связями между соответствующими агроценотическими эффектами. Возможно, в такой форме находит свое выражение более высокий потенциал средообразования смешанных посевов по отношению к чистым, что дает возможность не только повышать плодородие почв, но и поддерживать экологическое равновесие между компонентами агроэкосистемы благодаря наличию регуляторных механизмов обратной связи [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что смешивание посевов в сидеральных агрообществах в большинстве случаев приводило к возрастанию урожайности зерновых культур и улучшению всех рассматриваемых агрофизических свойств почв. Однако

влияние агроценотического эффекта в разных сидеральных агрообществах на урожайность последующей культуры и свойства почв проявлялось неодинаковым образом. Наиболее существенное позитивное влияние на агрофизические свойства как пахотного, так и подпахотного горизонтов, а также на увеличение урожайности зерновых культур оказал агроценотический эффект в бинарных смесях гречиха сорта Деметра + подсолнечник и гречиха сорта Крылатая + подсолнечник. В вариантах с агрообществами соя + гречиха сорта Крылатая и гречиха сорта Деметра + гречиха сорта Крылатая, напротив, отмечено незначительное улучшение этих показателей, а иногда и их ухудшение в обоих горизонтах. Расчет коэффициентов корреляции между продуктивностью сидератов, урожайностью зерновых культур и изменением агрофизических свойств почв показал, что продуктивность сидератов была достоверно связана с урожайностью зерновых культур, и оба эти показателя в половине случаев образовывали достоверные связи с агрофизическими свойствами почвы. Зависимость между агроценотическими эффектами исследованных показателей была более тесной по сравнению со связями между величинами этих показателей. Например, связь между продуктивностью сидеральных агрообществ и урожайностью зерновых культур, соответствующая коэффициенту корреляции 0.75, была менее выраженной по сравнению с зависимостью между агроценотическими эффектами этих показателей и характеризовалась коэффи-

циентом корреляции, равным 0.93. Возможно, это было связано с более высоким средообразующим потенциалом смешанных посевов по отношению к чистым, но это предположение нуждается в проведении дальнейших исследований по оценке агроценотического эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болотов А.Т.* Избранные труды. М.: Агропромиздат, 1988. 414 с.
2. *Березин А.М., Чупрова В.В., Волошин Е.И.* Влияние сидератов на плодородие чернозема выщелоченного и урожайность зерновых культур в условиях Красноярской лесостепи // *Агрохимия*. 1994. № 11. С. 16–24.
3. *Гребенников А.М.* Обеспеченность культур элементами минерального питания в смешанных посевах // *Агрохимия*. № 5. 2004. С. 26–35.
4. *Лошаков В.Г., Иванов Ю.Д., Николаев В.А.* Плодородие дерново-подзолистых почв и продуктивность зерновых севооборотов при длительном использовании пожнивной сидерации // *Изв. ТСХА*. 2004. № 3. С. 3–14.
5. *Гребенников А.М.* Влияние смешивания посевов на микробиологическую активность почв // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. Вып. 61. М., 2008. С. 75–82.
6. *Кузнецова О.Ю., Гребенников А.М.* Рекультивация земель и улучшение качества ее проектирования // *Землеустр., кадастр и мониторинг земель*. 2009. № 1. С. 42–45.
7. *Гребенников А.М.* Использование сидерации смешанными агросообществами для повышения плодородия типичных черноземов // *Плодородие*. 2011. № 2. С. 30–32.
8. *Гребенников А.М.* Фитосанитарный аспект повышения плодородия черноземов сидеральными смесями // *Земледелие*. 2011. № 3. С. 24–26.
9. *Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А.* Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. Вып. 83. М., 2016. С. 77–102.
10. *Гармашов В.М., Чевердин Ю.И., Белобров В.П., Гребенников А.М., Исаев В.А., Беспалов В.А.* Влияние способа основной обработки почв на агрофизические свойства миграционно-мицелярных агрочерноземов // *Вестн. Рос. сел.-хоз. науки*. 2017. № 3. С. 26–29.
11. *Гродзинский А.М., Миркин Б.М., Головкин Э.А., Туганав В.В.* Перспективы функциональной агрофитоценологии // *Методологические проблемы аллелопатии*. Киев: Наукова думка, 1989. С. 15–28.
12. *Гребенников А.М.* Влияние смешивания посевов на вынос элементов минерального питания надземной массой растений в сидеральных сообществах // *Агрохимия*. 2005. № 6. С. 26–35.
13. *Гребенников А.М.* Содержание подвижного фосфора и обменного калия в типичных черноземах ЦЧО под смешанными посевами // *Агрохимия*. 2009. № 5. С. 13–21.
14. *Гребенников А.М.* Методические аспекты оценки агроценотического эффекта в сидеральных агрообществах для воспроизводства плодородия типичных черноземов ЦЧЗ // *Землеустр.-во, кадастр и мониторинг земель*. 2010. № 9. С. 79–89.
15. *Петров А.М., Безлер Н.В., Калинин А.Т.* Зеленые удобрения и продуктивность // *Сах. свекла*. 2000. № 7. С. 14–15.
16. *Беседина М.Н.* Еще один положительный момент смешанных посевов // *Вопросы современного земледелия*. Ч. 3. Курск: Курск. ГСХА, 1997. С. 58–60.
17. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. Изд. 2-е. М.: Высш. шк., 1973. 399 с.
18. *Гребенников А.М.* Оценка взаимовлияния культур в смешанных посевах // *Агрохимия*. 2003. № 1. С. 68–73.

Influence of Buckwheat Sideral Agricultural Communities on the Agrophysical Properties of Soil Resources of the Chernozem Zone

A. M. Grebennikov^{a, #}

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

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

In the field experiment, the influence of binary sideral buckwheat mixtures on the bulk mass, structural coefficient and degree of aggregation of arable and sub-arable horizons of typical heavy loamy chernozem was studied. It is shown that mixing of crops in sideral agricultural communities in most cases led to an increase in the yield of subsequent grain crops and an improvement in the considered agrophysical properties. The most significant positive effect on the agrophysical properties of both arable and sub-arable horizons, as well as on the increase in the yield of grain crops, had an agrocenotic effect in binary mixtures of buckwheat of the Demeter + sunflower variety and buckwheat of the Winged + sunflower variety. In the variants in the soil under the agro-communities soy + buckwheat of the Winged variety and buckwheat of the Demeter + buckwheat of the Winged variety, on the contrary, there was a slight improvement in these indicators, and sometimes their deterioration in both horizons.

Key words: binary sideral mixtures, siderate productivity, grain yield, agrocenotic effect, agrophysical properties.

УДК 631.42:631.445.24:631.559:633.1:631.821.1:631.82

ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ИЗВЕСТИ И СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© 2023 г. Н. А. Кирпичников¹, С. П. Бижан^{1,*}

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

*E-mail: kzuek@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.12.2022 г.

После доработки 28.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

В длительном полевом опыте показано изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы и урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя при прямом действии разных доз извести и через 35 лет их последствий. Установлено, что высокая эффективность последствий извести с преимуществом большой дозы (23 т CaCO₃/га) обусловлена существенным повышением содержания подвижного алюминия в почве и уровня гидролитической кислотности на фоне применения минеральных удобрений, особенно одних азотно-калийных удобрений в форме аммиачной селитры и хлористого калия.

Ключевые слова: озимая пшеница, яровой ячмень, урожайность, формы удобрений, известкование, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S0002188123040063, EDN: D1HOER

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производства зерна в нашей стране во многом зависит от плодородия почвы. В большей мере это относится к зоне Центрального Нечерноземья, где слабокультуренные почвы с повышенной кислотностью и слабой обеспеченностью основными элементами питания составляют ≈70%, что является одной из основных причин низкой (≈20–22 ц/га) урожайности зерновых культур [1].

В последние годы темпы известкования значительно сократились, а в некоторых регионах его не проводят совсем. В связи с этим дерново-подзолистые почвы по степени кислотности и другим свойствам существенно различаются [2]. В этих условиях важное значение имеют сведения об эффективности последствий извести в связи с изменением свойств почвы при систематическом применении удобрений. При этом необходимо учитывать не только основные физико-химические свойства почвы и ее гранулометрический состав, но и содержание подвижного алюминия, высокое содержание которого оказывает отрицательное влияние на растения [3–5]. Последнее

связано, как показали результаты исследований в длительных полевых опытах, с систематическим применением физиологически кислых азотно-калийных удобрений [6–8]. Применение фосфорных удобрений в данном случае ослабляет отрицательное влияние алюминия на растения, но полностью его не устраняет, как это происходит при известковании [9–11].

Однако действие и последствие извести при систематическом применении различных удобрений на урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя в связи с изменением агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы изучено недостаточно, тем более в интенсивных технологиях. Цель работы — изучение действия и последствий различных доз извести при систематическом применении удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы и их влияние на урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном полевом опыте СШ-27, заложенном в 1966 г. на дерно-

Таблица 1. Влияние извести и удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (среднее за 1982, 1983 гг.) после 3-й ротации

Вариант	рН _{KCl}	<i>H</i> _г	<i>S</i>	P ₂ O ₅	K ₂ O	Al
		ммоль/100 г почвы		мг/кг почвы		
Без удобрений	4.2	4.7	7.2	45	115	43.0
NK	4.2	5.0	7.2	43	118	47.2
NK + P	4.2	4.9	7.3	103	116	45.4
NK + известь 11.5 т/га	5.4	2.8	12.5	50	120	18.0
НPK + известь 11.5 т/га	5.5	2.6	12.7	113	119	17.5
NK + известь 23 т/га	6.4	0.8	15.0	52	118	2.0
НPK + известь 23 т/га	6.4	0.7	15.3	107	117	1.8
НСП ₀₅	0.39	1.0	1.2	11	13	17.0

во-подзолистой тяжелосуглинистой почве Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии (Московская обл., Шибанцевский участок). Исходная почва была слабокультуренной: рН_{KCl} 3.9–4.2, гидролитическая кислотность (по Каппену) – 4.9–5.2 ммоль/100 г, сумма поглощенных оснований (по Каппену–Гильковицу) – 7.5–8.2 ммоль/100 г, степень насыщенности основаниями – 57–63%, содержание гумуса (по Тюрину) – 1.5%, содержание подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) – 30–70 и 112–115 мг/кг соответственно, подвижного алюминия (по Соколову) – 40 мг/кг.

Известкование проводили в течение первых 3-х ротаций 5-польного севооборота в сумме 1.5 *H*_г (11.5 т CaCO₃/га) и 3.0 *H*_г (23 т CaCO₃/га). В качестве известкового удобрения использовали известняковую муку (95% CaCO₃).

Минеральные удобрения применяли в форме N_{аа} (34.4% N), P_{сд} (42% P₂O₅), АФ (12% N, 52% P₂O₅) и K_x (60% K₂O). Азотные удобрения под озимую пшеницу вносили дробно: осенью до посева – 30, в фазе кущения – 30, в фазе трубкования – 60 кг N/га. Фосфорные и калийные удобрения вносили под культивацию перед посевом. Повторность опыта трехкратная, площадь делянки 100 м². Анализы образцов почвы проводили согласно ГОСТам. В качестве общего фона вносили гербициды, фунгициды и ретарданты. Агротехника – принятая в Московской обл. Уборку урожая проводили комбайном “Сампо” поделаночно с 28 м². При статистической обработке результатов исследования использовали дисперсионный анализ.

В период изучения прямого действия извести использовали сорт озимой пшеницы Мироновская 808, ярового ячменя Московский 121, в пе-

риод последействия – соответственно сорта Московская 56 и НУР.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Периодическое известкование и внесение минеральных удобрений в течение первых 3-х ротаций полевого 5-польного севооборота оказало существенное влияние на улучшение агрохимических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (табл. 1).

Физико-химические свойства почвы зависели от примененных доз извести. При внесении извести в сумме 11.5 т/га реакция почвенной среды (рН_{KCl}) повысилась на 1.2 ед. и стала слабокислой. Особенно значительное действие на этот показатель оказало известкование в дозе 23 т/га, почва при этом перешла из группы сильнокислых в группу близко-нейтральных. В большей степени при известковании изменялась гидролитическая кислотность почвы. При внесении большой дозы извести (23 т/га) она снизилась в 6 раз по сравнению с вариантом контроля. Существенно увеличивалась сумма поглощенных оснований, степень насыщенности основаниями при этом повысилась с 60 до 94%. Значительное влияние известкование оказало на содержание подвижного алюминия в почве. Даже небольшая доза извести (11.5 т/га), внесенная за 3 первых ротации, снизила этот показатель в 2.4 раза, а высокая (23 т/га) – в 22 раза по сравнению с контролем и исходным содержанием. Через 35 лет после известкования произошло ухудшение физико-химических свойств дерново-подзолистой почвы (табл. 2). В варианте с применением извести 11.5 т/га величина рН_{KCl} снизилась с 5.4 до 4.7, т.е. почва перешла из группы слабокислых в группу среднекислых, а с применением извести в количестве 23 т/га – из группы близко-нейтральных в

Таблица 2. Последействие извести при систематическом внесении удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (среднее за 2016, 2017 гг.)

Вариант	рН _{KCl}	<i>H</i> _г	<i>S</i>	P ₂ O ₅	K ₂ O	Al
		ммоль/100 г почвы		мг/кг почвы		
Без удобрений	4.0	5.3	6.8	30	105	46
NK	3.8	6.7	6.7	28	171	130
NK + P	4.0	6.4	6.8	102	142	103
NK + известь 11.5 т/га	4.7	5.0	7.7	31	135	35
НPK + известь 11.5 т/га	4.8	4.0	7.8	105	128	32
NK + известь 23 т/га	5.3	3.6	9.4	32	125	14
НPK + известь 23 т/га	5.5	3.5	9.6	105	119	10
<i>HCP</i> ₀₅	0.3	1.1	0.9	12	15	19

группу слабокислых. Почти в 2 раза повышалась гидролитическая кислотность в варианте с применением большой дозы извести. Сумма поглощенных оснований снижалась на 4.8 и 5.6 ммоль/100 г соответственно, что связано с вымыванием кальция осадками, а также выносом его растениями [9, 11].

Следует отметить и тот факт, что несмотря на продолжительное (35 лет) последействие извести, физико-химические свойства известкованной почвы отличались от почвы неизвесткованной. Особенно различались эти варианты показателями гидролитической кислотности и содержания подвижного алюминия. При известковании большой дозой гидролитическая кислотность была меньше почти в 2 раза, чем в варианте NK, содержание подвижного алюминия – в 9 раз. Существенное влияние на эти показатели оказало известкование даже небольшой дозой.

Некоторые изменения физико-химических свойств почвы происходили и при применении минеральных удобрений. При систематическом применении физиологически кислых азотно-калийных удобрений содержание подвижного алюминия в почве повышалось по сравнению с контролем без удобрений в последние годы в 3 раза, достоверно увеличивалась также и гидролитическая кислотность почвы. Применение фосфорных удобрений в форме простого и двойного суперфосфата (≈ 50 кг P₂O₅/га ежегодно) приводило к достоверному снижению содержания подвижного алюминия в почве на фоне применения азотно-калийных удобрений. Наблюдали тенденцию к снижению и гидролитической кислотности.

В связи с изменением агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы под влиянием извести и удобрений изменялась и урожайность сельскохозяйственных культур. Эффективность из-

весткования во времени также различалась. Самая низкая урожайность формировалась в варианте контроля (табл. 3). Известкование, особенно высокой дозой, оказало существенное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. При прямом действии извести, внесенной за первые 3 ротации в количестве 11.5 т/га, урожайность озимой пшеницы на фоне азотно-калийных удобрений повышалась на 23, при последействии – на 62%. На фоне применения полного удобрения (НPK) эффективность известкования снижалась, прибавка составила 5 и 33% соответственно. При прямом действии преимущество высокой дозы (23 т/га) было небольшим, как на фоне азотно-калийных удобрений, так и на фоне полного удобрения. В то время как при последействии эффект от применения высокой дозы извести существенно повышался на обоих фонах удобрения. Значительное повышение эффективности известкования в период последействия, особенно высокой дозы, на фоне азотно-калийных удобрений было обусловлено существенным (в 3 раза) увеличением содержания подвижного алюминия в почве при систематическом внесении аммиачной селитры и хлористого калия. При этом существенно (на 28%) происходило повышение и гидролитической кислотности, хотя реакция почвенной среды практически не изменялась по сравнению с исходным уровнем и вариантом контроля.

При систематическом внесении фосфорных удобрений, напротив, эффективность известкования снижалась, как при прямом действии извести, так и при последействии. Связано это, по мнению некоторых исследователей [7, 12], с образованием труднорастворимых форм алюмофосфатов, а также снижением поступления алюминия в растения под влиянием фосфора. При внесении

Таблица 3. Урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя в зависимости от прямого действия и последействия извести при систематическом применении минеральных удобрений

Вариант	Известкование			
	прямое действие, 1985–1988 гг.		последействие, 2018–2021 гг.	
	урожайность, ц/га	прибавка, %	урожайность, ц/га	прибавка, %
Озимая пшеница*				
Без удобрений	27.9	–	20.1	–
NK	35.5	–	21.0	–
NK + P	46.7	–	36.8	–
NK + известь 11.5 т/га	43.6	23.0	34.1	62
NPK + известь 11.5 т/га	49.1	5.0	47.8	33
NK + известь 23 т/га	45.2	27.1	46.7	122
NPK + известь 23 т/га	50.6	8.3	60.4	64
HCP ₀₅	2.2	–	2.7	–
Яровой ячмень**				
Без удобрений	16.2	–	19.6	–
NK	22.6	–	18.9	–
NK + P	37.9	–	33.2	–
NK + известь 11.5 т/га	35.0	5.5	30.4	60
NPK + известь 11.5 т/га	39.8	5.4	45.7	38
NK + известь 23 т/га	37.1	6.4	40.7	99
NPK + известь 23 т/га	39.9	5.3	52.1	57
HCP ₀₅	2.0	–	2.8	–

* Внесение минеральных удобрений – ежегодно N120P60K90.

** Внесение минеральных удобрений – ежегодно N90P60K90.

фосфорных удобрений в нашем многолетнем опыте, содержание подвижного алюминия в почве в последние годы снизилось со 130 на фоне NK до 103 мг/кг на фоне NPK, или на 26%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В длительном полевом опыте на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве установлено, что известкование за 15 лет в дозах 11.5 и 23.0 т СаСО₃/га оказывало существенное влияние на физико-химические свойства не только при прямом действии, но и при последействии (в течение 35 лет). При последействии извести в зависимости от дозы на фоне NK снижалось содержание подвижного алюминия в почве в 3.5 и 9 раз, а гидролитическая кислотность – в 1.3 и 2 раза соответственно. В меньшей степени она влияла на фоне полного удобрения (NPK). За период последействия почва, произвесткованная в дозе 23.0 т СаСО₃/га перешла из группы близко нейтральных в группу слабокислых, уменьшилась сумма поглощенных оснований с 15.0 до 9.4 ммоль/100 г почвы. Эти показатели в варианте контроля во

времени практически не изменялись – реакция почвенной среды оставалась сильнокислой при содержании суммы оснований 6.8–7.0 ммоль/100 г. Отмечена высокая эффективность последействия извести, особенно большой дозы в посевах зерновых культур, при этом урожайность повышалась в 2.5–3.0 раза по сравнению с контролем и достигала: озимой пшеницы сорта Московская 56 – 60 ц/га, ярового ячменя сорта НУР – ≈50 ц/га в среднем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев В.Г., Шафран С.А. Прогноз плодородия почв Нечерноземной зоны в зависимости от уровня применения удобрений // Плодородие. 2019. № 2. С. 22–25.
2. Шафран С.А. Ассортимент минеральных удобрений и экономическая эффективность их применения. М.: ООО Изд-во “Листер”, 2020. С. 4–98.
3. Авдонин Н.С. Известкование кислых почв. М.: Колос, 1976. С. 70–190.
4. Стрельников В.Н., Ерохина Е.Н. Эффективность известкования в длительном полевом опыте // Известкование и применение минеральных удобрений

- ний в интенсивных системах земледелия. Горки, 1985. С. 32–36.
5. Foy C.D. Effects of aluminium on plant growth // The plant root and its environment. Virginia, 1974. 601 p.
 6. Гомонова Н.Ф. Влияние 30-летнего применения минеральных удобрений на урожай сельскохозяйственных культур и агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы // Химия в сел. хозяйстве. 1984. № 1. С. 8–11.
 7. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Теоретические основы известкования почв. СПб.: ЛНИИСХ, 2005. С. 90–118.
 8. Сычев В.Г., Кирпичников Н.А. Эффективность известкования в связи с агрохимическими свойствами дерново-подзолистых суглинистых почв Центрального Нечерноземья. М.: ВНИИА, 2016. 103 с.
 9. Кирпичников Н.А. Влияние извести на фосфатный режим слабокультуренной дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2016. № 12. С. 3–8.
 10. Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. С. 105–300.
 11. Кузьмич М.А., Капранов В.Н., Орлова Т.Г. Влияние удобрений и реакции почвенной среды на урожай и качество зерна ярового ячменя селекции Московского НИСХ (Немчиновка) // Плодородие. 2017. № 3. С. 1–3.
 12. Климашевский Э.Л., Маркова Ю.Н., Лебедева И.К. Взаимодействие алюминия и фосфора на поверхности корней и в клеточных стенках // Докл. ВАСХНИЛ. 1979. № 3. С. 6–7.

Effect of Lime Aftereffect and Systematic Application of Fertilizers on Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and Grain Yield

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

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

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

A long-term field experiment shows a change in the agrochemical properties of sod-podzolic heavy loamy soil and the yield of winter wheat and spring barley under the direct action of different doses of lime and after 35 years of their aftereffect. It was found that the high efficiency of lime aftereffect with the advantage of a large dose (23 t CaCO₃/ha) is due to a significant increase in the content of mobile aluminum in the soil and the level of hydrolytic acidity against the background of the use of mineral fertilizers, especially some nitrogen-potassium fertilizers in the form of ammonium nitrate and potassium chloride.

Key words: winter wheat, spring barley, yield, forms of fertilizers, liming, sod-podzolic soil.

УДК 631.82:631.421.1(571.11)

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ОПЫТЕ КУРГАНСКОГО НИИСХ¹

© 2023 г. О. В. Волюнкина

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия

E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 30.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Изучено действие азотно-фосфорного удобрения за 5 ротаций 4-польного зернопропашного севооборота в стационарном опыте Курганского НИИСХ. Испытано разное распределение азота между культурами севооборота. При внесении всей севооборотной дозы азота в первое поле удобрение оказывало последствие на урожайность следующих 3-х культур. Аналогично при разделении дозы азота на 1-е и 3-е поля, отмечали повышение урожайности культур во 2-м и 4-м посевах. Различное распределение азота между культурами севооборота дало в условиях опыта близкие эффекты с проявлением преимущества применения азота в севообороте через год. Следующие 27 лет на этих фонах удобрения не вносили и учитывали в посевах бессменной пшеницы последствие удобрения, примененного в суммарных за 21 год дозах N1050–1575P840. При 1-й дозе азота удобрение оказывало существенное последствие 5 лет, при 2-й – 9, но и позднее. В годы с достаточным увлажнением наблюдали прирост урожайности от последствия азотно-фосфорного удобрения.

Ключевые слова: выщелоченный чернозем, действие, последствие, азотно-фосфорное удобрение, дозы азота, распределение азота между культурами севооборота.

DOI: 10.31857/S0002188123040154, EDN: DJQCDK

ВВЕДЕНИЕ

При определении состава и доз удобрения под каждую сельскохозяйственную культуру рекомендуется обращать внимание на ее потребности в питании. Далее следует учитывать почвенно-климатические характеристики зоны, в которой выращивают культуры. Например, в Курганской обл. с переходом от северной лесостепи к центральной и южной степи оптимальные дозы удобрений постепенно снижаются по мере ухудшения условий увлажнения. Оптимумы для удобрений надежно устанавливаются в полевых опытах, проводимых в разных агроклиматических зонах. В Курганском НИИСХ накоплены 40–50-летние дан-

ные 3-х опытных полей – Шадринского, Центрального и Макушинского.

Состав и дозы минеральных удобрений для конкретного поля определяются на основании знания истории предшествующей агротехники в целом и в частности – прежней удобренности культур [1–3]. Учет прошлой системы удобрения для отдельного урочища осуществляется по книге истории поля. В определенной мере ориентиром для подбора удобрений служит анализ наличия подвижных питательных веществ в почве, что более надежно для фосфора. Предвидеть длительность последствия удобрений возможно по выявленным в специальных опытах закономерностям, вскрывающим срок последствия их различных доз [4–6]. Для фосфора в одном из опытов Курганского НИИСХ в 4-польном зернопаровом севообороте показано, что новые порции аммофоса следует вносить, если среднегодовое количество фосфора от суммы насыщения поля фосфорным удобрением становится меньше P10–15. В этом опыте длительность последствия 3-х созданных фонов фосфора P240–360–720 на фоне N40–60 (азот вносили в 3-м и 4-м по-

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002 “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”.

лях) в 2-х закладках была равной 27–34 посева для первой из доз, 34–39 – для 2-й дозы и 44–45 посевов – для 3-й дозы [7]. Исключая паровые поля, вышеназванных количеств фосфора хватило на 20–25, 25–29, 33–34 посева соответственно. Длительность последствия фосфора зависит не только от дозы внесенного удобрения, но и от уровней урожайности культур, использующих остаточные количества питательных веществ. Например, в опыте В.В. Лапа и соавторов на супесчанной дерново-подзолистой почве при продуктивности 37–55 ц к.е./га последствие от 10-летнего применения P40 длилось всего 4 года [8]. В Курганском опыте с запасным внесением фосфора средняя урожайность была в 3 раза меньше.

Азотное удобрение более подвижно по профилю почвы. В обсуждаемом в статье опыте проведен анализ содержания нитратов в 3-метровом слое почвы. В 1990 г. на фоне средних в севообороте доз азота N50–75 на фоне P40 при ежегодном внесении большая часть нитратов находилась в слое 1–2 м почвы. Через 5 лет в 1995 г. нитраты опустились на глубину 2–3 м [9]. За каждый из 5-ти лет в период вегетации выпадало 225, 165, 244, 271, 288 мм осадков соответственно. В дальнейшем частично нитраты могут подниматься с восходящим током воды в верхние горизонты. Одним из путей сокращения потерь азота в нижние горизонты почвы является совместное применение азота и фосфора. Наблюдениями 2015 г. в посеве бессменной пшеницы установлено, что опускание нитратов ниже корнеобитаемого слоя почвы заметно больше было на фонах применения одного азота по сравнению с внесением азотно-фосфорного удобрения [10]. Цель работы – определение длительности последствия минеральных удобрений в опыте Курганского НИИСХ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Стационарный эксперимент, в котором изучали действие и последствие азотно-фосфорного удобрения, размещен на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ. Заложен опыт в 1971 г. заведующим отделом агрохимии В.И. Волынкиным, который вел исследования по 2007 г. Помощниками в разные периоды были Г.М. Колташева, Ю.Я. Емельянов и О.В. Волынкина (с 1993 г. по настоящее время). В течение 7-ми ротаций в 1971–1999 гг. изучение состава удобрения и доз азота вели в зернопропашном севообороте: кукуруза–пшеница–пшеница–овес. Культуры выращивали при ежегодной вспашке. В конце этого периода в земледельческой практике Курганской и других областей произошли изменения – со-

кращение посевов кормовых культур и объемов проведения вспашки. Учитывая появление в сельскохозяйственном производстве новых технологий, в 2000 г. севооборот в опыте заменен бессменной пшеницей после стерни. Почва на участке под опытом – выщелоченный чернозем маломощный малогумусный среднесуглинистый с содержанием гумуса в слое 0–20 см 4.5% и подвижных соединений (мг/кг): P₂O₅ по Чирикову – 40 (низкое), K₂O – 250–350 (высокое). За 52 года проведения опыта показатель рН_{KCl} изменился с исходной величины 6.0–6.2 до 5.15 в контроле и до 5.0 при внесении N60P20.

Схемой опыта были предусмотрены варианты разного распределения азота между культурами севооборота. Три приема внесения азота в севообороте были следующими: 1 – применение всей севооборотной дозы N200 и N300 на фосфорном фоне P40 под кукурузу; 2 – разделение дозы азота на 2 года с внесением N120 под кукурузу и через год N80 под 2-ю пшеницу после кукурузы для N200, а для N300 – на N180 и N120; 3 – применение удобрения все 4 года с усилением питания пропашной культуры: при N200 – N140 + N20 × 3, N300 – N240 + N20 × 3. Равномерным ежегодным внесением азота предусмотрено внесение N80 под кукурузу и N40 под зерновые (в среднем в севообороте – N50) при суммарной дозе N200, при дозе N300 – N120 под кукурузу и N60 – под зерновые (в среднем N75).

Для бессменной пшеницы дозы азота составили N20–40–60P20. В первой части опыта сравнение действия удобрения при разном распределении азота на фоне P40 в севообороте вели в течение 21 года (1971–1991 гг.). При систематическом применении P40 содержание подвижного P₂O₅ в слое почвы 0–20 см повысилось до 100–120 мг/кг. Затем 27 лет на 6-ти вышеназванных фонах удобрения не вносили и учитывали последствие азотно-фосфорного удобрения. Через 15 лет, к 2006 г. содержание подвижного фосфора снизилось до 56–75 мг/кг, через 27 лет к 2018 г. оно опустилось до 52 мг/кг при исходной величине во время закладки опыта 38–40 мг/кг.

Применяли аммиачную селитру, двойной суперфосфат в дозе P40 в 1-й период опыта, аммофос P20 – во 2-й период. Способ внесения – весеннее локальное врезание дисковой сеялкой СЗ-3.6 до посева на глубину 4–5 см. Общая площадь делянки 270 м² (6 × 45 м), учетная 90 м² (2 × 45 м). Повторность трехкратная. Учет урожая пшеницы – напрямую комбайном “Сампо-500” с отбором образца для определения влажности и чистоты бункерной массы зерна. Погодные условия пери-

Таблица 1. Действие удобрения, внесенного равномерно ежегодно и последствие их запасного внесения на урожайность следующих культур севооборота, ц к.е./га

Вариант	Годы								Среднее
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	
	ячмень	пшеница	пшеница	овес	кукуруза	пшеница	пшеница	овес	
Контроль без удобрений	22.1	29.0	19.0	18.5	14.2	19.4	25.4	24.2	21.5
N200									
N50P40 в 4 года	31.8	42.5	25.0	19.7	19.8	25.5	27.7	30.2	27.8
Д*Р + N в 1 год	32.2	38.0	30.2	26.0	19.2	29.0	30.4	24.6	29.7
Р + N в 2 года	34.7	37.3	30.4	21.0	23.2	28.6	29.8	28.6	29.2
Р + N в 4 года	33.8	40.2	23.1	20.5	23.4	27.1	30.2	30.3	28.6
N300									
N75P40 в 4 года	34.3	46.4	25.5	20.0	18.5	23.0	28.9	33.6	28.8
Д*Р + N в 1 год	32.4	40.0	23.1	20.0	25.2	30.7	32.7	32.1	29.5
Р + N в 2 года	33.1	40.0	30.4	21.5	23.3	27.0	30.4	39.5	30.6
Р + N в 4 года	33.5	38.9	25.7	20.9	20.9	29.4	32.0	29.3	28.8
НСП ₀₅ , ц/га	2.7	4.1	1.9	2.1	1.7	3.2	3.5	2.9	

*Д – действие удобрений.

ода вегетации в годы севооборота были более благоприятными, чем в период выращивания бес-
сменной пшеницы после стерни. Если в 1-й части
опыта было 4 засушливых года, то во 2-й – 6 лет,
а в 2016 г. отмечено сильное поражение пшеницы
стеблевой ржавчиной.

Цель работы – выявление силы и длительности
последствия азотно-фосфорного удобрения
в условиях стационарного опыта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уже в годы испытания вышеназванных прие-
мов внесения азота на фоне фосфора обнаружи-
лось последствие удобрения, внесенного в
один год под кукурузу, на урожайность следую-
щих 3-х культур. Также проявлялось последей-
ствие удобрения, примененного через год в 1-м и
3-м полях, на урожайность культур во 2-м и 4-м
посевах. Более высокими прибавками выдели-
лось внесение азота через год, особенно при дозе
N300. Закономерности проявления последей-
ствия удобрений показаны в табл. 1 на примере
данных за 2 первых ротации. Приведена урожай-
ность культур в кормовых единицах (к.е.) на фо-
нах изученных приемов в сравнении с ежегодным
равномерным применением азота.

Результаты учета урожайности культур в усло-
виях опыта свидетельствовали о близкой эффек-
тивности азотно-фосфорного удобрения при раз-
ных приемах распределения азота в севообороте.

В части лет последствие оказывало даже более
сильное влияние в сравнении с ежегодным рав-
номерным применением азота. Отставание в не-
которые годы во влиянии ежегодно вносимого
перед посевом удобрения на глубину 5 см было
связано с засушливостью периода вегетации, осо-
бенно в ее начале, что ограничивало его действие.
Так было в сухие 1973 и 1974–1976 гг., когда при
засушливом мае за 2 декады июня выпадало всего
17–31 мм осадков. В то время как ранее приме-
ненный азот за счет предыдущих осадков содей-
ствовал обогащению нитратами верхних слоев
почвы. Подсчет среднего сбора кормовых единиц
в каждом поле севооборота за 5 ротаций севообо-
рота также показал близкий эффект исследован-
ных приемов удобрения культур (табл. 2).

Заметнее сбор кормовых единиц возрастал при
способе распределения севооборотной дозы N300
через год, что было очевидным (рис. 1), когда
проанализировали сумму прибавок за 21 год в за-
висимости от 3-х необычных приемов распреде-
ления 2-х доз азота на фоне фосфора.

В последующие 27 лет на этих делянках удоб-
рения не вносили и учитывали последствие
фосфора и азота в посевах бессменной пшеницы
после стерни. В этот период прием внесения азота
через год выделился еще более значимо с преиму-
ществом в сумме прибавок перед применением
всей севооборотной дозы под 1-ю культуру – куку-
рузу (51 ц к.е./га при дозе N200 и 53 ц к.е./га – при
дозе N300) (рис. 2).

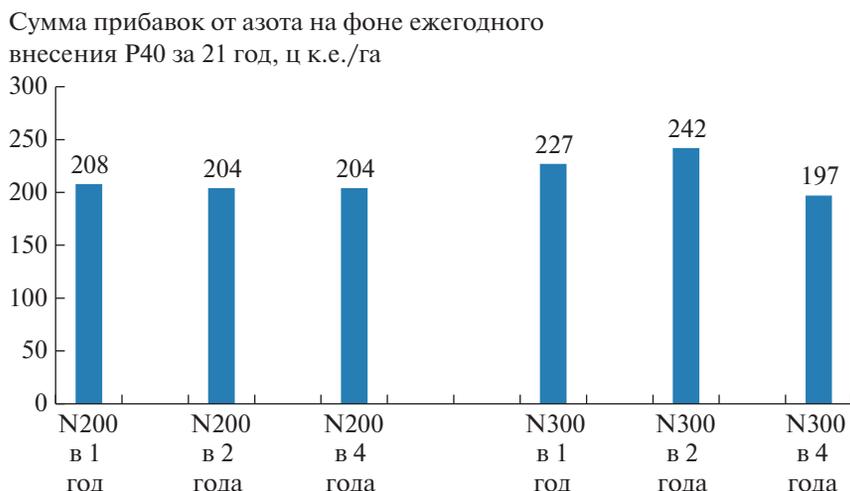


Рис. 1. Сумма прибавок за 21 год от действия азотно-фосфорного удобрения при разном распределении азота между культурами севооборота, ц к.е./га.

В течение первых 5-ти лет (1992–1996 гг.) прибавки урожайности пшеницы от последствия достигали 5–9 ц к.е./га. С 1997 г. прибавки еще отмечали, но по величине они уже уступали действию ежегодно вносимого азотно-фосфорного удобрения. В сухом 1998 г. на изученных фонах урожайность зерна была на уровне контроля, а в 1999 г. прибавка урожайности была, но в 3 раза меньше, чем от ежегодно примененного удобрения.

Также наличие прибавки урожайности бесменной пшеницы зависело от условий увлажнения периода вегетации. Например, в 2000 г. эффект от действия продолженного равномерного внесения удобрения и от последствия был очень близким. Несмотря на хорошее увлажнение периода вегетации 2001 г., последствие удобрения давало прибавки меньше наименьшей

существенной разницы, тогда как действие удобрений повышало урожайность пшеницы на 12–19 ц зерна/га. Как в действии, так и в последствии выигрывал вариант с внесением азота через год, особенно при дозе N300. Суммарная прибавка от действия и последствия в этом варианте за 48 лет составила 291 ц к.е./га при N200 и 342 ц к.е./га на фоне N300. Учитывая суммы д.в. удобрений за 21 год N1050P840 (1890 кг/га) и N1575P840 (2415 кг/га) окупаемость одного килограмма д.в. удобрений с учетом их последствия была на высоком уровне – 15.4 и 14.2 кг/кг.

С 2019 г. из 6-ти вариантов учета последствия азота и фосфора было оставлено два – с внесением N200–300 через год (на фоне других приемов разместили новые варианты). Разнообразии прибавок от последствия удобрения,

Таблица 2. Действие азотно-фосфорного удобрения при разном распределении азота между культурами севооборота на урожайность культур (1971–1991 гг.), ц к.е./га

Доза азота на севооборот на фоне P160 (P40 × 4)	Кукуруза	Пшеница	Пшеница	Овес	Среднее в контроле или прибавки
Контроль	34.6	23.6	18.0	25.3	25.4
N200 равномерно	51.5	31.0	23.0	29.6	8.4
N200 в 1 год	57.2	31.9	23.7	28.5	9.9
N200 в 2 года	55.8	30.8	24.5	29.2	9.7
N200 в 4 года	36.0	31.7	23.1	29.5	9.7
N300 равномерно	54.0	31.5	23.8	30.6	9.6
N300 в 1 год	58.5	33.0	23.0	30.1	10.8
N300 в 2 года	58.1	32.1	25.1	32.3	11.5
N300 в 4 года	54.2	32.3	23.6	28.9	9.4
HCP ₀₅ , ц/га	7.1–8.3	2.7–3.9	1.8–2.3	3.1–4.7	



Рис. 2. Сумма прибавок урожайности зерна бессменной пшеницы за 27 лет (1992–2018 гг.) от последствия азота и фосфора при разном распределении азота между культурами севооборота (1971–1991 гг.), ц к.е./га.

примененного через год, показано в табл. 3–5. При дозе N200 последствие удобрения длилось 5 лет, на фоне N300 – 9 лет (в отсутствии прибавок в засухливом 1998 г.) (табл. 3).

В 2011–2022 гг. последствие заметно ослабло. Прибавки урожая бессменной пшеницы в этих вариантах зависели от условий увлажнения вегетационного периода. Значительно больше они оказались в благоприятных 2011, 2014 и 2022 гг. Не всегда высокие, но существенные прибавки чаще относились к более высокой дозе азота. В это время от действия ежегодного удобрения прирост урожайности пшеницы был намного больше (табл. 4, 5).

Проявление последствия минеральных удобрений свидетельствовало об обязательном ведении книги истории полей. В настоящее время это удобно осуществлять с помощью компьютера. Распределение новых порций удобрений между полями хозяйства на основании истории их прежней удобренности позволяет направить удобрения на те урочища, где выше потребность в улучшении питания.

Схема опыта была направлена на проверку возможных потерь азота при запасном его внесении, т.к. нитраты весьма подвижны по профилю почвы. Отчетливо показано, что экономия на процессе внесения удобрений с применением всей севооборотной дозы в один год вела к поте-

Таблица 3. Прирост урожайности культур севооборота и бессменной пшеницы от действия и последствия азотно-фосфорного удобрения, ц к.е./га

Вариант	Годы							
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
	пшеница	пшеница	овес	кукуруза	пшеница	пшеница	бессменная пшеница	
Урожайность в контроле и ее прибавки в вариантах								
Контроль	14.7	19.8	21.4	37.0	16.0	20.4	9.5	9.9
Д*N50–40P40–20 ежегодно	4.6	11.3	3.4	17.0	10.0	5.3	2.9	10.4
Д N75–60P40–20 ежегодно	6.6	9.9	–0.9	18.0	11.9	7.1	5.1	12.5
П*PN200 через год	9.2	6.1	5.4	15.0	5.5	1.4	–0.1	2.9
ПPN300 через год	8.6	4.9	5.2	16.0	9.3	1.5	0.1	3.8
HCP ₀₅ , ц/га	3.4	4.1	2.1	11.0	4.0	3.1	2.2	2.9

*Д – действие, П – последствие удобрений. То же в табл. 4, 5.

Таблица 4. Прирост урожайности бессменной пшеницы от действия и последействия азотно-фосфорного удобрения, ц зерна/га

Вариант	Годы										
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Урожайность в контроле и ее прибавки											
Контроль	9.1	8.8	8.6	9.9	10.5	11.6	14.8	8.6	5.2	11.9	7.5
N40P20 ежегодно	3.3	12.7	11.7	9.0	-0.6	2.3	5.9	5.0	1.1	5.6	4.8
N60P20 ежегодно	1.5	19.2	16.7	10.0	2.3	2.8	5.8	6.7	1.1	6.3	4.8
П*PN200 через год	1.0	1.2	2.9	0.6	0.9	3.0	1.1	2.8	-0.5	3.0	1.8
ПPN300 через год	3.6	3.1	5.8	1.2	0.6	0.5	0.8	0.6	-0.2	0.0	0.5
HCP ₀₅ , ц/га	2.4	4.1	2.7	2.2	2.5	1.5	2.2	2.8	1.4	2.0	2.7

Таблица 5. Прирост урожайности зерна бессменной пшеницы от действия (2-я и 3-я строки) и последействия азотно-фосфорного удобрения, ц/га

Вариант	Годы											
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Урожайность в контроле и ее прибавки в вариантах												
Контроль	18.3	4.8	9.8	8.9	7.9	10.2	16.8	8.4	8.0	8.6	2.2	21.3
N40P20 ежегодно	12.3	2.0	4.8	7.3	2.1	5.5	9.4	4.2	5.5	3.6	1.1	10.9
N60P20 ежегодно	12.3	2.1	4.8	1.1	2.4	3.8	13.7	5.7	8.3	3.5	0.9	8.5
П*PN200 через год	5.0	1.7	1.3	1.8	0.8	1.6	2.1	1.8	2.6	2.6	0.6	3.0
П*PN300 через год	4.0	2.8	2.4	4.6	1.2	1.0	1.9	2.4	2.2	3.2	0.4	4.2
HCP ₀₅ , ц/га	3.2	1.2	2.1	1.7	1.0	1.4	2.7	2.0	1.9	1.9	0.6	3.2

рям азота. По меньшей сумме прибавок урожайности вполне очевидно, что внесение азота в один год сопровождалось потерями нитратов. Даже при ежегодном равномерном применении удобрения вымывание нитратов вниз по профилю почвы обнаружено при анализе почвенных проб на глубину 3 м в 1990 и 1995 гг. Как уже упоминалось, если в 1990 г. бóльшая часть нитратов опустилась на глубину более 2-х м, то в 1995 г. – более 3-х м. Важным было определить уровень и длительность последействия азотно-фосфорного удобрения. Азот на фосфорном фоне в нашем опыте оказывал существенное последействие 5–9 лет в зависимости от величины дозы. Проявляемые в последние годы прибавки объясняются высоким суммарным количеством примененного фосфора в дозе P840. Однако один фосфор слабо действовал в севооборотах без пара, следовательно, и азотное питание на фонах последействия было улучшенным. Это могло происходить либо за счет подтягивания нитратов с восходящим током воды, либо за счет получения большей массы растительных остатков от повышенных урожаев в годы действия и последействия, их разложения и улучшения условий азотного питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Действие азотно-фосфорного удобрения при испытании разного распределения азота между культурами 4-польного зернопропашного севооборота оказалось близким. При внесении всей севооборотной дозы азота в первое поле удобрение оказывало последействие на урожайность 3-х следующих культур. Аналогично при разделении дозы азота на 1-й и 3-й посеvy отмечено повышение урожайности культур во 2-м и 4-м полях. Проявилось преимущество применения азота в севообороте через год. В последующие 27 лет на этих фонах зафиксировано последействие удобрения с проявлением преимущества приема внесения азота через год. От суммарных доз удобрения N1050–1575P840 при 1-й дозе азота последействие было существенным 5 лет, при 2-й дозе – 9 лет (с перерывом в засушливый год). В течение первых 5 лет (1992–1996 гг.) прибавки урожайности бессменной пшеницы от последействия достигали 5–9 ц к.е./га. Далее их уровень постепенно снижался.

Но и позднее, в годы с достаточным увлажнением отмечали прибавки урожайности пшеницы

от последствия азотно-фосфорного удобрения. Эффект зависел от условий увлажнения посевов в период вегетации. Длительность последствия была наибольшей в варианте применения более высокой из испытанных доз азота на фоне фосфора и делении дозы на 2 года. Наблюдаемое в опыте последствие азотно-фосфорного удобрения свидетельствовало о необходимости фиксировать в книге истории полей фактически применяемую систему удобрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кук Д.У. Системы удобрения для получения максимальных урожаев. Пер. с англ. М.: Колос, 1975. 416 с.
2. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Азот в агроecosистеме на черноземных почвах. Регулирование в современных условиях. М.: РАН, 2018. 180 с.
3. Волынкин В.И., Волынкина О.В. Развитие исследований по вопросам агрохимии на опытных полях Курганского НИИСХ за последние 50 лет // Современные проблемы земледелия Зауралья и пути их научно обоснованного решения. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 40-летию Курганского НИИСХ и 100-летию Шадринского опытного поля (24–25 июля 2014 г.). Куртамыш: ООО «Куртамышская типография», 2014. С. 142–165.
4. Макшакова О.В. Последствие длительного применения органических и минеральных удобрений на урожайность и качество озимой ржи: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук, 2014. 22 с.
5. Шаповалова Н.Н., Годунова Е.И. Последствие 30-летнего применения минеральных удобрений на продуктивность чернозема обыкновенного Центрального Предкавказья // Плодородие. 2019. № 1 (106). С. 11–14.
6. Волынкин В.И., Южаков А.И. Последствие азотных удобрений в Зауралье // Вопросы земледелия и животноводства в Курганской области. Сб. научн. работ. Вып. № 3. Курган, 1971. С. 169–176.
7. Волынкин В.И., Волынкина О.В., Кириллова Е.В. Пути управления системой удобрения зерновых культур в зернопаровом севообороте // Эконом. сел.-хоз. и перерабат. предприятий. 2019. № 7. С. 61–66.
8. Лана В.В., Иваненко Н.Н., Грачева А.А. Длительность последствия остаточных количеств фосфорных и калийных удобрений // Почвовед. и агрохим. 2014. № 1 (52). С. 136–149.
9. Волынкин В.И., Волынкина О.В. Влияние азотного удобрения в зернопропашном севообороте и при бессменном выращивании пшеницы на урожай сельскохозяйственных культур, качество зерна и плодородие почвы // Агрохимия 2007. № 8. С. 23–27.
10. Волынкина О.В., Копылов А.Н. Миграция питательных веществ удобрений по профилю почвы // Современные проблемы агрохимии в условиях поиска устойчивого функционирования агропромышленного комплекса при техногенных ситуациях. Мат-лы 50-й Международ. научн. конф. молодых ученых, специалистов-агрохимиков и экологов, посвящ. 75-летию организации Географической сети опытов с удобрениями (ВНИИА) / Под ред. В.Г. Сычева. 2016. С. 59–62.

Duration of the Aftereffect of Mineral Fertilizers in the Experience of the Kurgan Research Institute

O. V. Volynkina

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

E-mail: kniish@ketovo.zaoral.ru

The effect of nitrogen-phosphorus fertilizer for 5 rotations of a 4-field grain crop rotation in the stationary experiment of the Kurgan Research Institute was studied. Different nitrogen distribution between crop rotation crops was tested. When the entire crop rotation dose of nitrogen was applied to the first field, the fertilizer had an aftereffect on the yield of the next 3 crops. Similarly, when dividing the nitrogen dose into the 1st and 3rd fields, an increase in crop yields was noted in the 2nd and 4th crops. The different distribution of nitrogen between crop rotation crops gave similar effects under experimental conditions with the manifestation of the advantage of using nitrogen in crop rotation in a year. For the next 27 years, fertilizers were not applied on these backgrounds and the aftereffect of fertilizer applied in total doses of N 1050–1575 P 840 for 21 years was taken into account in permanent wheat crops. At the 1st dose of nitrogen, the fertilizer had a significant aftereffect for 5 years, at the 2nd – 9, but also later. In years with sufficient moisture, an increase in yield was observed from the aftereffect of nitrogen-phosphorus fertilizer.

Key words: leached chernozem, action, aftereffect, nitrogen-phosphorus fertilizer, nitrogen doses, nitrogen distribution between crops of crop rotation.

УДК 631.811.982:581.1:633.11

ВЛИЯНИЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ (*Triticum aestivum* L.) ОРГАНИЧЕСКИМИ КИСЛОТАМИ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В РАЗРЕЖЕННОЙ СРЕДЕ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

© 2023 г. Н. В. Верховцева^{1,*}, Е. Н. Кубарев², Г. Р. Балашов¹, А. Э. Роберт¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

²Учебно-опытный почвенно-экологический центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
141592 д. Чашиково, Московская обл., Солнечногорский р-н, Россия

*E-mail: verh48@list.ru

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.

После доработки 27.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Изучено влияние предпосевной обработки семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) янтарной и салициловой кислотами в концентрации 10^{-5} М и 10^{-3} М с использованием и без использования вакуумного инфильтратора. Полученные результаты показали положительное влияние обработки семян в условиях разреженного давления (0.9 атм, 15 мин) на развитие coleoptily и корня проростка на 7-е сут проращивания. На 3-и сут (при определении энергии прорастания) воздействие разреженной среды не выявило значимого влияния. В стрессовых условиях развития растений при гипертермии установлено, что обработка семян салициловой кислотой в концентрации 10^{-3} М в условиях разреженной среды обеспечивала наилучший результат по снижению стрессовой нагрузки за счет подавления каталазной активности. Янтарная кислота в концентрации 10^{-5} М показала себя как наилучший вариант в качестве усилителя роста. Совместно с использованием разреженной среды такая обработка наиболее значимо ускоряла развитие coleoptily и корня проростка на 7-е сут проращивания.

Ключевые слова: вакуумная инфильтрация, предпосевная обработка семян, регуляторы роста, янтарная кислота, салициловая кислота

DOI: 10.31857/S0002188123040142, EDN: DJOINX

ВВЕДЕНИЕ

Урожайность зерновых культур во многом зависит от качества посевного материала, поэтому оптимизируя регуляторами роста стартовые условия путем предпосевной обработки семян зерновых культур, можно достичь улучшения посевных качеств и урожайности. Важно развивать такие направления в поиске новых технологий предпосевной обработки семян, как выявление наиболее эффективных и экологически безопасных веществ-регуляторов, способов и условий обработки. Изучение данного направления также является актуальным для управления продуктивностью и устойчивостью растений, обоснования энергосберегающих технологий без применения дорогостоящих химикатов. Применение разреженной среды в сочетании с органическими кислотами природного происхождения (образующиеся в растениях в результате естественных физио-

логических процессов) является одним из малоизученных и перспективных направлений предпосевной обработки семян зерновых культур.

В научных исследованиях изучены биостимулирующая и адаптогенная функции предпосевной обработки семян янтарной и салициловой кислотами. Янтарная кислота активирует дыхание прорастающих зерновок, гидролиз запасных веществ, что может приводить к увеличению активности гидролитических ферментов. Также янтарная кислота может влиять на процесс фотосинтеза. Ее активная форма – сукцинил-S-КоА и гликокол являются непосредственными предшественниками хлорофилла *a* (протопорфирина). Соответственно, экзогенное поступление янтарной кислоты способствуют биосинтезу хлорофилла и цитохромов. Салициловая кислота в ряде исследований рассматривается как эндогенный

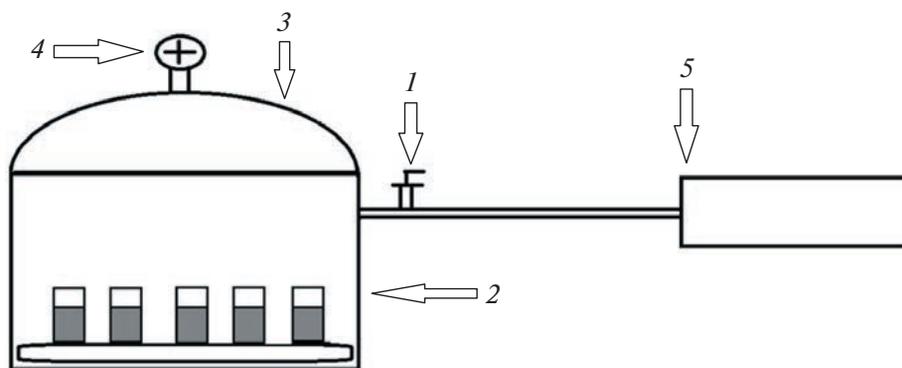


Рис. 1. Схематическое изображение вакуумного инфильтратора: 1 – кран, 2 – эксикатор (внутри расположены мерные стаканчики с раствором), 3 – крышка эксикатора, 4 – вакуумметр, 5 – вакуумный насос.

многофункциональный биорегулятор, который принимает участие в “клеточном сигналинге”, ростовых процессах, формировании адаптивных реакций растений [2–20].

Однако противоречивые результаты исследований привели к спорам о влиянии обработки семян этими кислотами природного происхождения на рост и развитие растений. Неправильное применение, пренебрежение физиологическими особенностями растений, передозировка кислотами могут не только не дать положительного эффекта, но и вызвать прямо противоположные, отрицательные изменения в организме [3].

Цель работы – исследование влияния и возможности применения в предпосевной обработке семян органических кислот природного происхождения на примере янтарной и салициловой кислот в различных концентрациях на первых этапах роста и развития яровой пшеницы, в том числе в условиях разреженной среды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были начаты в Учебно-опытном почвенно-экологическом центре МГУ им. М.В. Ломоносова “Чашниково” и продолжены на базе кафедры агрохимии и биохимии растений факультета почвоведения МГУ.

Объектом исследования стали семена яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Радмира. Для предпосевной обработки применяли растворы янтарной (ЯК) и салициловой кислот (СК) в качестве регуляторов роста в концентрациях 10^{-3} и 10^{-5} М, а также дистиллированную воду (контроль). Опыты проводили без применения и с применением вакуумного инфильтратора (на основе вакуумного насоса DVPLC.4, производства Vacuum Technology Srl, Италия) (рис. 1) с разрежением ~ 0.9 атм, выбранным как оптимальное,

исходя из анализа изученной научной литературы и патентов [11, 12, 14]. Время экспозиции составило 15 мин. Таким образом, получили 10 вариантов лабораторного опыта (табл. 1).

В ходе лабораторных опытов использован ГОСТ 12038-84 [17] для определения прорастания семян на 3-и сут проращивания (энергии прорастания), на 7-е сут (всхожести) и морфометрический метод (для определения ростовых характеристик проростка и длины главного корня).

Кроме лабораторных были проведены вегетационные опыты, в которых семена пшеницы, подверженные обработкам по представленной схеме, высевали в сосуды по 15 шт. Вегетационные сосуды (объемом 1 л) заполняли дерново-подзолистой почвой, доведенной до оптимальной влажности (0.6–0.7 ПВ). Выращивание растений осуществляли в течение 16 сут. Далее биомассу растений в вариантах опыта взвешивали и затем использовали для биохимических анализов определения активности каталазы перманганатометрическим методом Баха [1] и определения устойчивости растений к гипертермии методом Мацкова [11].

Полученные массивы данных были обработаны с помощью методов математической статистики в программе STATISTICA 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения энергии прорастания семян и всхожести было в целом проанализировано 4000 семян пшеницы (4 повторности по 100 семян в повторности и 10 вариантов опыта). Морфометрические показатели проростков семян пшеницы позволили оценить влияние предпосевной обработки семян на ростовые характеристики про-

Таблица 1. Варианты лабораторного опыта

Вариант	Концентрация, М	Применение вакуумного инфильтратора	Условное обозначение
1. Контроль (H ₂ O)	–	Без применения	Контроль без вакуума (б/в)
2. СК	10 ⁻³		
3. СК	10 ⁻⁵		
4. ЯК	10 ⁻³		
5. ЯК	10 ⁻⁵		
6. Контроль (H ₂ O)	–	С применением	Контроль с вакуумом (с/в)
7. СК	10 ⁻³		
8. СК	10 ⁻⁵		
9. ЯК	10 ⁻³		
10. ЯК	10 ⁻⁵		

Примечание. СК – салициловая, ЯК – янтарная кислота. То же в табл. 2 и на рис. 5, 6.

Таблица 2. Ростовые показатели проростков пшеницы в процессе проращивания семян при обработке органическими кислотами и использовании вакуумной инфильтрации (средние и доверительный интервал)

Вариант	Доверительный интервал	Среднее	Доверительный интервал	Среднее	Доверительный интервал	Среднее
	мм					
	Колеоптиль, 3-и сут		Колеоптиль, 7-е сут		Корень, 7-е сут	
1. Контроль без вакуума (б/в)	12.3–14.3	13.3	24.6–36.3	30.47	19.7–27.1	23.4
2. СК 10 ⁻³ (б/в)	9.1–11.0	10.1	16.2–36.8	26.54	15.2–22.4	18.8
3. СК 10 ⁻⁵ (б/в)	13.2–14.4	13.8	28.7–34.6	31.67	24.7–27.1	25.9
4. ЯК 10 ⁻³ (б/в)	5.0–5.6	5.3	10.5–15.8	13.11	8.7–11.9	10.3
5. ЯК 10 ⁻⁵ (б/в)	14.1–16.5	15.3	30.9–39.0	34.91	25.4–30.3	27.8
6. Контроль с вакуумом (с/в)	4.5–5.2	4.9	17.0–43.5	30.27	11.9–39.2	25.6
7. СК 10 ⁻³ (с/в)	0.1–0.1	0.1	1.5–7.0	4.24	1.9–5.4	3.7
8. СК 10 ⁻⁵ (с/в)	5.7–6.3	6.0	22.9–45.8	34.37	21.7–42.1	31.9
9. ЯК 10 ⁻³ (с/в)	4.6–5.8	5.2	14.8–48.6	31.66	18.6–41.8	30.2
10. ЯК 10 ⁻⁵ (с/в)	6.0–7.1	6.6	30.0–62.7	46.30	42.1–67.4	54.7

ростков и длину главного корня в различных условиях опыта (табл. 2).

Анализ результатов длины колеоптиля на 3-и сутки проращивания семян пшеницы показал, что фактор предварительного выдерживания семян в разреженной среде (РС) оказал подавляющее влияние на этот процесс при сравнении контрольных вариантов по предварительной обра-

ботке семян с применением разрежения в среде и без такого воздействия. Использование для обработки семян органических кислот как СК, так и ЯК в концентрациях 10⁻⁵ М улучшало ситуацию по угнетающему действию разрежения. Лучшие показатели отмечены для янтарной кислоты как при предварительном выдерживании в РС, так и без такой обработки – относительно контроля

Таблица 3. Первичная таблица результатов дисперсионного анализа (3-и сут проращивания)

Эффект	Степени свободы <i>df</i>	Сумма квадратов <i>SS</i>	Средний квадрат <i>MS</i>	Критерий Фишера <i>F</i>	Величина <i>p</i> -value
Взаимодействие	1	14.2	14.2	502.86	0.00
Фактор 1 (разреженная среда)	1	1.05	1.05	37.15	0.00
Ошибка	38	1.07	0.02		
Общее	39	2.12			

произошло увеличение длины coleoptily на 35 и 15% соответственно.

На 7-е сутки наблюдений за развитием растений (определение всхожести) ситуация изменилась (табл. 2). Сравнение ростовых показателей контрольных семян, выдержанных в разреженной среде и не подвергнутых такой обработке, не отличались (определяющий фактор регулирования роста – наличие или отсутствие РС).

Влияние органических кислот сохранило ту же тенденцию, что и для 3-суточных проростков – положительный эффект, который для концентрации 10^{-5} М составил 15 и 53% соответственно для СК и ЯК после воздействия РС. Без обработки разрежением эффект от органических кислот был значительно меньше – 4 и 15% соответственно для СК и ЯК.

Такая же тенденция была показана при обработке данных длины корня на 7-е сутки проращивания. И в этом случае наибольший эффект был получен для ЯК в концентрации 10^{-5} М в разреженной среде – увеличение длины корня на 113% (табл. 2).

Для определения статистической значимости факторов обработки семян кислотами в разных концентрациях с применением и без применения фактора разрежения среды был использован дисперсионный анализ средних величин в повторностях. Данные были предварительно преобразованы в натуральные логарифмы. Анализировали фактор влияния обработки разными веществами, фактор применения вакуумной установки и совместное влияние 2-х факторов (рис. 3, 4).

Предварительно проводили проверку соответствия средних величин по грациям факторов нормальному распределению ($\alpha = 0.05$) с применением теста Колмогорова–Смирнова в модификации Лиллиефорса. Было показано, что во всех вариантах опыта, кроме анализа влияния регуляторов роста на 3-и сут, было соответствие распределения нормальному с заданным уровнем значимости. Также с помощью критериев Кохрана, Бартлетта и Хартли было подтверждено условие

равенства дисперсий в генеральных совокупностях.

Так как показатели ростовых характеристик семян, полученных на 3-и сут проращивания по грациям фактора “регуляторы роста”, не принадлежали нормальному распределению, был проведен однофакторный дисперсионный анализ только для фактора 1 – разреженная среда (табл. 3). По его результатам можно достоверно говорить о влиянии фактора 1 – наличие или отсутствие влияния разрежения среды.

Результаты измерения длины coleoptily на 3-и сут проращивания представлены на графике типа boxplot (диаграмма размаха) (рис. 2а). Результаты свидетельствовали о том, что влияние фактора разреженная среда было значимо для длины coleoptily.

Результаты измерений длины coleoptily и корня на 7-е сут проращивания резко отличались по своему характеру от результатов, полученных на 3-и сутки проращивания, а именно: варианты опыта с обработкой семян в установке для создания разрежения показали существенное увеличение длины coleoptily, что подтверждено уровнем значимости, который был получен при дисперсионном анализе (табл. 4, рис. 2б).

Низкие показатели роста при обработке семян СК в большой концентрации можно объяснить накоплением большого количества активных форм кислорода в результате ингибирования каталазы, способной к разложению пероксида водорода и нейтрализации таких реакционных состояний кислорода. Это согласуется с данными работ [4, 18], в которых показано ингибирование действия каталазы при высоких концентрациях экзогенной СК.

Неоднозначные результаты применения разрежения среды, связанные с негативным влиянием на энергию прорастания и существенным возростанием показателя роста coleoptily с 3-х по 7-е сут возможно было связано с состоянием “ростового покоя”, который следовал за первичным стрессом от разрежения среды. Показанное рез-

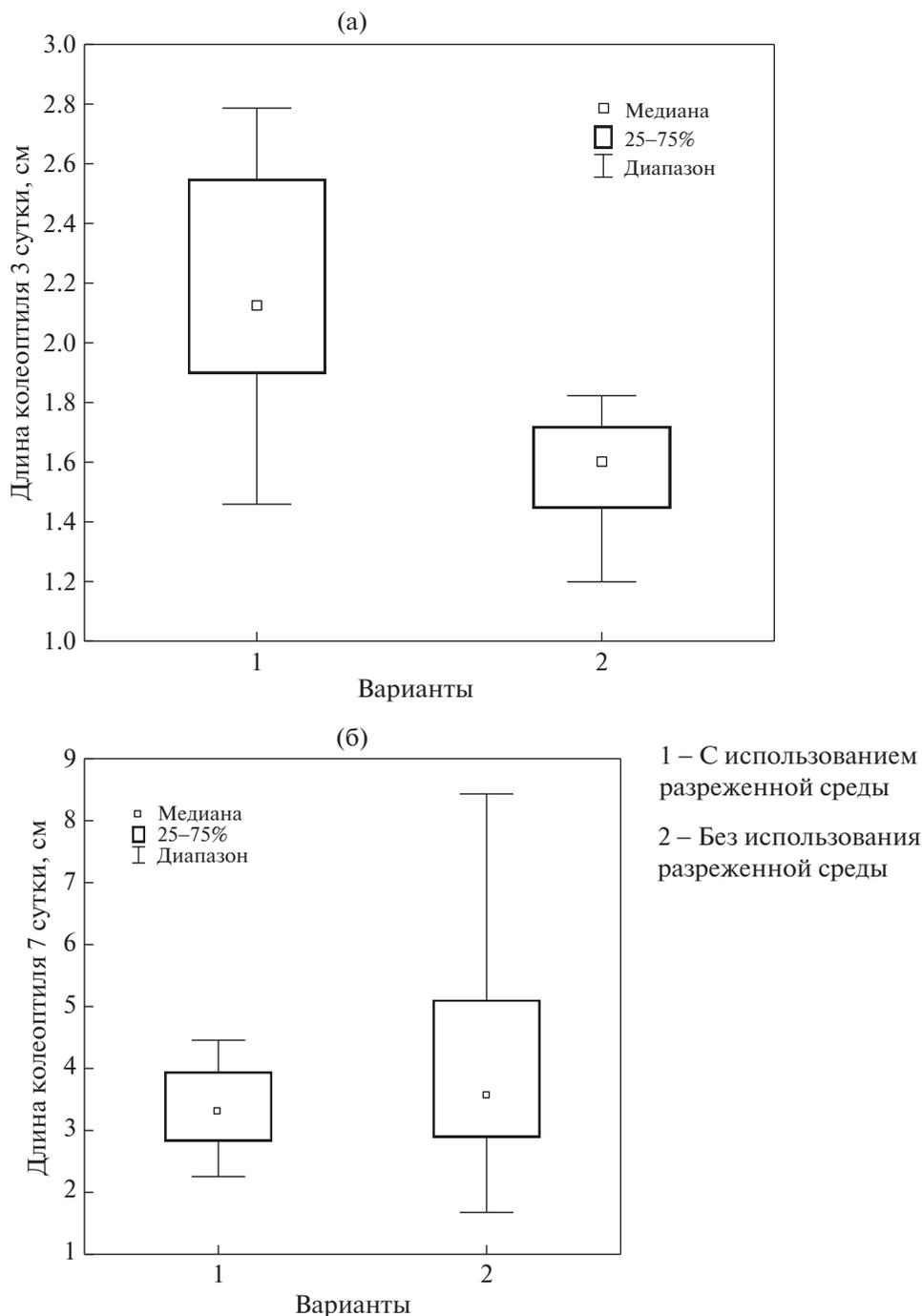


Рис. 2. Диаграмма размаха показателя длины coleoptilia на 3-и (а) и 7-е (б) сут проращивания (сравнение по фактору 1 – наличие разреженной среды).

кое увеличение роста свидетельствовало о положительном влиянии разреженной среды, ее синергизме с обработкой семян кислотами, что было выражено в достоверном совместном влиянии 2-х факторов на увеличение длины coleoptilia (табл. 4, рис. 3).

Есть вероятность, что замедление роста coleoptilia в начальный период онтогенеза зависит

от уровня разрежения среды и длительности вакуумной обработки, поэтому для уточнения эффекта обработки семян с применением разрежения необходимы дополнительные опыты с другими величинами разрежения и временем экспозиции в разреженной среде.

С целью лучшего понимания эффективности совместного воздействия усилителей роста с при-

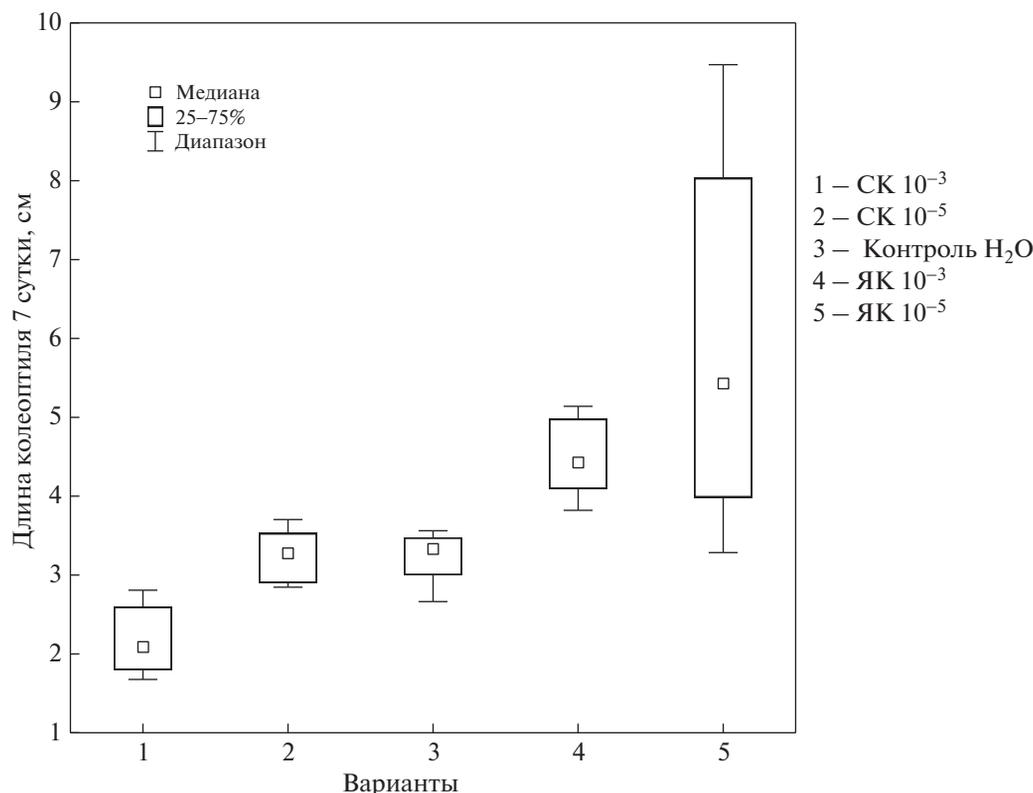


Рис. 3. Диаграмма размаха показателя длины coleoptили на 7-е сут проращивания (сравнение по фактору 2 – регуляторы роста, органические кислоты).

менением установки для разрежения среды, были проанализированы однородные группы данных для длины coleoptили на 7-е сут проращивания, полученные с помощью апостериорного критерия – наименьшей существенной разницы (*HCP*) Фишера (табл. 5).

Как можно видеть из результатов анализа, разрежение воздушной среды усиливало воздействие ЯК в двух концентрациях и СК в большей концентрации, в то время как в контроле и в варианте воздействия СК в концентрации 10^{-5} М с использованием и без использования разрежения полученные данные были почти одинаковыми.

СК в растениях часто рассматривается в качестве стрессового фитогормона. Согласно научным источникам [7, 18], увеличение содержания СК в тканях растения ведет к окислительному стрессу за счет ингибирования фермента каталазы, которая выполняет функцию разложения пероксида водорода на воду и кислород. Такое воздействие вызывает смещение баланса прооксидантов и антиоксидантов в сторону активизации стресс-протекторной системы растений: происходит увеличение активности ферментов, таких как аскорбатпероксидаза и глутатионредуктаза,

усиление экспрессии их генов [6]. Также существуют сведения что повышение содержания пероксида водорода в клетках растений индуцирует экспрессию генов, отвечающих за синтез непосредственно защитных белков [16]. Однако конкретные механизмы стресс-протекторных функций могут отличаться в растениях разных видов и в различных условиях [8].

Исходя из этого, в изученных проростках пшеницы было проведено определение активности каталазы перманганатметрическим методом Баха (рис. 5). По полученным результатам можно судить о наиболее сильном ингибировании фермента при обработке салициловой кислотой в концентрации 10^{-3} М как для семян, которые выдерживали в вакуумном инфильтаторе (на 40%), так и для не подвергнутых такой обработке (отмечено снижение каталазой активности в листьях растений примерно в 2 раза).

Для анализа связи окислительного стресса, вызванного пероксид-радикалами и резистентности тканей растений к экзогенным стрессорам, было выполнено определение устойчивости побегов яровой пшеницы, семена которой были обработаны аналогично предыдущим опытам, к ги-

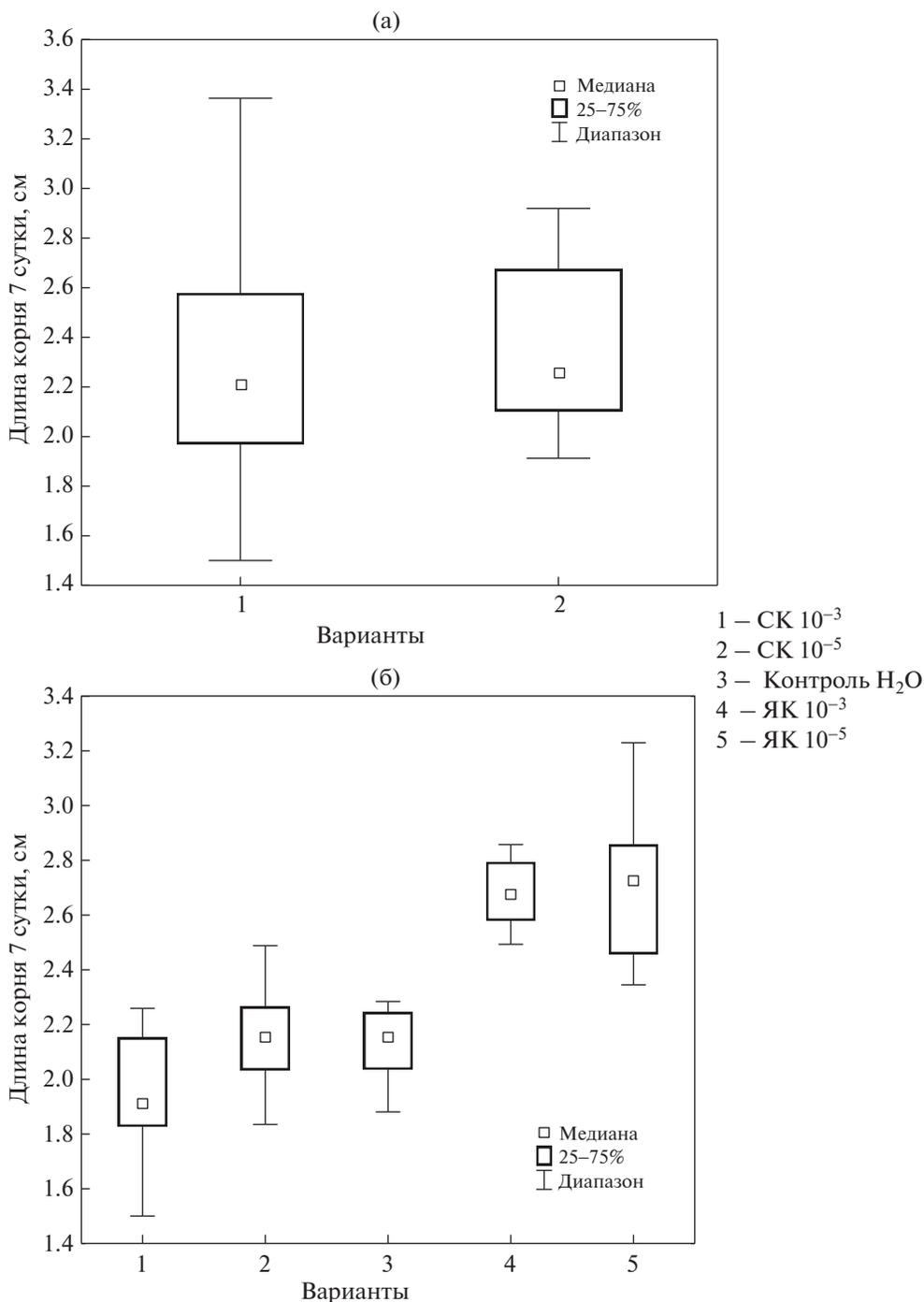


Рис. 4. Диаграмма размаха показателя длины корня на 7-е сут проращивания: (а) – сравнение по фактору 1 (наличие разреженной среды), (б) – сравнение по фактору 2 (регуляторы роста, органические кислоты).

пертермии, проведенное по методу Мацкова. В ходе исследования побеги подвергали воздействию температур от 40 до 80°C на водяной бане. Каждый вариант включал по 10 образцов, причем изначальная температура 40°C была выдержана на протяжении 30 мин. Далее при каждом подня-

тии температуры на 10°C из растений, находящихся в условиях термического стресса, удаляли по 2 образца в каждом варианте, а остальные подвергали воздействию новой температуры в течение 10 мин до следующей итерации. Образцы, изъятые при одной температуре, помещали на

Таблица 4. Таблица результатов 2-факторного дисперсионного анализа (длина coleoptily и корня, 7-е сут)

Эффект	Степени свободы <i>df</i>	Сумма квадратов <i>SS</i>	Средний квадрат <i>MS</i>	Критерий Фишера <i>F</i>	Величина <i>p</i> -value
Длина coleoptily					
Взаимодействие	1	63.7	63.7	5889.53	0.00
Фактор 1 (разреженная среда)	1	0.18	0.18	16.90	0.00
Фактор 2 (обработка регулятором роста)	4	4.21	1.05	97.43	0.00
Фактор 1 × Фактор 2	4	1.14	0.28	26.45	0.00
Ошибка	30	0.32	0.01		
Общее	39	5.86			
Длина корня					
Взаимодействие	1	27.6	27.6	2552.74	0.00
Фактор 1 (разреженная среда)	1	0.00	0.00	0.41	0.52
Фактор 2 (обработка регулятором роста)	4	0.7	0.18	17.00	0.00
Фактор 1 × Фактор 2	4	0.05	0.01	1.37	0.26
Ошибка	30	0.32	0.01		
Общее	39	1.13			

Таблица 5. Критерий *HSP* Фишера, однородные группы (длина coleoptily, 7-е сут проращивания)

Ошибка = 0.011, <i>df</i> = 30				Однородные группы					
Вариант	Фактор 1 (разреженная среда)	Фактор 2 (обработка регулятором роста)	Среднее	1	2	3	4	5	6
6	2	1	0.58			*			
1	1	1	0.93				*		
3	1	3	1.13	*					
2	1	2	1.14	*					
8	2	3	1.20	*					
7	2	2	1.20	*					
5	1	5	1.36		*				
4	1	4	1.40		*				
9	2	4	1.58					*	
10	2	5	2.06						*

пластиковый планшет и обрабатывали 0.2 н. HCl. Затем фиксировали уровень побурения растений во всех вариантах при каждой температуре и, исходя из этого, рассчитывали общий условный балл повреждения в соответствующем варианте (рис. 6).

Согласно полученным результатам, обработка семян СК в концентрации 10^{-3} М в условиях предварительного воздействия разреженной среды в вакуумном инфильтраторе показала самую низкую поврежденность листьев растений после их тепловой обработки, что может быть объясни-

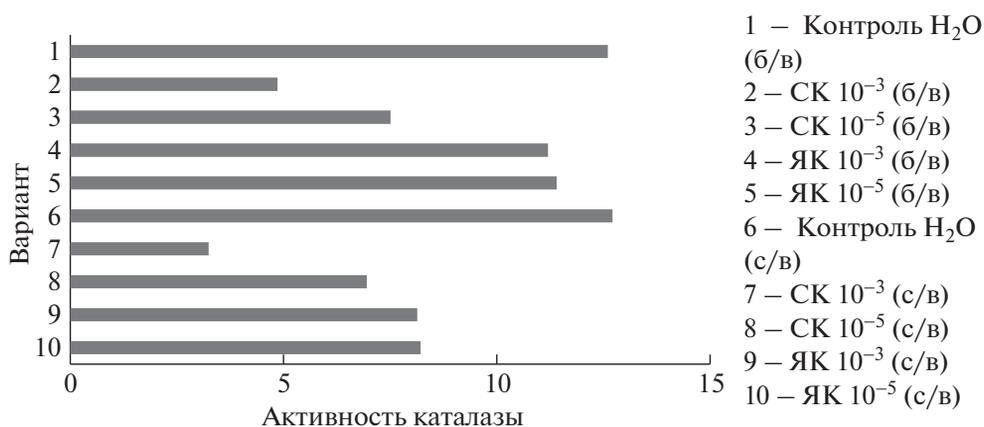


Рис. 5. Активность каталазы, мг H₂O₂/г растительной биомассы.

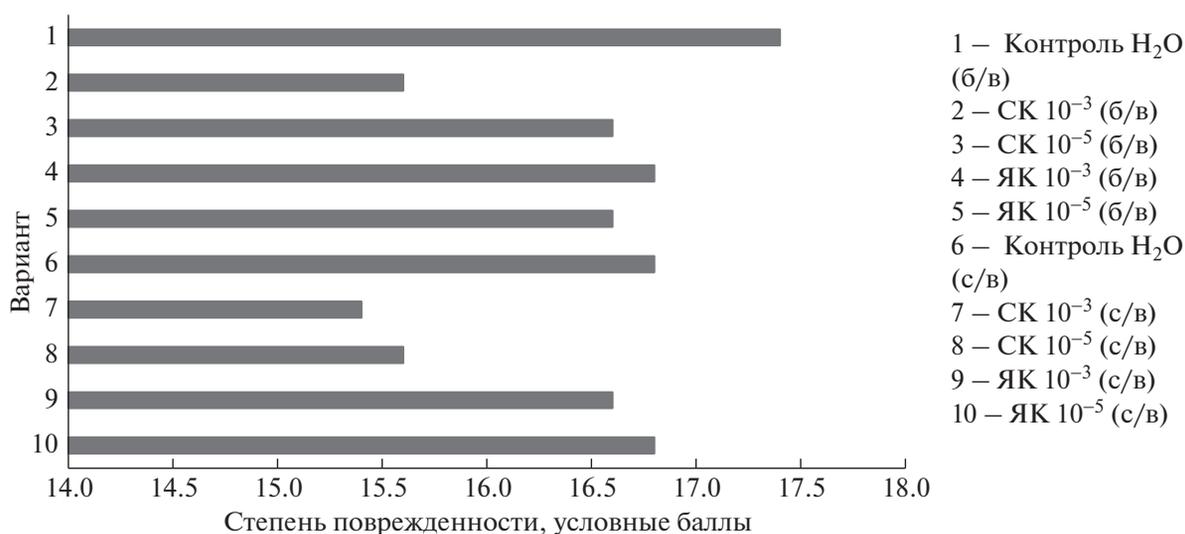


Рис. 6. Степень повреждения растений при гипертермии, условные баллы.

мо подавляющим влиянием СК на каталазную активность и повышением защитных функций кислоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в вакуумном инфильтраторе с разрежением ~0.9 атм, в течение 15 мин вызывала уменьшение энергии прорастания, т.е. было отмечено состояние “ростового покоя”, вызванного разрежением среды (РС). Использование для обработки семян органических кислот как салициловая (СК), так и янтарная кислота (ЯК) в концентрациях 10⁻⁵ М улучшало ситуацию при угнетающем воздействии РС. Лучшие показатели отмечены для ЯК

как при предварительном выдерживании в разреженной среде, так и без такой обработки (относительно контроля произошло увеличение длины coleoptила на 35 и 15% соответственно).

На всхожесть семян (7-е сутки прорастания) оказала существенное влияние обработка органическими кислотами. Наилучшие показатели имели варианты, обработанные СК и ЯК в концентрации 10⁻⁵ М без применения разреженной среды. Положительный эффект от обработки ЯК при концентрации 10⁻⁵ М в условиях РС составил 53 и 15% только с обработкой кислотой, т.е. фактор РС не имел существенного влияния по сравнению с воздействием самой ЯК.

Обработка семян СК в концентрации 10^{-3} М в условиях РС дала наилучший результат в условиях гипертермии – снижение повреждения листьев растений после теплового воздействия было на 40% без предварительного использования РС и на 50% при совместном действии РС и СК. Это подтверждено данными по определению активности каталазы, когда обработка СК в концентрации 10^{-3} М приводила к наиболее существенному ингибированию фермента, что повышало устойчивость проростков к стрессу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Величко А.К., Соловьев В.Б., Генгин М.Т. Методы лабораторного определения общей перекись-разрушающей активности ферментов растений // Изв. ПГПУ им. В.Г. Белинского. Естеств. науки. Биохимия. 2009. № 14 (18). С. 44–48.
2. Верещагин А.Л., Еремина В.В., Захарьева Ю.И., Хмелева А.Н., Кунец Л.Л. Биологическая активность сверхмалых концентраций ряда природных органических кислот – интермедиатов цикла Кребса // Изв. вузов. Прикл. химия и биотехнол. 2012. № 2 (3). С. 72–75.
3. Грабовская Н.И., Бабенко О.Н., Сафронова Н.М., Хусаинова Р.К. Особенности применения янтарной кислоты в качестве биостимулятора и адаптогена растений // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естеств. и техн. науки. 2020. № 1. С. 28–32.
4. Дмитриева С.А., Пономарева А.А., Минибаева Ф.В., Гордон Л.Х. АФК и протон-опосредованное действие салициловой кислоты на рост и ультраструктуру клеток корней пшеницы // Уч. запис. Казан. гос. ун-та. 2008. Т. 150. Кн. 3. Естеств. науки. С. 123–135.
5. Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В. Салициловая кислота и устойчивость растений к абиотическим стрессорам // Вестн. Харьков. нац. аграрн. ун-та. Сер. биол. 2009. Вып. 2 (17). С. 19–39.
6. Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В., Кабашикова Л.Ф. Антиоксидантная система растений: клеточная компартментация, защитные и сигнальные функции, механизмы регуляции (обзор) // Прикл. биохим. и микробиол. 2019. Т. 55. № 5. С. 419–440.
7. Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В., Ястреб Т.О., Мусатенко Л.И. Участие пероксидазы и супероксиддисмутазы в усилении генерации активных форм кислорода колеоптилями пшеницы при действии салициловой кислоты // Физиол. и биохим. культ. раст. Биология. 2010. Т. 42. № 3. С. 210–217.
8. Коц Г.П., Ястреб Т.О., Швиденко Н.В., Батова Е.Н., Мирошниченко Н.Н., Туренко В.П., Колупаев Ю.Е. Влияние экзогенных салициловой и янтарной кислот на устойчивость растений проса к абиотическим и биотическим стрессорам // Вестн. Харьков. нац. аграрн. ун-та им. В.В. Докучаева. Сер. биол. 2012. Вып. 1 (25). С. 32–38.
9. Колупаев Ю.Е., Ястреб Т.О. Стресс-протекторные эффекты салициловой кислоты и ее структурных аналогов // Физиол. и биохим. культур. раст. 2013. Т. 45. № 2. С. 113–126.
10. Мацков Ф.Ф. Распознавание живых, мертвых и поврежденных хлорофиллоносных тканей растений по реакции образования феофитина при оценке устойчивости к экстремальным воздействиям // Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды. Л.: Колос, 1976. С. 54–60.
11. Мирошников С.А., Лебедев С.В., Сизова Е.А., Яушева Е.В., Докина Н.Н., Рогачев Б.Г., Сандакова Г.Н., Фролов Д.В., Кизаев М.А., Гавриш И.А. Способ предпосевной обработки семян яровой сильной пшеницы. 2019. RU 2700616 С1.
12. Мирошников С.А., Малышева А.В., Дерябина Т.Д., Фролов Д.В., Павлов Л.Н., Рогачев Б.Г. Эффективный способ предпосевной обработки семян нута // Вестн. мясн. скотоводства. 2011. Т. 4. № 64. С. 104–110.
13. Молодченкова О.О. Влияние салициловой кислоты на ответные реакции проростков кукурузы при абиотических стрессах // Вестн. Харьков. нац. аграрн. ун-та им. В.В. Докучаева. Сер. биол. 2012. Вып. 3 (15). С. 24–32.
14. Мушинский А.А., Сизова Е.А., Аминова Е.В., Рогачев Б.Г., Пашина Т.А., Докина Н.Н., Кизаев М.А., Фролов Д.В. Способ предпосадочной обработки клубней семенного картофеля. 2018. RU 2690937 С1.
15. Низова Г.К. Влияние предпосевной обработки семян янтарной кислотой на качество зеленой массы и зерна овса // Научн.-техн. бюл. ВИР. 1988. Т. 184. С. 17–20.
16. Чермерис О.В. Влияние салициловой кислоты на активность каталазы в инфицированных грибом *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. проростках *Pinus pallasiana* D. Don // Пром. ботаника. 2019. Вып. 19. № 2. С. 29–33.
17. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Дата введения в действие 01.07.1986. М.: Стандартинформ, 2011. 64 с.
18. Horvath E., Janda T., Szalai G., Paldi E. *In vitro* salicylic acid inhibition of catalase activity in maize: differences between the isozymes and a possible role in the induction of chilling tolerance // Plant Sci. 2002. V. 163. P. 1129–1135.
19. Kang G., Wang Z., Xia K., Sun G. Protection of ultrastructure in chilling-stressed banana leaves by salicylic acid // J. Zhejiang Univ. Sci. B. 2007. V. 8. № 4. P. 277–282.
20. Raskin I. Salicylic acid, a new plant hormone // Plant Physiol. 1992. V. 99. P. 799–803.

Effect of Pre-Sowing Treatment of Spring Wheat Seeds (*Triticum aestivum* L.) with Organic Acids of Natural Origin in a Rarefied Medium on Plant Growth and Development

N. V. Verkhovtseva^{a,#}, E. N. Kubarev^b, G. R. Balashov^a, and A. E. Robert^a

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science
Leninskie gory 1, bld. 12, Moscow 119991, Russia

^bThe Educational and Experimental Soil and Ecological Center of the Lomonosov Moscow State University
Moscow region, Solnechnogorsk district, d. Chashnikovo 141592, Russia

[#]E-mail: verh48@list.ru

The effect of pre-sowing treatment of spring wheat seeds (*Triticum aestivum* L.) with succinic and salicylic acids at concentrations of 10^{-5} M and 10^{-3} M with and without the use of a vacuum infiltrator was studied. The obtained results showed a positive effect of seed treatment under conditions of rarefied pressure (0.9 atm, 15 min) on the development of coleoptile and seedling root on the 7th day of germination. On day 3 (when determining the germination energy), the effect of a rarefied medium did not reveal a significant effect. Under stressful conditions of plant development with hyperthermia, it was found that treatment of seeds with salicylic acid at a concentration of 10^{-3} M in a rarefied environment provided the best result in reducing stress load by suppressing catalase activity. Succinic acid at a concentration of 10^{-5} M proved to be the best option as a growth enhancer. Together with the use of a rarefied medium, such treatment most significantly accelerated the development of the coleoptile and the root of the seedling on the 7th day of germination.

Key words: vacuum infiltration, pre-sowing seed treatment, growth regulators, succinic acid, salicylic acid.

ДЕЙСТВИЕ КОМПОЗИЦИИ БИОСТИМУЛЯТОРА С МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РОСТА И ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ТЫКВЫ

© 2023 г. Н. К. Хидирова¹, М. Р. Баратова², Ш. Косимова², Р. П. Закирова^{1,*}

¹Институт химии растительных веществ им. С.Ю. Юнусова
100170 Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 77, Республика Узбекистан

²Андижанский институт сельского хозяйства и агротехнологий
100140 Андижан, ул. Университетская, 1, Республика Узбекистан

*E-mail: ranozakirova@mail.ru

Поступила в редакцию 13.10.2022 г.

После доработки 23.11.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Применение экологически чистых регуляторов роста и микроудобрений позволяет использовать энергосберегающие технологии и максимально реализовать физиологические возможности растений. В Институте химии растительных веществ им. акад. С.Ю. Юнусова был создан биостимулятор Учкун, который имеет низкую норму расхода и малую токсичность. Препарат повышает урожайность многих сельскохозяйственных культур (хлопчатника, пшеницы и др.) и защищает их от неблагоприятных условий, увеличивает содержание фотосинтетических пигментов в листьях. Цель настоящей работы – изучение влияния предпосевной обработки семян тыквы сортов Испанская-73 и Палов-каду-268 биопрепаратом Учкун и его композицией с микроэлементами (препарат Учкун плюс) на продуктивность и качество семян. Показано, что этот состав способствовал повышению продуктивности культуры. При обработке композицией средняя масса одного плода составляла 3.4 кг и превышала вариант без обработки (контроль) (2.8 кг) на 21.4%, при обработке биостимулятором Учкун – 3.3 кг, что было больше контроля на 17.8%. Средняя прибавка урожайности тыквы при предпосевной обработке семян препаратом Учкун плюс составила 10.1 т/га по сравнению с контролем, тогда как при воздействии препарата Учкун – 7.8 т/га. Кроме того показано, что при воздействии комплексным препаратом улучшалось качество семян тыквы, повышалась масличность и содержание общего белка, увеличивалась сумма ненасыщенных жирных кислот.

Ключевые слова: биостимулятор Учкун, микроэлементы, композиция, препарат Учкун плюс, тыква, продуктивность, масличность семян.

DOI: 10.31857/S0002188123040051, EDN: DIDTTZ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным в развитии растениеводства стало применение экологически чистых регуляторов роста и микроудобрений, позволяющих использовать энергосберегающие технологии и максимально реализовать физиологические возможности растений.

Использование регуляторов роста и микроудобрений направлено не только на увеличение урожая, но и на улучшение качества продукции и повышение устойчивости растений к биотическим и абиотическим факторам [1–4]. Учитывая, что при этом повышается иммунитет растений к целому ряду заболеваний грибного, бактериального и вирусного происхождения, становится возможным снизить нормы расхода фунгицидов, а также кратность обработок. Например, на осно-

ве регулятора роста и развития растений препарата Силк, полученного из древесной зелени пихты сибирской, известен композиционный препарат Витязь для опрыскивания овощных культур во время вегетации [5].

В Институте химии растительных веществ создан биостимулятор препарат Учкун, который имеет низкую норму расхода, малую токсичность, высокую эффективность [6]. Препарат получен на основе полиизопреноидов, выделенных из листьев хлопчатника, и представляет собой сумму биологически активных веществ (α -токоферол, полиизопреноидные спирты, фитостеролы и высшие алифатические спирты и др.). Учкун повышает урожайность многих сельскохозяйственных культур (хлопчатника, пшеницы и др.) и защищает их от неблагоприятных условий (де-

фицита воды, засоленных почв) [7, 8], увеличивает содержание фотосинтетических пигментов в листьях [9]. Нами разработана композиция, содержащая в своем составе биостимулятор Учкун и микроэлементы, которую назвали Учкун плюс. Изучено влияние новой формы биостимулятора на рост и урожайность хлопчатника, а также на накопление зеленых пигментов в его листьях [10].

Тыква (*Cucurbita*) – одно- и многолетняя бахчевая культура, род травянистых растений семейства тыквенные (*Cucurbitaceae*) широко распространен в Средней Азии. В мякоти тыквы присутствует большое количество полезных минеральных веществ и витаминов. Продукт способен задерживать процессы старения, благотворно влияет на состояние кожных покровов и волос [11].

Целью работы – изучение влияния предпосевной обработки семян тыквы сортов Испанская-73 и Палов-каду-268 биопрепаратом Учкун и его композицией с микроэлементами (Учкун плюс) на продуктивность и качество семян.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой биостимулятора Учкун были листья хлопчатника сорта Келажак в фазе созревания, произраставшего в оазисе Ташкентской обл. Биологически активные вещества извлекали 96%-ным этиловым спиртом по методике [12]. Компонентный состав препарата определяли методом высокоэффективной тонкослойной хроматографии (ВЭТСХ, Camag, Швейцария). Для количественного определения полипренолов, α -токоферола и фитостеролов была использована система толуол : этилацетат = 19 : 1. Элюирование проводили в стеклянной камере. В качестве стандарта использовали достоверные образцы полипренолов, ситостерина и α -токоферола, выделенных ранее из листьев хлопчатника. Для определения содержания компонентов были использованы пластинки фирмы Sorbfil HPTLC-AF-UV, размер 10 × 10. Условия снятия: расстояние от старта до финиша – 70.0 мм, высушивание на воздухе, температура 20–25°C, время 15 мин, расстояние между треками – 7.7 мм. Денситометрию проводили при 200 нм с помощью TLC Scanner 3.

Для проведения исследований была подготовлена композиция, включающая водную эмульсию биостимулятора Учкун и микроэлементов [10].

Полевые испытания проводили на участке Андиганского филиала Аграрного государственного университета в 2020 г. по методике [13]. Почва опытного поля относится к орошаемому луговому. Приводный слой грунта по гранулометрическому составу – среднепесчаный, с нарастанием к подошве мелкой пыли, с переходом в тяжелый песчаный грунт. Уровень грунтовых вод – 1.5–2.0 м,

не засоленный. По почвенной карте количество гумуса в пахотном слое (0–30 см) составлял 1.58–1.85% [14].

Площадь делянки 100 м². Была проведена предпосевная обработка, семена замачивали в течение 24 ч препаратом Учкун и его композицией Учкун плюс. Контрольные семена замачивали в воде. Посев проводили 20 апреля. Обработку биостимуляторами провели при норме расхода 200 мл/га 0.1%-ным раствором водной эмульсии. Сбор урожая проводили с 20 августа. Подсчитывали общее количество вызревших плодов с каждой делянки и затем путем взвешивания определяли среднюю массу плода и рассчитывали урожай с 1 га.

Определение содержания белка в растениях проводили стандартным методом на электрофотокориметре КФК-3 [15]. Сырую маслянистую определяли методом [16]. Образцы измельченных ядер семян в кофемолке тщательно перемешивали шпателем и из перемешанной массы брали на аналитических весах навеску 8–10 г. Экстракционный патрон из фильтровальной бумаги взвешивали на аналитических весах. Навеску помещали во взвешенный экстракционный патрон, сверху клали небольшой слой ваты, затем края патрона заворачивали и помещали в экстрактор – аппарат Сокслета. К экстрактору присоединяли чистую колбу, предварительно высушенную в течение 1 ч при 100–105°C и взвешенную после охлаждения в эксикаторе. Через водяной холодильник при помощи маленькой воронки наливали в экстрактор необходимое количество предварительно перегнанного экстракционного бензина (фракция 75–80°C).

Экстракцию масла вели в течение 20–22 ч. Первое взвешивание производили через 1 ч сушки, последующие – через каждые 30 мин. Сушку считали законченной, если разница между 2-мя последними взвешиваниями составляла 0.0002–0.0004 г.

Содержание масла в семенах (%) (X) вычисляли по формуле:

$$X = \frac{(P_1 - P_2) \times 100}{P},$$

где, P_1 – масса колбы с маслом, г; P_2 – масса пустой колбы, г; P – навеска семян, г.

Газовую хроматографию проводили по методу [17]. Для определения состава жирных кислот образец масла гидролизovali 10%-ным метанольным раствором КОН в соотношении образец : раствор = 1 : 10, при кипячении на водяной бане в течение 1 ч. Полученные мыла разлагали 50%-ным водным раствором H₂SO₄. Жирные кислоты экстрагировали 3 раза диэтиловым эфиром. Далее эфирные вытяжки промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции, сушили над

Таблица 1. Влияние обработки биостимулятором семян тыквы сортов Испанская 73 и Палов-каду-268 на ее урожайность

Вариант	Сорта							
	Испанская-73				Палов-каду-268			
	Количество плодов, шт./растение	Средняя масса плода, кг	Урожайность, т/га	Прибавка урожайности, т/га	Количество плодов, шт./растение	Средняя масса плода, кг	Урожайность, т/га	Прибавка урожайности, т/га
Контроль без обработки	1.5	2.8	18.9	–	1.6	2.7	20.1	–
Учкун 0.1%-ный (200 мл/га)	1.8	3.3	26.7	7.8	1.8	3.3	27.5	7.4
Учкун плюс $HCP_{05} = 1.03$	1.9	3.4	29.0	10.1	2.0	3.4	30.6	10.5
	$S_x = 0.7$							

Таблица 2. Содержание суммарного белка и азота в семенах тыквы сортов Испанская-73 и Палов-каду-268

Образец	Навеска, г	Аликвота, мл	D, 440 нм	Белок	Азот
				%	
Сорт Испанская 73					
Контроль без обработки	0.320	0.2	0.265	26.2	4.24
Учкун	0.326	0.2	0.285	28.2	4.56
Учкун плюс	0.327	0.2	0.322	30.7	4.92
Сорт Палов-каду-268					
Контроль без обработки	0.320	0.2	0.265	25.8	4.18
Учкун	0.327	0.2	0.285	27.8	4.50
Учкун плюс	0.320	0.2	0.303	28.9	4.68

сульфатом натрия, затем эфир отгоняли. Жирные кислоты метилировали свежеприготовленным диазометаном. Очистку полученных метиловых эфиров (МЭ) проводили в тонком слое силикагеля в системе растворителей гексан : диэтиловый эфир = 4 : 1, зону МЭ проявили в парах J_2 и метиловые эфиры десорбировали с силикагеля хлороформом. После удаления хлороформа МЭ растворяли в гексане и анализировали на приборе *Agilent Technologies* 6890 N с пламенно-ионизационным детектором, используя капиллярную колонку длиной 30 м с внутренним диаметром 0.32 мм с нанесенной фазой НР-5 при температуре от 150 до 270°C. Газ-носитель – гелий.

Гидролиз масла проводили 10%-ным метанольным раствором КОН при кипячении на водяной бане в течение 1 ч. Выделенные суммарные жирные кислоты метилировали свежеприготовленным диазометаном. Очистку полученных метиловых эфиров проводили в тонком слое силикагеля в системе растворителей гексан: диэтиловый эфир 4:1 препаративно. После удаления растворителя метиловые эфиры растворяли в гексане и анализиро-

вали на приборе *Agilent Technologies* 6890 N с пламенно-ионизационным детектором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование химического состава полученного биостимулятора Учкун показало, что основным компонентом была сумма полипренилгомологов с 10–12-ю изопреновыми звеньями, содержание которых достигало 69.5%, другие составляющие – фитоситостеролы и токоферолы – 30.5% [12].

Изучение влияния предпосевной обработки семян тыквы сортов Испанская 73 и Палов-Каду-268 композицией биостимулятора с микроэлементами и названного Учкун плюс на урожайность проводили на участке Андижанского филиала Аграрного государственного университета в 2020 г.

Проведенные исследования показали, что при предпосевной обработке семян тыквы биостимуляторами отмечено увеличение урожайности культуры.

Таблица 3. Физико-химические показатели качества семян тыквы

Вариант	Влажность, %	Масличность при фактической влажности, %	Масличность на абсолютно сухое вещество, %
Контроль без обработки	4.6	34.1	35.6
Учкун плюс	4.7	35.2	36.9
Учкун	4.7	35.2	36.8

При обработке композицией Учкун плюс средняя масса одного плода обоих сортов составляла 3.4 кг, при обработке биостимулятором Учкун – 3.3 кг, в варианте без обработки (контроль) – 2.8 кг (табл. 1).

Прибавка урожая при использовании предлагаемой композицией составила 10.1 и 10.5 т/га, при использовании препарата Учкун – 7.8 и 7.4 т/га соответственно.

В результате предпосевной обработки семян стимуляторами роста наблюдали повышение содержания общего белка в семенах тыквы обоих сортов, его выход в варианте с применением препарата Учкун плюс для сорта Испанская 73 (30.7%) превышало контрольный вариант на 17.2%, для сорта Палов-каду – 268 (28.9%) – на 12.0%, по количеству азота в семенах исследованных сортов содержание составляло соответственно 4.92 и 4.68% и превышало контроль на 16.0 и 12.1% соответственно (табл. 2).

При использовании препарата Учкун содержание белка в семенах 2-х сортов составило 28.2 и 27.8% соответственно, общего азота – 4.56 и

4.50%, эти варианты превышали контрольный практически на одном уровне – в пределах 7.5%–7.7%.

Одним из основных параметров оценки семян тыквы является их масличность. Известно, что семена тыквы применяют в качестве профилактического средства от гельминтов, а тыквенный сок активизирует процессы кроветворения. Поэтому большое внимание уделяется вопросам расширения ассортимента выращиваемых тыкв, повышения качества товарной продукции, особенно это касается столовых сортов с высокими вкусовыми качествами.

В результате обработки семян композицией Учкун плюс масличность семян при фактической влажности составляла 35.2% и было больше контроля (34.1%) на 1.31%. Масличность на абсолютно сухое вещество составила 36.9% и превышала контроль (35.6%) на 1.31% (табл. 3).

Полученные данные показали, что композиция Учкун плюс положительно влияла на количественный состав жирных кислот, под ее влиянием увеличивалась сумма ненасыщенных жирных кислот (ЖК) на 2.04%, что свидетельствовало об улучшении качества семян (табл. 4).

Таблица 4. Жирнокислотный состав семян тыквы, % от массы кислот

Кислота	Варианты		
	Контроль без обработки	Учкун	Учкун плюс
Миристиновая 14 : 0	0.10	0.10	0.10
Пальмитиновая 16 : 0	13.0	12.3	12.2
Пальмитолеиновая 16 : 1	0.10	0.12	0.12
Маргариновая 17 : 0	0.10	0.10	0.10
Стеариновая 18 : 0	7.01	6.02	5.90
Олеиновая + Линоленовая (18 : 1 + 18 : 3)	45.9	47.4	47.9
Линолевая 18 : 2	32.8	32.8	33.2
Арахидиновая 20 : 0	0.62	0.56	0.52
Эйкозеновая 20 : 1	0.24	0.23	0.24
Бегеновая 22 : 0	0.12	0.11	0.12
Лигноцериновая 24 : 0	0.06	0.06	0.06
Σ насыщенных ЖК	21.0	19.5	19.0
Σ ненасыщенных ЖК	79.0	80.6	81.1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение влияния предпосевной обработки семян тыквы сортов Испанская-73 и Палов-каду-268 препаратом Учкун и композицией Учкун плюс показало, что они оказывали положительное влияние на урожайность и качество семян. Наблюдали значительное повышение продуктивности культуры: при предпосевной обработке семян препаратом Учкун плюс средняя прибавка урожайности тыквы сорта Испанская-73 составила 10.1, для сорта Палов-каду-268 – 10.5 т/га по сравнению с контролем, тогда как при воздействии препарата Учкун – соответственно 7.8 и 7.4 т/га.

Показано, что при обработке композицией Учкун плюс улучшалось качество семян тыквы, повышалась масличность и содержание общего белка, увеличивалась сумма ненасыщенных жирных кислот на 2.04%, в случае препарата Учкун – на 1.54%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киров Е.И. Применение регуляторов роста растений и микроэлементов в оптимальной аэрозольной технологии // *Агрохимия*. 1996. № 10. С. 84–94.
2. Свиридов А.С. Микроэлементы в черноземах Тамбовской области и их влияние на урожай и качество сельскохозяйственных культур // *Вестн. Мичуринск. гос. ун-та*. 2001. Т. 1. № 3. С. 23–24.
3. Бурунов А.Н. Средство для предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур: Пат. РФ № 2585858 // *Б.И.* 2016. № 16.
4. Клименко В.И. Способ защиты растений от болезней, регулирования их роста и защитно-стимулирующей комплекс для его осуществления: Пат. RU 2177226С2(РФ) // *Б.И.* 2006. № 16.
5. Логинов С.В., Кузнецов Б.А., Петриченко В.Н. Состав для повышения роста, развития и качества сельскохозяйственных культур: Пат. RU 2427 134 С1 (РФ) // *Б.И.* 2011. № 24.
6. Шахидоятов Х.М., Хидирова Н.К., Маматкулова Н.М., Мусаева Г.В., Ниязметов У., Умаров А.А., Каримов Р.К., Киктев М.М. Способ получения биостимулятора: Пат. № I AP 04584 PУз // *Б.И.* 2012. № 11. С. 34.
7. Zakirova R.P., Elmuradov B.Zh., Khidyrova N.K., Sagdullayev Sh.Sh. Scientific and applied research in ICPS for agriculture (Mini review) // *J. Basic Appl. Res.* 2016. V. 2. № 4. P. 476–479.
8. Khidirova N.K., Mamatkulova N.M., Kurbanova E.P., Ismailova K., Zakirova R.P., Khodjanizayov Kh.U. Influence of an Uchkun preparation to some agricultural crops which are grown under unfavorable conditions // *Inter. J. Environ. Agric. Res.* 2016. V. 2. № 1. P. 102–108.
9. Исмоилова К., Қўшиев Х., Хидирова Н., Абдусаломов Ш. Буғдой баргларидаги хлорофиллар (а, б) микдорида стероид табиатли бирикмалар таъсири // “Фаннинг долзарб масалалари” Республика илмий-амалий анжумани материаллари. 2018. Б. 118–120.
10. Закирова Р.П., Курбанова Э.Р., Хидирова Н.К. Эффективность композиции биостимулятора учкун плюс на культуре хлопчатника // *Агрохимия*. 2020. № 5. P. 26–30.
11. Гуляева Г.В. Оценка качества овощной и бахчевой продукции – актуальная задача // *Картофель и овощи*. 2012. № 1. С. 8–9.
12. Закирова Р.П., Хидирова Н.К., Эшбакова К.А., Мелиева Ш.О., Ураков Б.А. Вторичные метаболиты растений *Achillea millefolium* и *Gossypium hirsutum* L. и их биологическая эффективность против красного паутинного клеща // *Химия растит. сырья*. 2018. № 2. С. 129–134.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М. Агропромиздат, 1985. 350 с.
14. Тешабаев Ш.А. Совершенствование технологии эффективной борьбы с сорной растительностью в системе севооборота посева хлопка-зерновых культур (в условиях светлых сероземных почв Андижанской обл.): Автореф. дис. ... д-ра философии (PhD) по с.-х. наукам. Андижан, 2021. 40 с.
15. Практикум по физиологии растений / Под ред. Третьякова Н.Н. М.: Агропромиздат, 1990. С. 175–179.
16. Ul'chenko N.T. Lipids from fruit of *Caccinia crassifolia* // *Chem. Nat. Compd.* 2013. V. 48. P. 1067–1068.
17. Юлдашева Н.К., Ульченко Н.Т., Абдухамидова Ф., Глушенкова А.И., Зайнутдинов У.Н. Липиды семян *Lagochilus inebrians* // *Хим. природ. соедин.* 2015. № 6. С. 992–994.

Effect of the Biostimulator Composition with Trace Elements to Accelerate the Growth and Increase the Productivity of Pumpkin

N. K. Khidirova^a, M. R. Baratova^b, Sh. Kosimova^b, and R. P. Zakirova^{a, #}

^aInstitute of Chemistry of Plant Substances named after S. Yu. Yunusov
Mirzo Ulugbek str. 77, Tashkent 100170, Republic of Uzbekistan

^bAndizhan Institute of Agriculture and Agrotechnologies
Universitetskaya str. 1, Andijan 100140, Republic of Uzbekistan

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

The use of environmentally friendly growth regulators and micro fertilizers makes it possible to use energy-saving technologies and maximize the physiological capabilities of plants. At the Institute of Plant Chemistry named after Academician S. Yu. Yunusov, a biostimulator Uchkun was created, which has a low consumption rate and low toxicity. The drug increases the yield of many crops (cotton, wheat, etc.) and protects them from adverse conditions, increases the content of photosynthetic pigments in the leaves. The purpose of this work is to study the effect of pre-sowing treatment of pumpkin seeds of the Spanish-73 and Palov-Kadu-268 varieties with the Uchkun biological preparation and its composition with trace elements (Uchkun plus preparation) on the productivity and quality of seeds. It is shown that this composition contributed to an increase in crop productivity. When treated with the composition, the average weight of one fetus was 3.4 kg and exceeded the option without treatment (control) (2.8 kg) by 21.4%, when treated with a biostimulator Uchkun – 3.3 kg, which was 17.8% more than the control. The average increase in pumpkin yield during pre-sowing seed treatment with Uchkun plus was 10.1 t/ha compared to the control, whereas when exposed to Uchkun – 7.8 t/ha. In addition, it was shown that when exposed to a complex preparation, the quality of pumpkin seeds improved, the oil content and the total protein content increased, and the amount of unsaturated fatty acids increased.

Key words: Uchkun biostimulator, trace elements, composition, Uchkun plus preparation, pumpkin, productivity, oil content of seeds.

УДК 631.41:631.452(470.32)

МОНИТОРИНГ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПАХОТНЫХ ПОЧВ ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОГО РАЙОНА РОССИИ

© 2023 г. С. В. Лукин^{1,2,*}¹Центр агрохимической службы “Белгородский”
308027 Белгород, ул. Щорса, 8, Россия²Белгородский государственный национальный исследовательский университет
308015 Белгород, ул. Победы, 85, Россия

*E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.12.2022 г.

После доработки 20.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

На основе анализа результатов агроэкологического мониторинга установлено, что в ЦЧР за 2016–2020 гг. по сравнению с 2001–2005 гг. отмечен значительный рост использования минеральных удобрений (1.8–7.8 раза) и объемов химической мелиорации почв (2.3–43.9 раза). Наиболее высокий уровень внесения минеральных удобрений (156 кг/га) был достигнут в Курской обл., органических удобрений (8.83 т/га) и известкования кислых почв (65.9 тыс. га в год) – в Белгородской. Минимальный уровень внесения минеральных удобрений (88.1 кг/га) и известкования (13.0 тыс. га) отмечен в Воронежской, а использования органических удобрений (0.24 т/га) – в Тамбовской обл. За эти же годы урожайность зерновых и зернобобовых культур увеличилась в 1.51–2.19 раза. Максимальная урожайность была достигнута в Курской (4.95 т/га) и Белгородской (4.87 т/га) областях, минимальная – в Тамбовской (3.67 т/га) и Воронежской (3.62 т/га). По состоянию на 01.01.2021 г. наиболее существенное увеличение обеспеченности почв органическим веществом, подвижными формами P_2O_5 и K_2O , снижение доли кислых почв отмечено в Белгородской обл. В пахотных почвах Тамбовской обл. зафиксировано максимальное средневзвешенное содержание органического вещества (6.5%), минимальное (4.7%) отмечалось в Курской обл. Самое высокое содержание подвижных форм P_2O_5 (143 мг/кг) и K_2O (169 мг/кг) наблюдали в почвах Белгородской, самое низкое (соответственно 88 и 106 мг/кг) – в Тамбовской обл. В почвах пашни Липецкой обл. зафиксирована самая высокая доля кислых почв (77.9%), тогда как в Белгородской и Воронежской обл. она составила 31.0%. Пахотные почвы региона в основном характеризуются низкой обеспеченностью подвижными формами цинка, меди и кобальта. Наиболее высокая доля почв, низко обеспеченных подвижными формами серы (95.1%) и марганца (88.3%), отмечена в Тамбовской, наиболее низкая – соответственно в Воронежской (74.7%) и Липецкой (3.1%) обл.

Ключевые слова: агрохимическое обследование, известкование, калий, кислотность почв, микроэлементы, органическое вещество почвы, сера, фосфор, удобрения, урожайность

DOI: 10.31857/S0002188123040075, **EDN:** DIMNZW

ВВЕДЕНИЕ

Основное количество продуктов питания человечество получает за счет использования почвенно-плодородия. Поэтому охрана и рациональное использование почв является важнейшей государственной задачей, от решения которой напрямую зависит обеспечение продовольственной безопасности страны.

Центрально-Черноземный район (ЦЧР) является одним из самых развитых аграрных регионов Российской Федерации. Главный ресурс региона – черноземные почвы. По образному выражению В.В. Докучаева, “... чернозем был, есть и будет

кормильцем России” [1]. В 2020 г. доля хозяйств ЦЧР в производстве зерновых и зернобобовых культур составила 18.8% от российского уровня, сахарной свеклы – 47.2, подсолнечника – 24.7% [2].

Однако в процессе длительного и не всегда бережного сельскохозяйственного использования черноземы были подвержены различным видам деградации: водной эрозии, дегумификации, подкислению и др. [3–6]. Сохранение и повышение плодородия черноземов – это задача, требующая комплексного решения в рамках освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия, где с учетом свойств почв и требований растений оптимизированы структура севооборотов, агротех-

ника возделывания культур, комплекс противоэрозионных мероприятий и система применения удобрений и химической мелиорации. Для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия необходимы актуальные данные агроэкологического мониторинга, основу которого составляет периодически повторяемое сплошное обследование пахотных почв, проводимое агрохимической службой России [7].

Цель работы – изучение влияния уровня применения удобрений и известкования на урожайность зерновых и зернобобовых культур, агроэкологические параметры плодородия пахотных почв в ЦЧР.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2020 г. общая посевная площадь в ЦЧР составила 8.981 млн га (11.3% от российского уровня), в том числе в Воронежской обл. – 2.686, в Тамбовской – 1.831, в Курской – 1.666, в Белгородской – 1.425, в Липецкой – 1.373 млн га [2].

Пахотные почвы региона расположены преимущественно в лесостепной природной зоне, в степную зону попадают только южные и юго-восточные районы Воронежской и Белгородской обл. В структуре пашни на долю серых и темно-серых лесных почв приходится 6.8%, черноземов оподзоленных – 4.4%, выщелоченных – 37.2%, типичных – 32.9%, обыкновенных – 11.7%. Доля фактически эродированной пашни в ЦЧР в среднем составляет 20.1%, в Белгородской обл. – 48%. В лесостепной зоне на северо-западе Курской обл. среднемноголетняя величина гидротермического коэффициента (ГТК) по Селянинову составляет 1.3, в степной зоне Белгородской и Воронежской обл. – 0.9 [8].

В работе использованы материалы сплошного агрохимического обследования пахотных почв. В пробах почв, взятых из пахотного слоя (0–25 см), определяли содержание органического вещества по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-93), подвижных форм фосфора и калия – по методу Чирикова (ГОСТ 26204-91), pH_{KCl} – по ГОСТ 26483-85. Определение подвижной серы в почвах проводили турбидиметрическим методом после извлечения раствором хлористого калия в соответствии с ГОСТ 26490-85. Содержание в почве подвижных форм марганца определяли согласно ГОСТ Р 50685-94, цинка – ГОСТ Р 50686-94, меди и кобальта – ГОСТ Р 50683-94. Для извлечения этих микроэлементов из почвы использовали ацетатно-аммонийный буферный раствор (ААБ) pH 4.8. Содержание по-

движных форм бора определяли по методу Бергера и Трота (ГОСТ Р 50688-94) [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кислотность почв является важнейшим параметром их агроэкологического состояния, существенно влияющим на урожайность сельскохозяйственных культур и санитарно-гигиенические показатели качества растениеводческой продукции. Внесение удобрений на кислых почвах приводит к снижению их окупаемости прибавкой урожая. Подкисление почвенного раствора является причиной повышения подвижности и размеров транслокации тяжелых металлов (ТМ) в системе почва–растение. Для большинства бобовых культур (люцерны, клевера, эспарцета), возделываемых на почвах с $pH_{KCl} < 5.5$, характерно значительное сокращение симбиотической фиксации атмосферного азота. Наиболее чувствительной к повышенной кислотности почв сельскохозяйственной культурой является сахарная свекла [9–11]. Поскольку ЦЧР является основной зоной свеклосеяния в России, то вопрос известкования кислых почв является очень актуальным.

В ЦЧР тренд к подкислению характерен для пахотных почв лесостепной зоны, в черноземах обыкновенных степной зоны отмечено даже подщелачивание [3]. Поэтому наиболее высокую долю кислых почв всегда выявляли в областях ЦЧР, полностью расположенных в лесостепной зоне. Например, в Курской обл. (по данным агрохимического обследования за 1999–2003 гг.) доля кислых почв составляла 56.4%, в Липецкой (1998–2002 гг.) – 65.0%, в Тамбовской (1995–2002 гг.) – 70.1%. В Воронежской обл., частично расположенной в степной зоне, в 1995–2000 гг. доля кислых почв составляла 27.9%. В Белгородской обл., также частично расположенной в степной зоне, по данным обследования 1995–1999 гг., доля кислых почв составляла 33.5%, к 2010–2014 гг. она увеличилась до 45.8%.

По состоянию на 01.01.2021 г. доля кислых почв в Липецкой, Тамбовской, Курской и Воронежской обл. увеличилась соответственно до 77.9, 77.3, 71.0 и 31.0%, а в Белгородской – снизилась до 31.0%. В Курской, Липецкой и Тамбовской обл. отмечали самую высокую долю среднекислых почв, соответственно 31.0, 29.2 и 23.9% (рис. 1). Среднекислые почвы преобладают на севере Тамбовской и Курской обл., в районах, где почвенный покров в основном представлен темно-серыми и серыми лесными почвами [3].

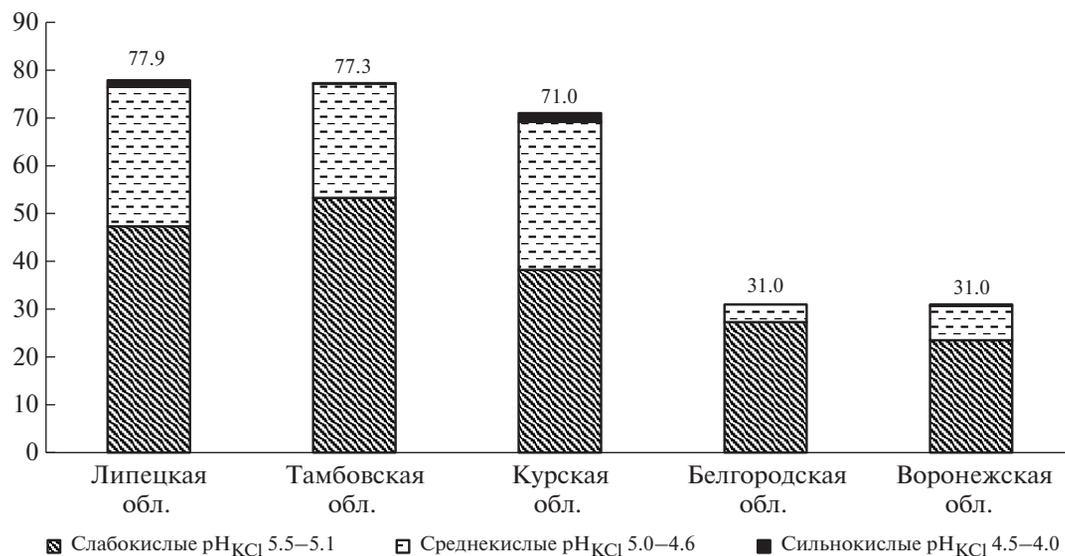


Рис. 1. Доля кислых почв в ЦЧР, % от площади обследованной пашни (по данным мониторинга на 01.01.2021 г.).

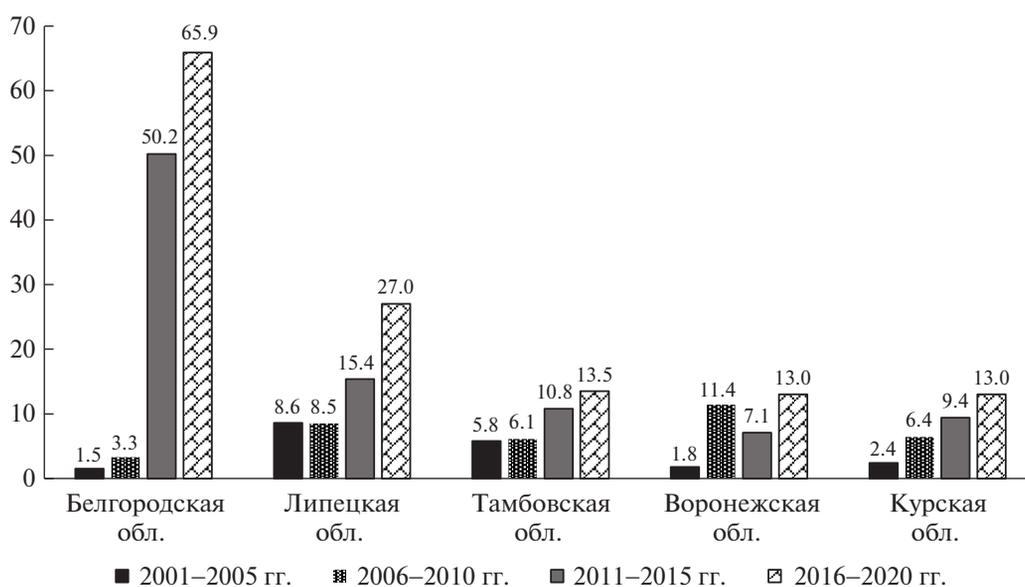


Рис. 2. Динамика площади произведенных почв в ЦЧР, тыс. га/год.

Для предотвращения избыточного подкисления пахотных почв в лесостепной зоне ЦЧР рекомендуется периодически проводить химическую мелиорацию [9–11]. В 2001–2005 гг. в ЦЧР ежегодно известковали всего 20.1 тыс. га кислых почв, в 2016–2020 гг. — уже 132.4 тыс. га. В течение 2016–2020 гг. средний ежегодный уровень известкования в Белгородской обл. составлял 65.9 тыс. га, что сопоставимо с площадью известкования в Воронежской, Курской, Липецкой и Тамбовской обл. вместе взятых (66.5 тыс. га) (рис. 2). Поэтому, несмотря на возросшие объемы химической ме-

лиорации, уменьшение площади кислых почв наблюдается только в Белгородской обл.

Содержание органического вещества в почвах является энергетической основой функционирования экосистем всех рангов, в котором депонировано огромное количество углерода и важнейших элементов питания растений. Кроме этого, уровень содержания органического вещества во многом определяет водно-физические свойства и имеет важное значение для образования агрономически ценной структуры почв [12].

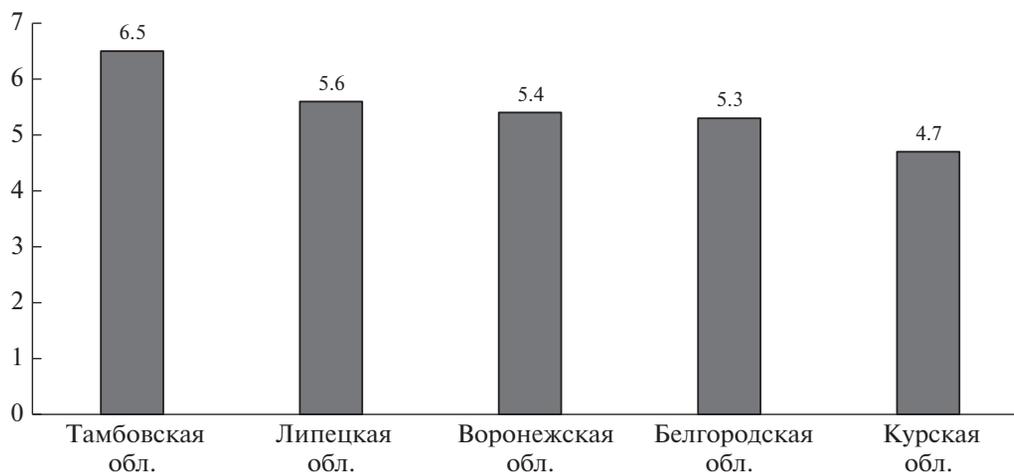


Рис. 3. Средневзвешенное содержание органического вещества в почвах пашни ЦЧР, % (по данным мониторинга на 01.01.2021 г.).

Содержание органического вещества в черноземе типичном, не затронутом сельскохозяйственной деятельностью, в верхней части гумусово-аккумулятивного горизонта (10–20 см) составляет 10.1% (участок “Ямская степь” заповедника “Белогорье”). Средневзвешенная величина этого показателя в пахотных почвах Тамбовской обл., по данным обследования 1995–2002 гг., составляла 6.6, Воронежской (1995–2000 гг.) – 5.7, Липецкой (1998–2002 гг.) – 5.6, Белгородской (1995–2000 гг.) – 4.9, Курской (1999–2003 гг.) – 4.6%.

По состоянию на 01.01.2021 наиболее высокое средневзвешенное содержание органического вещества зафиксировано в пахотных почвах Тамбовской обл. – 6.5%. На ее юге, в Мордовском р-не средневзвешенное содержание органического вещества в почвах пашни достигает самого высокого для районов ЦЧР уровня – 7.3%. В почвах пашни Липецкой, Воронежской и Белгородской обл. величина параметра находится на уровне соответственно 5.6, 5.4 и 5.3% [3]. Наиболее низким средневзвешенным содержанием органического вещества (4.7%) характеризуются почвы Курской обл., а в Хомутовском р-не, расположенном на западе региона, величина этого показателя достигает минимума для ЦЧР – 3.3% (рис. 3).

Увеличение содержания органического вещества на 0.4% отмечено в почвах Белгородской обл. Для почв Курской обл. характерен незначительный тренд к увеличению (0.1%), а для почв Тамбовской обл. – к снижению (–0.1%) величины данного показателя. Почвы Липецкой обл. характеризуются стабильным содержанием органического вещества. В почвах пашни Воронежской

обл. зафиксировано снижение величины этого показателя на 0.3%.

Одним из главных антропогенных факторов регулирования баланса органического вещества в агроценозах является внесение органических удобрений. В многочисленных полевых опытах, проведенных в Центральном Черноземье, установлено, что в зернопропашных севооборотах для компенсации потерь гумуса в результате его минерализации необходимо вносить навоз КРС 6–8 т/га севооборотной площади [3]. В Белгородской обл. в 2016–2020 гг. внесение органических удобрений достигло уровня 8.83 т/га (рис. 4). Кроме того, в рамках реализации программы биологизации земледелия широко используют возделывание сидеральных культур и противоэрозионные мероприятия. Уменьшены размеры минерализации гумуса за счет сокращения площади чистых паров. Комплексная реализация этих мер обусловила положительную динамику содержания органического вещества в пахотных почвах Белгородской обл.

В 2016–2020 гг. в Воронежской обл. уровень внесения органических удобрений вырос и достиг 3.34 т/га, а в Липецкой – немного снизился до 2.26 т/га. Использование органических удобрений в Курской (0.54 т/га) и Тамбовской (0.24 т/га) обл. было меньше, чем в среднем по Российской Федерации (1.5 т/га). В Центральном Черноземье и особенно в регионах с низким уровнем внесения органических удобрений важнейшим источником стабилизации гумусного фонда почвы являются пожнивно-корневые остатки сельскохозяйственных культур, выход которых в

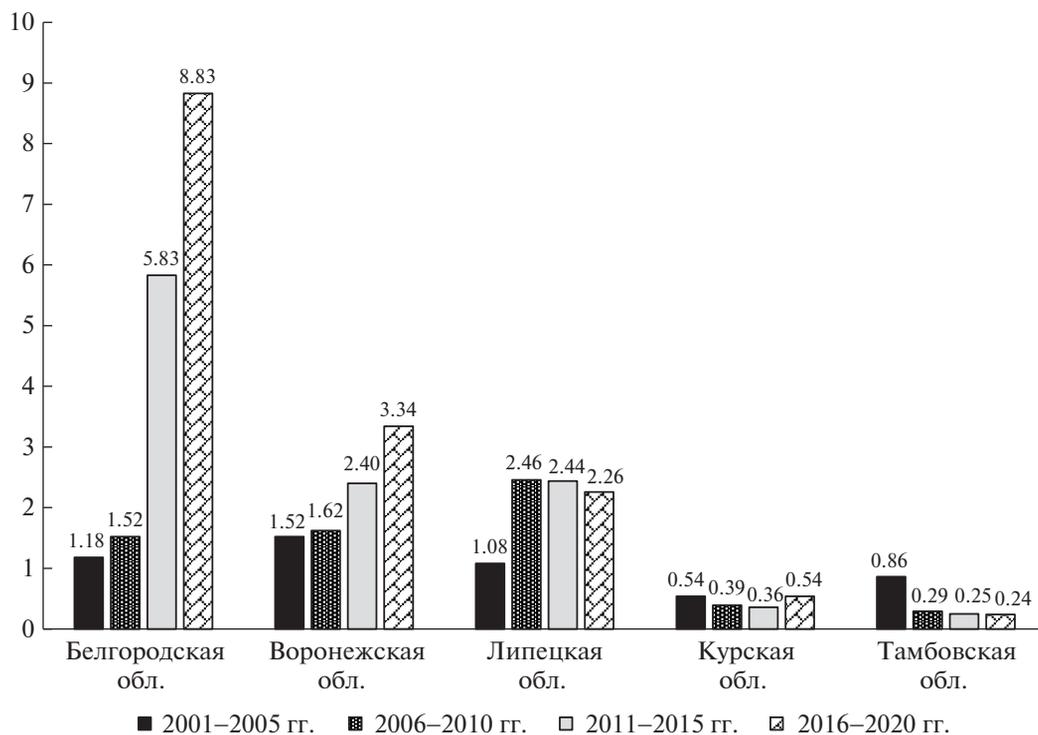


Рис. 4. Динамика внесения органических удобрений в ЦЧР, т/га посева.

последние годы увеличился в связи с ростом урожайности [13, 14].

Содержание подвижных форм P_2O_5 и K_2O в почвах характеризует обеспеченность сельскохозяйственных культур этими важнейшими биогенными макроэлементами. Фоновое содержание подвижных форм P_2O_5 и K_2O в целинном черноземе типичном заповедника “Белогорье” (участок “Ямская степь”) составляет соответственно 28 (низкий уровень) и 101 мг/кг (повышенный уровень).

Средневзвешенное содержание подвижных соединений P_2O_5 в почвах пашни Белгородской обл. в 1995–1999 гг. составляло 131, Воронежской (1995–2000 гг.) – 96, Курской (1999–2003 гг.) – 139, Липецкой (1998–2002 гг.) – 99, Тамбовской (1995–2002 гг.) – 95 мг/кг. За эти же годы средневзвешенное содержание подвижных соединений K_2O в почвах Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой и Тамбовской обл. составляло соответственно 128, 128, 103, 101 и 100 мг/кг [3].

По состоянию на 01.01.2021 г. средневзвешенное содержание подвижных форм P_2O_5 и K_2O в почвах пашни Белгородской обл. увеличилось соответственно на 12 и 41 мг/кг, достигнув максимальных для ЦЧР уровней 143 и 169 мг/кг (рис. 5). В почвах Воронежской обл. также отмечено уве-

личение средневзвешенного содержания подвижных форм P_2O_5 на 8 мг/кг (до 104 мг/кг) и подвижных форм K_2O – на 7 мг/кг (до 135 мг/кг). В пахотных почвах Липецкой обл. содержание подвижного фосфора практически не изменилось (–1 мг/кг), составив 98 мг/кг, а подвижных форм калия увеличилось на 19 мг/кг, достигнув уровня 138 мг/кг. В Курской обл. установлено снижение средневзвешенной величины содержания подвижных форм P_2O_5 в почвах на 10 мг/кг (до 129 мг/кг) и увеличение содержания подвижных форм K_2O на 9 мг/кг (до 112 мг/кг). Наиболее низкие средневзвешенные величины содержания подвижных форм P_2O_5 и K_2O были зафиксированы в пахотных почвах Тамбовской обл. – 88 и 106 мг/кг соответственно, причем для первого параметра была характерна отрицательная динамика (–7 мг/кг), а для второго – положительная (+6 мг/кг).

Важнейшим фактором регулирования фосфатного и калийного режимов почв является внесение удобрений. Содержание подвижных фосфатов очень сильно зависит от уровня кислотности, обычно на произвесткованных почвах отмечается снижение данного показателя.

Как правило, основное количество фосфора и калия поступает в агроценозы с минеральными удобрениями [15]. В 2016–2020 гг. по сравнению с 2001–2005 гг. использование минеральных удоб-

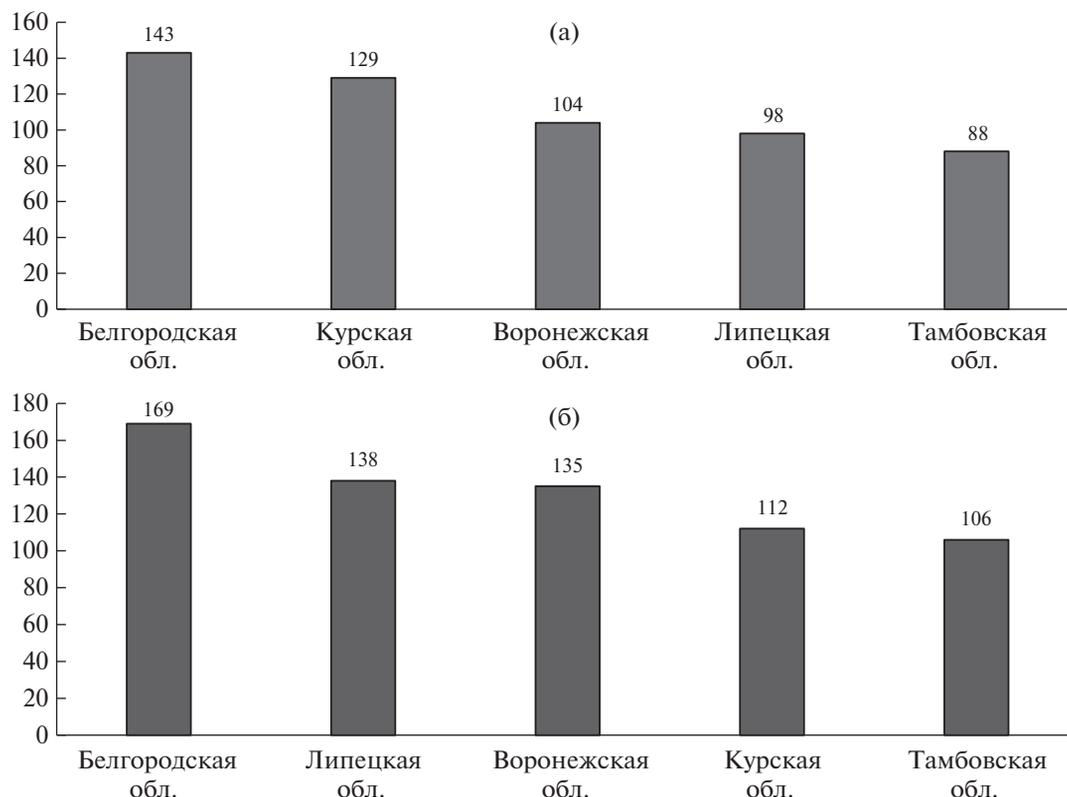


Рис. 5. Средневзвешенное содержание подвижных форм P₂O₅ (а) и K₂O (б) в почвах пашни ЦФР, мг/кг (по данным мониторинга на 01.01.2021 г.).

рений увеличилось в Тамбовской обл. в 7,8, в Курской – в 4,2, в Липецкой – в 2,3, в Воронежской – в 2,8, в Белгородской – в 1,8, в целом по РФ – в 2,5 раза [3]. В 2016–2020 гг. максимальный для ЦФР уровень использования минеральных удобрений (156 кг/га) был зафиксирован в Курской, а самый низкий (88,1 кг/га) – в Воронежской обл. (рис. 6). Однако даже в Воронежской обл. минеральных удобрений вносили в 1,6 раза больше, чем в среднем в РФ. В использованных минеральных удобрениях доля азота была существенно больше, чем фосфора и калия, и в последние годы этот тренд усиливается. Например, в Белгородской обл. в 2016–2020 гг. по сравнению с 2001–2005 гг. доли P₂O₅ и K₂O во внесенных минеральных удобрениях снизились соответственно с 24,0 до 17,4 и с 23,4 до 16,2%.

Органические удобрения с учетом доз их внесения можно рассматривать как важный источник поступления фосфора и калия в Белгородской и в значительно меньшей степени – в Воронежской обл.

Содержание подвижных форм серы и микроэлементов в почвах – важные показатели, которые включены в программу государственного агроэко-

логического мониторинга. Причем фактором, лимитирующим продуктивность агроценозов и ухудшающим качество растениеводческой продукции, является как их низкое содержание в почве, так и превышающее предельно-допустимую концентрацию (ПДК). Для подвижных форм Mn, Zn, Cu и Co ПДК в почве ПДК установлены на уровне соответственно 140, 23, 5 и 3 мг/кг [16, 17]. Пахотные почвы, в том числе и черноземные, многих регионов России характеризуются низкой обеспеченностью подвижными соединениями S и таких важных микроэлементов, как Zn и Cu [18–21].

Фоновое содержание подвижных форм S, Zn, Mn, Cu и Co в целинных почвах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) характеризуется как низкое, за исключением содержания Mn, Cu и Co в черноземе типичном заповедника “Белогорье”, где оно оценено как среднее [17, 22]. В целинных почвах фоновое содержание подвижных форм B соответствует высокому уровню обеспеченности (табл. 1).

Сера. Определение содержания подвижных форм S, так же, как и микроэлементов, было включено в программу сплошного агрохимиче-

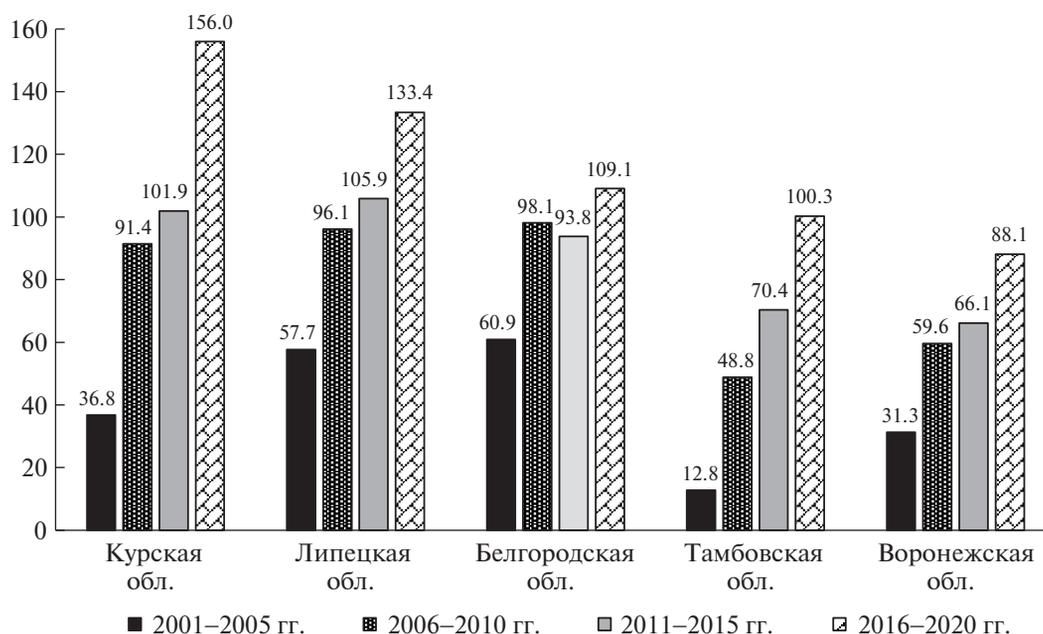


Рис. 6. Динамика внесения минеральных удобрений в ЦЧР, кг д.в./га посева.

ского обследования пахотных почв в областях ЦЧР в разные периоды. Средневзвешенная величина данного показателя в почвах Липецкой обл. (1987–1989 гг.) составляла 9.4, Белгородской (1990–1994 гг.) – 6.8, Тамбовской (1990–1995 гг.) – 4.0, Курской (2009–2013 гг.) – 4.1, Воронежской (2011–2015 гг.) – 1.2 мг/кг. По состоянию на 01.01.2021 г. (в сравнении с указанными выше периодами) средневзвешенное содержание подвижной S снизилось в почвах Белгородской обл. до 4.0, Липецкой – до 3.7, Курской – до 2.9, Там-

бовской – до 2.8, Воронежской – увеличилось до 3.9 мг/кг. Максимальная доля пахотных почв, низко обеспеченных (<6 мг/кг) подвижной S (95.1%), отмечена в Тамбовской, минимальная (74.7%) – в Воронежской обл. (табл. 2). Снижение содержания в пахотных почвах подвижных форм этого элемента во многом является следствием отказа от использования минеральных серосодержащих удобрений (в первую очередь простого и двойного суперфосфата) [17, 20].

Таблица 1. Содержание подвижных форм серы и микроэлементов в целинных почвах особо охраняемых природных территорий ЦЧР

Показатель	Элемент					
	S	Zn	Mn	Cu	Co	B
Чернозем обыкновенный (природный парк “Ровеньский”, Белгородская обл.)						
Среднее содержание, мг/кг	1.8	0.80	6.1	0.20	0.07	2.6
Группа обеспеченности	Низкая					Высокая
Чернозем типичный (заповедник “Белогорье”, участок “Ямская степь”, Белгородская область)						
Среднее содержание, мг/кг	2.3	0.79	10.9	0.24	0.20	1.50
Группа обеспеченности	Низкая		Средняя			Высокая
Чернозем выщелоченный (памятник природы “Долина реки Кривец”, Липецкая обл.)						
Среднее содержание, мг/кг	3.37	0.26	5.4	0.08	Нет данных	2.2
Группа обеспеченности	Низкая					Высокая
Темно-серая лесная (ландшафтный заказник “Долговский”, Липецкая обл.)						
Среднее содержание, мг/кг	3.15	0.25	7.2	0.09	Нет данных	0.9
Группа обеспеченности	Низкая					Высокая

Таблица 2. Средневзвешенное содержание и доля пахотных почв, низкообеспеченных подвижными формами серы и микроэлементов (по данным мониторинга на 01.01.2021 г.)

Элемент	Область				
	Белгородская	Воронежская	Курская	Липецкая	Тамбовская
Средневзвешенное содержание, мг/кг					
S	4.0	3.9	2.9	3.7	2.8
Mn	11.8	11.6	7.5	15.6	6.1
Zn	0.51	0.30	0.59	0.70	0.48
Cu	0.12	0.10	0.10	0.09	0.12
Co	0.08	0.10	0.12	Нет данных	0.11
Доля почв с низкой обеспеченностью, % от обследованной площади					
S	85.1	74.7	93.4	90.4	95.1
Mn	35.6	51.9	79.7	3.1	88.3
Zn	97.9	99.5	99.7	99.3	99.9
Cu	94.3	98.2	98.9	96.4	99.5
Co	98.9	99.2	98.3	Нет данных	99.7

Марганец. Наиболее высокое содержание подвижных форм Mn в почвах за весь период наблюдений было установлено в Белгородской обл. (1990–1994 гг.) – 17.5 мг/кг, в Липецкой (1987–1989 гг.) – 16.0, в Воронежской (2006–2010 гг.) – 12.4, в Тамбовской (1985–1990 гг.) – 10.1 мг/кг. По состоянию на 01.01.2021 г. средневзвешенное содержание подвижных форм этого элемента в почвах Липецкой обл. снизилось до 15.6, Белгородской – до 11.8, Воронежской – до 11.6, Тамбовской – до 6.1 мг/кг. В Курской обл. отмечено незначительное (+0.3 мг/кг) увеличение данного показателя до 7.5 мг/кг по сравнению с периодом 1999–2003 гг. В Тамбовской обл. установлена наиболее высокая (88.3%) доля почв, низкообеспеченных (<10 мг/кг) подвижным Mn, в Липецкой – наиболее низкая (3.1%).

Цинк. Наиболее высокое средневзвешенное содержание подвижных форм Zn было зафиксировано в пахотных почвах Белгородской обл. (1.4 мг/кг) в 1990–1994 гг., Липецкой (1.0 мг/кг) – в 1987–1989 гг., Воронежской (0.45 мг/кг) – в 2006–2010 гг. По состоянию на 01.01.2021 г. величина этого показателя в Белгородской обл. снизилась до 0.51, в Липецкой – до 0.70, в Воронежской – до 0.30 мг/кг. В почвах Курской обл. отмечен тренд к увеличению показателя на 0.14 мг/кг (до 0.59 мг/кг) по сравнению с 1999–2003 гг. В Тамбовской обл. также отмечена тенденция к увеличению содержания подвижных форм Zn в почве на 0.07 мг/кг (до 0.48 мг/кг) по сравнению с 1985–1990 гг. В областях ЦЧР доля пахотных почв с низкой обеспеченностью (<2.0 мг/кг) подвижными формами Zn составляет 97.9–99.9%.

Медь. Максимальное средневзвешенное содержание подвижных форм Cu в почвах было зафиксировано в Курской обл. (0.29 мг/кг) в 1999–2003 гг., в Воронежской (0.15 мг/кг) – в 2006–2010 гг. В почвах Тамбовской, Белгородской и Липецкой областей величина данного параметра составляла соответственно 0.12 (2002–2008 гг.), 0.11 (2009–2014 гг.) и 0.10 мг/кг (1987–1989 гг.). По состоянию на 01.01.2021 г. средневзвешенное содержание подвижных форм Cu в пахотных почвах Воронежской и Курской обл. снизилось до 0.10, Липецкой – до 0.09 мг/кг. В Тамбовской обл. величина параметра не изменилась, оставшись на уровне 0.12 мг/кг, в Белгородской – повысилась до 0.12 мг/кг. В областях Центрального Черноземья 94.3–99.5% обследованных пахотных почв относятся к категории низкой обеспеченности (<0.2 мг/кг) подвижными формами Cu.

Кобальт. Средневзвешенное содержание подвижных форм Co в почвах Курской обл. в 2004–2008 гг. составляло 0.16, Воронежской (2006–2010 гг.) – 0.14, Тамбовской (2002–2008 гг.) – 0.11, Белгородской (2005–2000 гг.) – 0.08 мг/кг. По состоянию на 01.01.2021 г. величина этого параметра в пахотных почвах Белгородской и Тамбовской обл. не изменилась, в Курской и Воронежской обл. снизилась соответственно до 0.12 и 0.10 мг/кг. В этих областях 98.3–99.7% пахотных почв являются низкообеспеченными (<0.15 мг/кг) подвижным Co.

Бор. В отличие от других изученных микроэлементов фоновое содержание подвижных форм В в целинных черноземах соответствует высокому уровню обеспеченности [17]. Пахотные черно-

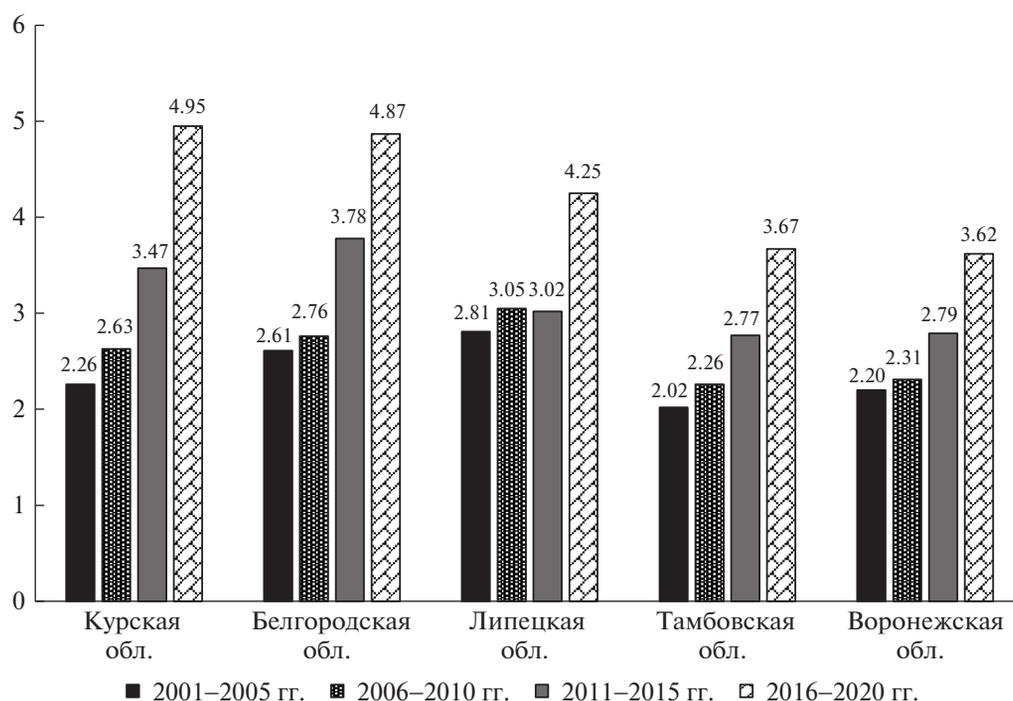


Рис. 7. Динамика урожайности зерновых и зернобобовых культур в ЦЧР (хозяйства всех категорий), т/га.

земы наследуют эту генетическую особенность, поэтому данный показатель обычно не является фактором, лимитирующим урожайность сельскохозяйственных культур, и не во всех областях ЦЧР он включен в программу обязательного агрохимического обследования. По состоянию на 01.01.2021 г. доля почв, высоко обеспеченных подвижными формами В (>0.7 мг/кг), составляет в Белгородской, Тамбовской, Липецкой и Курской обл. соответственно 99.2, 93.6, 92.6 и 42.7%. Пахотные почвы, низко обеспеченные (<0.33 мг/кг) этим микроэлементом, выявлены в западных районах Курской обл.

Урожайность сельскохозяйственных культур является комплексным критерием плодородия почв. В ЦЧР наибольшие посевные площади заняты под зерновыми и зернобобовыми культурами. В 2016–2020 гг. их доля в структуре посевных площадей была минимальной в Белгородской обл. (52%) и максимальной – в Курской (62%).

В 2016–2020 гг. по сравнению с 2001–2005 гг. урожайность этой группы культур в Курской обл. увеличилась в 2.19 раза, достигнув рекордного для ЦЧР уровня 4.95 т/га (рис. 7). За этот же период в Белгородской, Воронежской, Липецкой, Тамбовской обл. урожайность увеличилась соответственно в 1.87, 1.65, 1.51, 1.82 раза. В 2016–2020 гг. наиболее низкая урожайность отмечена в Воронежской (3.62 т/га) и Тамбовской (3.67 т/га) обл.,

что во многом является следствием самого низкого в ЦЧР уровня использования удобрений. В целом в областях ЦЧР урожайность зерновых и зернобобовых культур существенно превышала средний уровень в РФ, который в 2016–2020 гг. составлял 2.72 т/га.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, в ЦЧР за 2016–2020 гг. по сравнению с 2001–2005 гг. отмечен значительный рост использования минеральных удобрений (в 1.8–7.8 раза) и объемов химической мелиорации почв (в 2.3–43.9 раза). Наиболее высокий уровень внесения минеральных удобрений (156 кг/га) был достигнут в Курской обл., органических удобрений (8.83 т/га) и известкования кислых почв (65.9 тыс. га в год) – в Белгородской. Минимальный уровень внесения минеральных удобрений (88.1 кг/га) и известкования (13.0 тыс. га) отмечен в Воронежской, а использования органических удобрений (0.24 т/га) – в Тамбовской обл. За эти же годы урожайность зерновых и зернобобовых культур увеличилась в 1.51–2.19 раза. Максимальная урожайность была достигнута в Курской (4.95 т/га) и Белгородской (4.87 т/га) обл., минимальная – в Тамбовской (3.67 т/га) и Воронежской (3.62 т/га).

2. По состоянию на 01.01.2021 г. наиболее существенное увеличение обеспеченности почв ор-

ганическим веществом, подвижными формами P_2O_5 и K_2O , снижение доли кислых почв отмечено в Белгородской обл. В пахотных почвах Тамбовской обл. зафиксировано максимальное средневзвешенное содержание органического вещества (6.5%), минимальное (4.7%) отмечено в Курской обл. Самое высокое содержание подвижных форм P_2O_5 (143 мг/кг) и K_2O (169 мг/кг) наблюдали в почвах Белгородской, а самое низкое (соответственно 88 и 106 мг/кг) – в Тамбовской обл.

3. В почвах пашни Липецкой обл. зафиксирована самая высокая доля кислых почв 77.9%, тогда как в Белгородской и Воронежской обл. она составляла 31.0%. Пахотные почвы региона в основном характеризуются низкой обеспеченностью подвижными формами цинка, меди и кобальта. Наиболее высокая доля почв, низко обеспеченных подвижными формами серы (95.1%) и марганца (88.3%), отмечалась в Тамбовской, а наиболее низкая – соответственно в Воронежской (74.7%) и Липецкой (3.1%) обл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Докучаев В.В. Русский чернозем. М.: “Книга по Требованию”, 2012. 559 с.
2. <http://www.fedstat.ru/indicators/stat.do> (дата обращения 24.04.2021 г.).
3. Некрасов Р.В., Лукин С.В., Куницын Д.А. Мониторинг основных агрохимических показателей плодородия пахотных почв в Центрально-Черноземном районе России // Достиж. науки и техн. АПК. 2021. Т. 35. № 9. С. 4–10. <https://doi.org/10.53859/02352451-2021-35-9-4>
4. Суринов А.В. Динамика агрохимических показателей плодородия черноземов лесостепной зоны ЦЧР // Агрехими. вестн. 2022. № 2. С. 8–14. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-2-002>
5. Surinov A.V. Monitoring of the agrochemical state of agricultural chernozems of the forest-steppe zone of the central chernozem region of Russia // BIO Web of Conference: Inter. Sci. and Practic. Conf., Tyumen, 19–20.07.2021. Tyumen: EDP Sciences, 2021. P. 03018.
6. Malysheva E.S. Application of geoinformation systems for a complex analysis of data from agrochemical and oil-erosion monitoring of soils // Там же. P. 03024
7. Сычев В.Г., Аристархов А.Н., Володарская И.В. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Минсельхоз, 2003. 195 с.
8. Соловichenko В.Д., Тютюнов С.И., Уваров Г.И. Воспроизводство плодородия почв и рост продуктивности сельскохозяйственных культур Центрально-Черноземного региона. Белгород: “Отчий край”, 2012. 256 с.
9. Плодородие черноземов России / Под ред. Н.З. Милащенко. М.: Агроконсалт, 1998. 688 с.
10. Сискевич Р.Ю., Корчагин Е.В., Косикова Н.А. Химическая мелиорация земель сельскохозяйственного назначения // Земледелие. 2021. № 2. С. 14–17.
11. Ивойлов А.В. Ацидогенная деградация черноземных почв и адаптивные приемы ее преодоления // Агрехимия. 2022. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.31857/S0002188122010070>
12. Лыков А.М. Ближайшие и долговременные проблемы оптимизации “гумусового хозяйства” пахотных почв РФ // Использование органических удобрений и биоресурсов в современном земледелии. М.: РАСХН–ВНИПТИОУ, 2002. С. 40–50.
13. Пилипенко Н.Г. Влияние длительного применения элементов биологизации на основные показатели плодородия почвы и продуктивность севооборота на малогумусном малокарбонатном черноземе Забайкалья // Агрехимия. 2022. № 2. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0002188122020120>
14. Semenov V.M., Pautova N.V., Lebedeva T.N. Plant residues decomposition and active organic matter in the soil of incubation experiments // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. № 10. С. 1183–1194.
15. Kiryushin V.I. The management of soil fertility and productivity of agrocenoses in adaptive-landscape farming systems // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. № 9. С. 1137–1145.
16. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Мониторинг микроэлементов в почвах (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2021. Т. 22. № 4. С. 14–26. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-4-14-26>
17. Лукин С.В., Куницын Д.А., Пироженко В.В. Мониторинг содержания серы и микроэлементов в почвах Центрально-Черноземного района России // Достиж. науки и техн. АПК. 2022. Т. 36. № 1. С. 4–7. <https://doi.org/10.53859/02352451-2022-36-1-4>
18. Жуйков Д.В. Мониторинг содержания цинка в агроценозах Белгородской обл. // Агрехим. вестн. 2021. № 4. С. 14–19. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-4-003>
19. Жуйков Д.В. Мониторинг содержания марганца, цинка и кобальта в черноземе обыкновенном // АгроЭкоИнфо. 2021. № 4 (46). <https://doi.org/10.51419/20214416>
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. Левшаков Л.В., Пироженко В.В. Сера в почвах Курской обл. // Агрехим. вестн. 2022. № 3. С. 49–53. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-3-009>
22. Сискевич Ю.И., Никоноренков В.А., Долгих О.В. Почвы Липецкой области. Липецк: Изд-во ООО “Позитив Л”, 2018. 209 с.

Monitoring of Agroecological Condition of Arable Soils of the Central Chernozem Region of Russia

S. V. Lukin^{a,b,#}

^a*Agrochemical Service Center "Belgorodsky"
ul. Shchorsa 8, Belgorod 308027, Russia*

^b*Belgorod State National Research University
ul. Pobedy 85, Belgorod 308015, Russia*

[#]*E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru*

Based on the analysis of the results of agroecological monitoring, it was found that in the Central Chernozem region (CCR) for 2016–2020, compared with 2001–2005, there was a significant increase in the use of mineral fertilizers (1.8–7.8 times) and the volume of chemical soil reclamation (2.3–43.9 times). The highest level of application of mineral fertilizers (156 kg/ha) was achieved in the Kursk region, organic fertilizers (8.83 t/ha) and liming of acidic soils (65.9 thousand hectares per year) – in the Belgorod region. The minimum level of mineral fertilizers (88.1 kg/ha) and liming (13.0 thousand ha) was registered in Voronezh, and the use of organic fertilizers (0.24 t/ha) – in the Tambov regions. Over the same years, the yield of grain and leguminous crops increased by 1.51–2.19 times. The maximum yield was achieved in Kursk (4.95 t/ha) and Belgorod (4.87 t/ha) regions, the minimum – in Tambov (3.67 t/ha) and Voronezh (3.62 t/ha). As of 01.01.2021, the most significant increase in the provision of soils with organic matter, mobile forms of P₂O₅ and K₂O, a decrease in the proportion of acidic soils was noted in the Belgorod region. In arable soils of the Tambov region the maximum weighted average content of organic matter (6.5%) was recorded, the minimum (4.7%) was noted in the Kursk region. The highest content of mobile forms of P₂O₅ (143 mg/kg) and K₂O (169 mg/kg) was observed in the soils of Belgorod, the lowest (respectively 88 and 106 mg/kg) – in the Tambov regions. The highest proportion of acidic soils (77.9%) was recorded in the soils of arable land in the Lipetsk region, while in the Belgorod and Voronezh regions it was 31.0%. Arable soils of the region are mainly characterized by low availability of mobile forms of zinc, copper and cobalt. The highest proportion of soils with low availability of mobile forms of sulfur (95.1%) and manganese (88.3%) was noted in the Tambov region, the lowest – respectively in the Voronezh (74.7%) and Lipetsk (3.1%) regions.

Key words: agrochemical examination, liming, potassium, soil acidity, trace elements, soil organic matter, sulfur, phosphorus, fertilizers, yield.

УДК 631.42:631.46:631.445:632.111.7

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАХОТНЫХ ПОЧВ ПРИ РАЗНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА ПРОМЕРЗАНИЯ¹

© 2023 г. В. Н. Пинской^{1,*}, Н. Н. Каширская¹, А. О. Алексеев¹,
В. В. Мальшев¹, А. В. Борисов¹

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, корп. 2, Россия

*E-mail: pinskoy@inbox.ru

Поступила в редакцию 16.12.2022 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Представлены результаты 2-летнего вегетационного опыта по изучению влияния длительности безморозного периода на химические свойства и биологическую активность агрокаштановых почв и агрочернозема. В задачу эксперимента входила оценка изменения почвенных свойств, которые могут происходить при дальнейшем потеплении климата и сокращении времени пребывания почв в замерзшем состоянии. Первый вариант опыта предусматривал инкубацию почв в замерзшем состоянии в зимний период на протяжении 160 сут, второй – 56 сут, в третьем варианте почву инкубировали весь зимний период при температуре $>0^{\circ}\text{C}$. Перед зимним инкубированием почву увлажняли до 60% ПВ, вносили минеральные удобрения и солому. Весной в почву сеяли яровую пшеницу сорта Злата селекции Московского НИИСХ “Немчиновка”. На протяжении всего вегетационного периода образцы почв находились в вегетационном павильоне в условиях естественной увлажненности и освещенности. Отбор образцов и измерения биологических свойств проводили в весенний период через 10 сут после того, как образцы переносили из холодильника в вегетационный павильон. Установлено, что в зависимости от длительности периода промерзания исследованных почв наиболее чувствительными показателями на изменение температуры оказались микробная биомасса (С-СИД), скорость базального дыхания (V-БАЗ) микробного сообщества и численность микроорганизмов (КОЕ), растущих на почвенном агаре и на богатой среде. В почвах, которые инкубировали без замораживания, были самые низкие показатели С-СИД и V-БАЗ. Увеличение периода промерзания почвы отразилось на кислотности почв. В вариантах с длительным замораживанием во 2-й год исследования величина рН увеличилась. Для агрочернозема отмечено снижение содержания P_2O_5 по мере увеличения периода промерзания. Для агрокаштановых почв эта закономерность была менее выраженной. В этих почвах была выявлена тенденция к снижению соотношения С : N при увеличении времени пребывания в замерзшем состоянии. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$, а также макро- и микроэлементов во всех вариантах практически не изменялось за 2 года эксперимента.

Ключевые слова: биологическая активность, пашня, безморозный период почв, агрокаштановые почвы, агрочерноземы.

DOI: 10.31857/S0002188123040105, EDN: DJINTK

ВВЕДЕНИЕ

Влиянию современного повышения температуры на почвенные свойства посвящено множество работ. Известно, что повышение температуры в зимний период способствует уменьшению глубины промерзания почвы, в связи с чем изменяются условия поглощения талых вод. Это приводит к более глубокому промачиванию почв в

весенний период и сокращению величины весеннего стока. На примере уплотненной пашни объекта, исследования которого проводили с 1973 г., показано, что смыв уменьшился в 6.2 раза [1].

Весьма значительные изменения, связанные с современным потеплением климата, затрагивают и биологические свойства почв. Актуальным исследованием и сегодня остается определение дыхательной активности почв во время оттаивания после зимнего периода. В среднем эмиссия углекислого газа из таких почв составляет 19–70% от их начальной дыхательной активности при 10°C .

¹ Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 19-29-05178 мк “Ретроспективный анализ и сценарий возможных изменений почв и экосистем степной зоны Европейской части России в условиях глобальных изменений климата”.

В дальнейшем наблюдали резкий рост почвенного дыхания, что связывали с ассимиляцией оставшихся клетками легкодоступного пула углерода, образовавшегося в результате отмирания части микробного сообщества при замерзании почв [2].

Потепление климата зачастую связывают с парниковым эффектом. Увеличение температуры напрямую зависит от повышающихся концентраций CO_2 , N_2O , CH_4 в атмосфере. За последние 100 лет отмечено возрастание температуры воздуха на всех континентах на $0.3\text{--}1.5^\circ\text{C}$ [3], а в месте с ней и увеличивается концентрации CO_2 в атмосфере. Повышение концентрации углекислого газа в данном случае может рассматриваться как своего рода дополнительный фактор атмосферного удобрения, который способствует увеличению продуктивности растений и активности почвенных микроорганизмов [4]. Показано, что повышение температуры привело к увеличению урожая зерновых культур в южных регионах России (Поволжье, Южном ФО) в период с 1975 по 2010 г. Возможно, это также связано с большим накоплением атмосферной влаги в почвах в зимне-весенний период. В то же время потепление климата негативно сказалось на урожае ранних яровых и озимых культур в Центрально-Черноземном регионе, что, по-видимому, связано с сокращением влагообеспеченности летнего периода и образованием почвенных засух [5].

В среднем, для европейской части России за последние 100 лет отмечено возрастание температуры на $1.2\text{--}1.3^\circ\text{C}$. Подобные изменения климата отражаются и на зональном ряде почв, а именно на смещении почвенно-климатических зон в северном направлении. Например, в лесных почвах северной и средней тайги с повышением температуры будет уменьшаться подзолистый процесс и усиливаться дерновый. В сухостепных зонах по мере увеличения аридизации, вероятно, усилятся процессы засоления почв [3].

Следует отметить, что в большинстве публикаций влияние потепления климата на почвенные свойства рассматривают в контексте изменений условий летнего периода, либо в целом за год. Слабоизученным вопросом остается влияние повышения зимних температур на химические и микробиологические свойства почв. В то же время вполне вероятно, что дальнейшие изменения климата будут сопровождаться повышением зимних температур. В этом случае могут происходить качественные изменения состояния почв: почвы ряда регионов нашей страны могут перейти из фации умеренно- или кратковременно промерзающих в непромерзающие. В связи с этим цель ра-

боты – изучение изменений микробиологических и химических свойств почв в условиях разной длительности пребывания в замерзшем состоянии в зимний период.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования были выбраны 2 типа пахотных почв: агрокаштановые почвы и агрочерноземы. Отбор образцов осуществляли в однотипных геоморфологических и литологических условиях.

Агрокаштановые почвы отбирали на территории Ремонтненского р-на Ростовской обл. Территория расположена в зоне сухих степей. Климат сухой и жаркий, длительность периода без мороза – $170\text{--}180$ сут. Сумма осадков в течение года – $340\text{--}415$ мм, из них в летнее время года – $175\text{--}240$ мм. Испарение влаги за год равно 975 мм. Почвообразующие породы представлены лессовидными карбонатными суглинками, подстилаемые неогеновыми глинами. В почвенном покрове преобладают каштановые почвы и солонцы восточно-европейской фации, теплые, промерзающие ($2\text{--}3$ мес.) [6]. Разделенность территорий овражно-балочной сети доходит до 0.27 км/км², что обеспечивает хорошие условия дренированности.

Образцы агрочернозема были отобраны в Богучарском р-не Воронежской обл. (центральная часть Русской равнины). Климат умеренно-континентальный с хорошо выраженными сезонами года: зима – холодная, лето – теплое. На территории преобладают западные, северо-западные и юго-восточные ветра. Осадки распределяются неравномерно: максимальное количество осадков выпадает в июне – 60.6 мм, минимальное – в марте (28.6 мм). Среднее количество осадков – от 450 до 550 мм. Нестабильность и низкая толщина снежного покрова вызывает глубокое, до 70 см, промерзание почвы (в течении $3\text{--}4$ мес.) [7].

В июле 2019 г. было отобрано по 100 кг агрокаштановой и агрочерноземной почвы из пахотного горизонта в полевой влажности. В лабораторных условиях почву высушивали и просеивали через сито 5 мм.

В каждую почву осенью вносили солому (из расчета 50 ц/га) и нитрофоску (из расчета N90P90K90). Солому перед внесением мелко измельчали до фрагментов $\approx 1\text{--}2$ см. После ее тщательно перемешивали с почвой и рассыпали смесь по контейнерам объемом 5 кг, что позволило сделать по 6 повторностей для каждого варианта опыта.

Таблица 1. Некоторые химические и биологические свойства инкубационных почв с разной продолжительностью периода промерзания

Вариант (длительность периода промерзания, сут)	Номер образца	C _{орг}	N	S	Коэффициент дыхательной активности (Q _г)	Индекс олиготрофности	
		%				БС : ПА	
Агрокаштановая почва, 1-й год эксперимента							
Фон	0	1	1.2	0.10	0.017	0.28 ± 0.02	354 ± 8
		2	1.0	0.09	0.015	0.35 ± 0.01	271 ± 5
		3	1.0	0.09	0.013	0.41 ± 0.03	249 ± 5
	56	4	1.1	0.10	0.014	0.24 ± 0.02	270 ± 4
		5	1.1	0.10	0.015	0.61 ± 0.02	310 ± 7
		6	1.1	0.10	0.014	0.10 ± 0.02	333 ± 7
	160	7	1.0	0.09	0.013	0.20 ± 0.01	270 ± 6
		8	1.1	0.10	0.016	0.22 ± 0.02	330 ± 9
		9	1.1	0.10	0.014	0.43 ± 0.03	290 ± 10
		1.1	0.10	0.013	0.13 ± 0.01	270 ± 10	
Агрокаштановая почва, 2-й год эксперимента							
Фон	0	1	1.0	0.09	0.013	0.39 ± 0.02	259 ± 16
		2	1.0	0.09	0.022	0.38 ± 0.03	272 ± 15
		3	1.1	0.10	0.016	0.46 ± 0.01	290 ± 18
	56	4	1.0	0.10	0.013	0.38 ± 0.06	453 ± 15
		5	1.0	0.10	0.013	0.37 ± 0.04	508 ± 8
		6	1.1	0.10	0.015	0.42 ± 0.03	745 ± 59
	160	7	1.0	0.10	0.012	0.34 ± 0.06	230 ± 9
		8	1.0	0.10	0.012	0.44 ± 0.02	264 ± 11
		9	1.1	0.10	0.013	0.43 ± 0.07	279 ± 9
Агрочернозем, 1-й год эксперимента							
Фон	0	1	5.3	0.42	0.074	0.23 ± 0.04	311 ± 33
		2	4.9	0.39	0.043	0.13 ± 0.02	230 ± 9
		3	5.1	0.41	0.044	0.17 ± 0.03	264 ± 12
	56	4	5.0	0.39	0.043	0.15 ± 0.01	279 ± 10
		5	5.1	0.41	0.048	0.12 ± 0.01	239 ± 16
		6	5.1	0.40	0.045	0.16 ± 0.02	274 ± 14
	160	7	5.1	0.41	0.046	0.20 ± 0.03	309 ± 8
		8	5.0	0.40	0.053	0.25 ± 0.02	296 ± 7
		9	5.0	0.40	0.052	0.20 ± 0.02	291 ± 7
		5.1	0.41	0.047	0.12 ± 0.01	333 ± 11	
Агрочернозем, 2-й год эксперимента							
Фон	0	1	4.9	0.40	0.050	0.45 ± 0.04	193 ± 16
		2	4.9	0.40	0.043	0.46 ± 0.03	278 ± 18
		3	5.1	0.40	0.042	0.50 ± 0.01	268 ± 14
	56	4	5.0	0.40	0.044	0.51 ± 0.02	252 ± 11
		5	4.9	0.40	0.042	0.51 ± 0.02	291 ± 12
		6	5.1	0.40	0.043	0.56 ± 0.06	303 ± 13
	160	7	4.9	0.40	0.044	0.52 ± 0.01	203 ± 12
		8	4.9	0.40	0.045	0.55 ± 0.01	180 ± 11
		9	4.9	0.40	0.043	0.48 ± 0.02	226 ± 13

Перед зимним инкубированием почву увлажняли до 60% ПВ и помещали в пластиковые контейнеры. Для обмена почвенных газов были проделаны технологические отверстия в верхней части контейнеров (6 шт. диаметром 5 мм). До наступления морозов почву инкубировали в вегетационном павильоне при естественных температурных условиях. После первых заморозков (20 ноября) контейнеры с почвой инкубировали согласно схеме опыта. Первый вариант опыта помещали в морозильную камеру при температуре -12°C на 160 сут. Второй вариант опыта помещали в морозильник при температуре -12°C на 56 сут, после чего переносили в холодильник и инкубировали до весны при температуре $6-8^{\circ}\text{C}$. Третий вариант опыта поместили в холодильник и инкубировали на протяжении всего зимнего периода при температуре $6-8^{\circ}\text{C}$.

Через 160 сут контейнеры с почвой переносили в вегетационный павильон. Отбор образцов почв на анализы проводили через 10 сут инкубации в естественных условиях. Из каждого контейнера отбирали по 50 г почвы. Образцы доводили до воздушно-сухого состояния и усредняли. В середине мая проводили посев пшеницы яровой сорта Злата (*Triticum aestivum* L.) селекции Московского НИИСХ “Немчиновка” (всхожесть пшеницы – 95%). В каждом контейнере площадью 27×27 см оставляли по 9 растений. Растения развивались в условиях атмосферного увлажнения и освещенности.

В конце вегетационного периода определяли урожай и величину наземной фитомассы. После этого в почву вносили удобрения и солому, увлажняли до 60% ПВ и инкубировали в вегетационном павильоне до наступления морозов. Далее образцы переносили в морозильник и холодильник в соответствии со схемой опыта.

На следующий год проводили все описанные выше действия в аналогичном порядке.

Отбор почвенных образцов на анализы проводили после зимнего инкубирования. Из каждого контейнера отбирали по 50 г почвы. Образцы доводили до воздушно-сухого состояния и усредняли.

В образцах определяли такие биологические показатели как: скорость базального дыхания (**V-BA3**) [8], содержание микробной биомассы по скорости субстрат-индуцированного дыхания (**C-СИД**) [9], расчет коэффициента устойчивости микробных сообществ (**Qr**) [10]. Также проводили оценку активности фермента уреазы [11] и фосфатазы [12].

Для оценки индекса олиготрофности микробного сообщества [13] проводили посеvy на твердые питательные среды. Учет олиготрофных мик-

роорганизмов, использующих элементы питания из рассеянного состояния, производили на почвенном агаре (**ПА**) следующего состава (г/л): почва – 200, агар – 20.

Для учета микроорганизмов, разлагающих растительные остатки, использовали богатую органическую среду (**БС**) следующего состава (г/л): сухой питательный агар – 3, пептон – 3, триптон – 1, дрожжевой экстракт – 1, глюкоза – 1, агар – 20. Индекс олиготрофности рассчитывали по формуле $\text{ПА/БС} \times 100$, где ПА – численность микроорганизмов (**КОЭ**), растущих на почвенном агаре, БС – численность микроорганизмов (**КОЭ**), растущих на богатой среде.

В исследованных почвах определяли следующие химические свойства: содержание углерода, азота и серы на (C/H/N)-анализаторе [14], K_2O и P_2O_5 определяли по Мачигину, pH – традиционными методами [15]. Концентрацию макро- (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , MnO , CaO , Na_2O) и микроэлементов (Ba, Co, Cr, Cu, Cs, Ga, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sn, Sr, Y, V, Zn, Zr) выполняли по методике измерения массовой доли элементов и оксидов в порошковых пробах методом рентгенофлуоресцентного анализа (M049-П/04) с помощью настольного WD-XRF кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра “BRUKER JAGUAR S6”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета наиболее точного среднего показателя каждого варианта опыта использовали достаточно репрезентативную выборку. Каждый вариант опыта состоял из 3-х повторностей, в свою очередь каждая повторность была разделена на 2 контейнера. В лабораторных условиях каждый отобранный образец анализировали в трехкратной повторности (для выявления ошибки в эксперименте), таким образом, вычисления среднего показателя одного параметра осуществляли по 18-ти результатам. На графиках бокс-плот показано варьирование химических свойств и биологической активности в агрокаштановых и агрочерноземных почвах в зависимости от длительности периода промерзания в зимний период (рис. 1, 2).

Влияние длительности периода промерзания на урожай. В 1-й год минимальный урожай пшеницы был зафиксирован для чернозема в варианте с 160 сут промерзания. Различия между вариантами 56 и 0 сут промерзания были примерно одинаковыми (средняя наземная фитомасса для каждого контейнера была равна ≈ 15 г) (рис. 3).

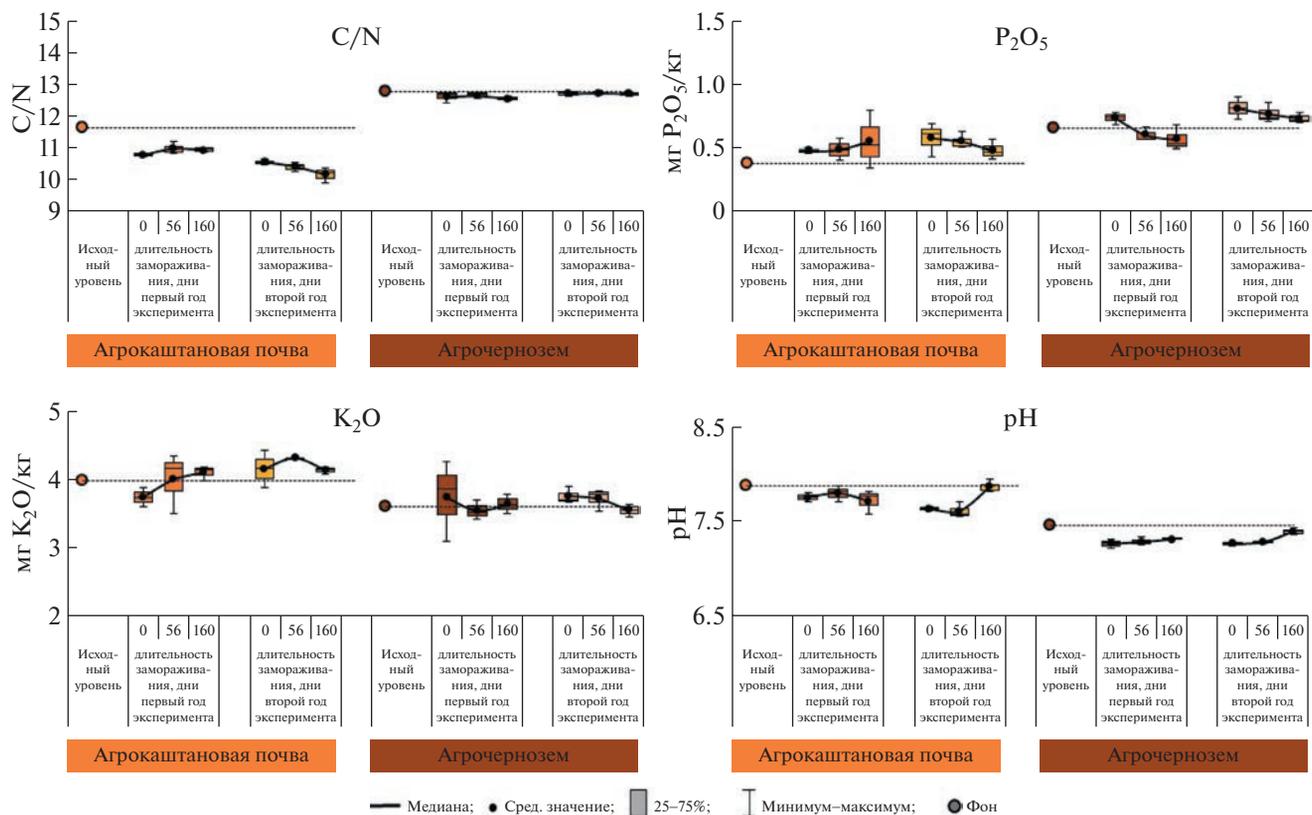


Рис. 1. Изменения некоторых химических свойств почв за 1-й и 2-й год эксперимента с разной длительностью периода промерзания.

Для агрокаштановой почвы минимальная урожайность в 1-й год была в варианте с продолжительностью промерзания 56 сут (≈ 15 г/контейнер), максимальная – при инкубировании почвы при положительных температурах на протяжении всего зимнего периода (≈ 18 г/контейнер). Обратная закономерность для агрокаштановых почв была выявлена во 2-й год эксперимента, где общая фитомасса и урожай были больше в варианте с продолжительностью промерзания 56 сут.

В вариантах с агрочерноземом во 2-й год эксперимента наблюдали закономерное возрастание наземной фитомассы по мере уменьшения периода промерзания. Также во 2-й год эксперимента относительно 1-го увеличилась фитомасса в образцах, которые промерзли 160 сут, – на 2 г, 56 сут – на 4 г, без промерзания – на 6 г.

Варьирование химических свойств агрокаштановых и агрочерноземных почв. Содержание $C_{орг}$ в фоновых почвах было на уровне 1.15% в агрокаштановой и 5.34% – в агрочерноземе. После 2-х лет эксперимента наблюдали общее незначительное снижение содержания углерода в 1-й и 2-й год

эксперимента (на $\approx 0.1\%$). Между вариантами опыта особых различий выявлено не было.

Содержание азота в исследованных агрокаштановых почвах менялось в пределах 0.09–0.1%, в агрочерноземах – 0.38–0.41% за 1-й и 2-й период эксперимента. Содержание азота в фоновых почвах было приблизительно равным почвам эксперимента.

Отношение углерода к азоту (C : N) в агрочерноземной почве практически не различалось в вариантах с разной длительностью промерзания как в 1-й, так и во 2-й год эксперимента (рис. 1).

Иная закономерность была выявлена для агрокаштановых почв. В первый год эксперимента наименьшее отношение C : N было в вариантах без промерзания. На 2-й год эксперимента в этом же варианте опыта величина C : N осталась на прежнем уровне. В то же время наблюдали характерное уменьшение величины C : N по мере увеличения времени промерзания агрокаштановых почв.

Как правило, внесение минеральных удобрений благоприятно сказывается на увеличении урожая сельхозкультур [16]. Внесение аммофоски

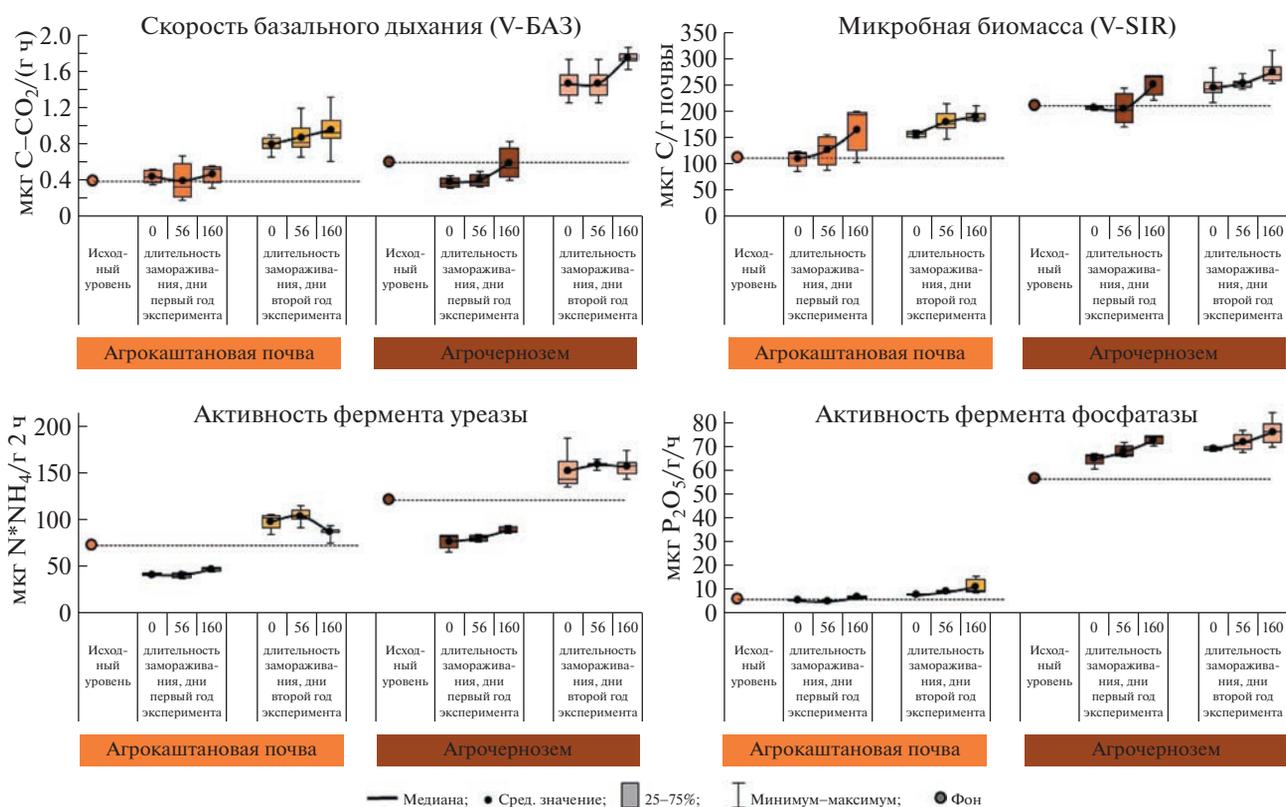


Рис. 2. Изменения биологической активности почв за 1-й и 2-й год эксперимента с разной длительностью периода промерзания.

из расчета N90P90K90 в нашем случае является, по-видимому, завышенной дозой. Среднему содержанию P_2O_5 в агрокаштановых почвах и агрочерноземах, как правило, должно соответствовать 0.25 мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{кг}$, K_2O – 2.5 мг/кг [17, 18]. Также стоит обратить внимание на содержание этих элементов в фоновой почве (рис. 1), где показано, что вклад P_2O_5 и K_2O изначально был высоким. В работе [19] указано, что потребность во внесении дополнительных фосфорных и калийных удобрений в такие почвы очень низкая.

Содержание P_2O_5 в агрокаштановых почвах в 1-й и 2-й год эксперимента несколько повысилось относительно фона (рис. 1). По мере возрастания продолжительности промерзания во 2-й год эксперимента отмечена тенденция к снижению содержания P_2O_5 в агрокаштановых почвах. Схожая тенденция прослежена в агрочерноземах как в 1-й, так и во 2-й год опыта. Варьирование содержания K_2O было менее заметным, в агрокаштановых почвах этот показатель изменялся в пределах 3.5–4.4, в агрочерноземах – 3.1–4.3 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$.

Известно, что внесение минеральных удобрений вызывает некоторое смещение величины pH в кислую область [20]. На рис. 1 видно, что относительно фона в образцах эксперимента почва была более кислой. При этом эффект подкисления был минимальным в варианте с длительным периодом промерзания почвы. Подкислению почвы в нашем случае могла способствовать и высокая влажность (60% ПВ) – использование дистиллированной воды, внесение соломы и связанное с этим развитие грибной микрофлоры, а также разные гидротермические условия [21].

Исключением были почвы с периодом промерзания 160 сут, в этом случае во 2-й год эксперимента величина pH была близка к фоновому варианту, как в агрокаштановой почве, так и в агрочерноземе. В этих образцах происходило значительно меньшее выделение CO_2 микроорганизмами, который, растворяясь в почвенном растворе, образовывал H_2CO_3 [20]. Можно предположить, что длительность промерзания косвенно влияла на изменение pH через активность микроорганизмов.

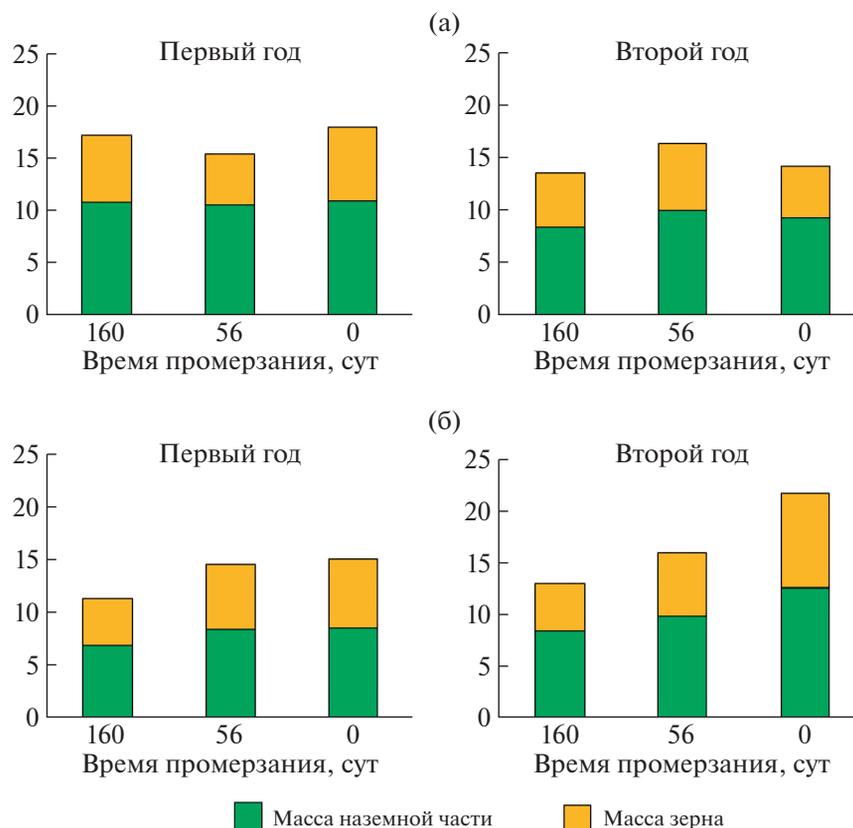


Рис. 3. Величина урожая и наземной фитомассы яровой пшеницы (г) при выращивании на ореховатой почве (а) и агрочерноземе (б).

В ходе эксперимента отмечено снижение содержания серы в почве, особенно это было заметно в вариантах с агрочерноземом. Известно, что потребность культурных растений в сере высока, этот показатель не должен опускаться $<0.065\%$ г [22]. Максимальное содержание S в исследованных почвах было в агрочерноземе – 0.07% . Во всех вариантах опыта с агрочерноземной почвой содержание S было значительно меньше ($0.05\text{--}0.04\%$), чем в фоновой почве. Наиболее заметное снижение ее содержания было отмечено во 2-й год в варианте промерзания в течение 160 сут. Вероятно, некое увеличение количества серы в непромерзающих образцах 2-го года эксперимента было связано с более кислой средой и менее быстрым выщелачиванием, чем при промерзании [23]. Содержание S в ореховатой почве изначально было не высоким (0.017%) и практически не изменялось в вариантах опыта.

В это же время анализ валового химического состава показал, что в ходе 2-летнего эксперимента концентрации макро- (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , MnO , CaO , Na_2O) и микроэлементов (Ba, Co, Cr, Cu, Cs, Ga, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sn,

Sr, Y, V, Zn, Zr) в почвах эксперимента не изменялись и не зависели от продолжительности периода промерзания.

Изменения биологической активности почв. В 1-й год эксперимента различный период промерзания повлиял незначительно на скорость базального дыхания (V-БАЗ) ореховатой почвы (рис. 2), средние величины которой были на одном уровне с фоновой почвой. Скорость дыхания (V-БАЗ) микроорганизмов агрочерноземной почвы в образцах при наибольшем периоде промерзания была аналогична V-БАЗ микроорганизмов фоновой почвы и существенно больше, чем в образцах с меньшим периодом промерзания.

Во 2-й год эксперимента интенсивность базального дыхания ореховатой почвы увеличилась в 2 раза ($1.0\text{--}0.8$ мкг $\text{C-CO}_2/\text{г/ч}$), агрочернозема – в 3 раза ($1.75\text{--}1.4$ мкг $\text{C-CO}_2/\text{г/ч}$). Выявлена тенденция к усилению интенсивности базального дыхания в зависимости от увеличения периода промерзания почвы в зимний период.

Длительность периода промерзания существенным образом отразилась на величине мик-

робной биомассы (**МБ**) как в агрокаштановой почве, так и в агрочерноземе (рис. 2). В целом величина МБ в агрочерноземе была больше на ≈ 100 мкг С/г, чем в агрокаштановой. Выявлена закономерность для почв, которые инкубировали при плюсовых температурах и почв с малым периодом промерзания (56 сут). В этих вариантах микробная биомасса была схожей с фоновой почвой (агрокаштановая – 110, агрочернозем – 210 мкг С/г).

Во 2-й год эксперимента отмечено увеличение показателя микробной биомассы во всех вариантах опыта, но в меньшей степени. Максимальная МБ как в агрокаштановой почве (190 мкг С/г), так и агрочерноземе (275 мкг С/г), была отмечена в варианте с максимальной длительностью периода промерзания (160 сут). С уменьшением периода промерзания почвы закономерно снижалась интенсивность субстрат-индуцированного дыхания. Возможной причиной этого было отмирание части микробного сообщества и формирование пула доступного углерода для оставшейся части микробиоты почв.

Коэффициент дыхательной активности Q_t , рассчитанный по отношению скоростей базального и субстрат-индуцированного дыхания, дает представление об устойчивости микробных сообществ почв в условиях разной длительности периода промерзания. В стрессовых условиях отмечено увеличение этого показателя [10]. Исследования, проведенные в 1-й год, показали, что наиболее устойчивые микробные сообщества были в агрокаштановых почвах в условиях наибольшего периода промерзания – 160 сут. В агрочерноземах ситуация была обратной: величина Q_t была минимальной в варианте без промерзания. Сравнение устойчивости микробных сообществ 1-го и 2-го года эксперимента существенно различались как в агрокаштановой (в 1.5 раза), так и в агрочерноземной (2.5 раза) почве. Нарушение устойчивости микробных сообществ по сравнению с предыдущим годом указывало на перестройку микробиоты почв.

Активность фермента уреазы (**УА**), осуществляющей гидролитическое расщепление мочевины с образованием аммиака и углекислого газа, показана на рис. 1. Относительно почв фона УА была меньше в 1-й год эксперимента как в агрокаштановой почве, так и в агрочерноземе. В варианте с максимальной длительностью периода промерзания (160 сут) как в агрокаштановой почве (46.5 мкг N-NH₄/г/2 ч), так и в агрочерноземе (89 мкг N-NH₄/г/2 ч) УА была незначительно больше, чем в вариантах с длительностью про-

мерзания почвы 56 сут, и в вариантах, инкубированных при плюсовых температурах.

Значительное возрастание УА наблюдали в почвах 2-го года эксперимента, что вероятно свидетельствовало об интенсификации процесса минерализации сложных органических азотсодержащих соединений в почве. Относительно 1-го года эксперимента активность фермента уреазы в агрокаштановой почве и в агрочерноземе в среднем возросла более чем в 2 раза.

В отличие от показателей МБ и интенсивности базального дыхания максимальная активность фермента уреазы зафиксирована в агрокаштановых почвах, период промерзания которых составлял 56 сут – 115 мкг N-NH₄/г/2 ч. В агрочерноземе наибольшая активность уреазы была в варианте без промерзания – 187 мкг N-NH₄/г/2 ч, но величины средних были примерно одинаковыми во всех вариантах опыта.

Численность бактерий, растущих на богатой среде (БС), в агрочерноземной почве 1-го года эксперимента была больше, чем в фоновой почве. Численность бактерий, растущих на БС, в этом же году в эксперименте с агрокаштановой почвой также была больше относительно фона, но это различие было менее существенным. В 1-й год эксперимента в агрочерноземе наблюдали снижение численности микроорганизмов, растущих на БС по мере увеличения периода промерзания относительно непромерзающих почв (в 1.3–1.5 раза). Аналогично это проявлялось и во 2-й год эксперимента (в 2.7–2.5 раза). В этих же образцах соответственно снизилась и способность микроорганизмов разлагать растительные остатки. Численность микроорганизмов (КОЕ), растущих на БС, в почвах, период промерзания которых составил 56 и 160 сут, на 2-й год эксперимента стала меньше, чем в фоновой почве.

В агрокаштановой почве численность микроорганизмов, растущих на БС, была одинаковой в образцах безморозного периода и в образцах с продолжительностью промерзания 160 сут, в варианте с продолжительностью промерзания 56 сут численность микроорганизмов, растущих на БС, была незначительно меньше. Интересная закономерность выявлена во 2-й год эксперимента в этих вариантах. В агрокаштановых почвах наблюдали противоположную тенденцию, чем в агрочерноземах: численность микроорганизмов, растущих на богатой среде, возрастала при увеличении продолжительности периода промерзания.

Численность микроорганизмов, растущих на почвенном агаре, в агрочерноземных почвах (в

1-й и 2-й год) и фоновой варьировала аналогичным образом с численностью микроорганизмов, растущих на БС. Иная закономерность была выявлена для агрокаштановых почв. В 1-й год эксперимента в вариантах опыта с непромерзавшей почвой и промерзавшей 56 сут основная масса выборки данных была меньше фоновых показателей. Тогда как в варианте с продолжительностью промерзания 160 сут в половине случаев численность олиготрофных микроорганизмов была больше, чем в фоновой почве. Второй год эксперимента привел к уменьшению численности олиготрофных микроорганизмов в образцах агрокаштановой почвы, не подвергшихся замораживанию (в 1.3–4.0 раза по отношению к фону). В образцах почвы в вариантах с продолжительностью промерзания 56 и 160 сут во 2-й год наблюдали значительное увеличение данного показателя.

По результатам оценки общей численности олиготрофных микроорганизмов и бактерий, способных использовать растительные остатки, был рассчитан индекс олиготрофности (ИО) микробных сообществ. Как правило, в естественных условиях увеличение индекса олиготрофности обычно происходит при недостатке доступного органического вещества в почве и часто связано с аридизацией климата [13, 24]. В 1-й год эксперимента с агрочерноземом отмечено увеличение ИО по мере увеличения периода промерзания почвы. Эти величины находились в пределах фона. Во 2-й год эксперимента доля олиготрофных микроорганизмов, растущих на ПА, снижалась в вариантах без промерзания и в вариантах с промерзанием в течение 160 сут. Вероятно, аэрация и внесение удобрений и соломы обусловили снижение ИО, что привело к созданию благоприятных условий для роста микроорганизмов, растущих на БС. Соотношение ПА : БС в варианте с периодом промерзания 56 сут не изменилось во 2-й год опыта.

В агрокаштановой почве, как в 1-й год эксперимента, так и во 2-й, величина ИО была больше в вариантах с периодом промерзания 56 сут. Интересен также тот факт, что в этом варианте опыта в 1-й год ИО был меньше фона, тогда как во 2-й год, наоборот, значительно больше.

В целом в вариантах без промерзания и в вариантах с промерзанием в течение 160 сут численность микроорганизмов, растущих на богатой среде, была больше. Эта было особенно заметно во 2-й год в образцах с максимальной длительностью промерзания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, продолжительность пребывания почвы в замерзшем состоянии в зимний период оказывала заметное влияние на некоторые химические свойства и биологическую активность почв.

В большей мере увеличение продолжительности периода промерзания почвы отразилось на величине рН. В вариантах промерзания 160 сут во 2-й год исследования величина рН возросла. Содержание P_2O_5 в агрочерноземе в 1-й и во 2-й год опыта снижалось по мере увеличения продолжительности промерзания почв. В меньшей мере это было выражено для агрокаштановых почв во 2-й год эксперимента. Как в агрокаштановой, так и в агрочерноземной почве содержание $C_{орг}$, макро- и микроэлементов практически не изменялось от влияния разных температур в зимний период.

Влияние длительности безморозного периода в большей мере отразилось на микробиологических показателях почв. Величина микробной биомассы, рассчитанная по величине показателя С-СИД, закономерно снижалась при уменьшении продолжительности периода промерзания как агрокаштановых почв, так и агрочернозема. Схожая тенденция была выявлена для скорости базального дыхания (V-БАЗ) почвенного микробного сообщества. Эта тенденция изменения показателя была обусловлена отсутствием отмирания части микробного сообщества в морозный период, что формировало дополнительный пул легкодоступного углерода для питания оставшейся части микробного сообщества.

Уровень фосфатазной активности также снижался по мере уменьшения длительности периода промерзания, но в меньшей степени.

Активность фермента уреазы и дыхательный коэффициент Q_г в вариантах опыта в исследованных как агрокаштановых, так и агрочерноземных почвах практически не изменялась и варьировала в пределах погрешности.

Индекс олиготрофности (ИО) во 2-й год эксперимента во всех типах почв был больше в вариантах, с длительностью промерзания 56 сут. В почвах, которые инкубировали при положительных температурах, а также в варианте с длительностью промерзания 160 сут величина ИО была меньше фоновых показателей, что указывало на увеличение численности микроорганизмов, растущих на богатой среде и разлагающих растительные остатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев И.Ф., Левицкая Н.Г., Стрижков Н.И.* Современная оценка и тенденции климатических изменений поверхностного стока на черноземных почвах // Аграрн. научн. журн. Саратов, 2016. № 4. С. 19–24.
2. *Курганова И.Н., Типе Р.* Влияние процессов заморозания–оттаивания на дыхательную активность почв // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1095–1105.
3. *Худяков О.И., Решоткин О.В.* Эволюция почв в связи с современным потеплением климата // Теор. и прикл. экол. 2017. № 2. С. 38–43.
4. *Кудяров В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А.* Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.
5. *Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семендяев А.К.* Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // Агрофизика. 2011. Т. 3. С. 31–39.
6. *Фетюхин И.В., Авдеенко А.П., Черненко В.В., Рябцева Н.А.* Системы земледелия: научные основы и региональный аспект. Учеб. пособ. Пос. Персиановский: Донской ГАУ, 2016. 172 с.
7. *Агроклиматический справочник по Воронежской области.* Л.: Гидрометеиздат, 1958. 166 с.
8. *Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Б., Мякина Т.Н.* Методические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // Почвоведение. 1993. № 11. С. 72–77.
9. *Anderson J.P.E., Domsch K.H.* Physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
10. *Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д.* Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1341–1346.
11. *Kandeler E., Gerber H.* Short-term assay of urease activity using colorimetric determination of ammonium // Biol. Fertil. Soil. 1988. V. 6 № 1. P. 68–72.
12. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии / Под ред. Киреевой Н.А., Мелентьева А.И. М.: Наука, 2005. 252 с.
13. *Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Каширская Н.Н., Стретович И.В., Демкин В.А.* Характеристика микробных сообществ степных подкуранных палеопочв Сарматского времени (I–IV вв. н.э.) // Почвоведение. 2009. № 7. С. 836–846.
14. *Holmes F.L.* Elementary analysis and the origins of physiological chemistry. Isis. 1963. V. 54(1). P. 50–81.
15. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 490 с.
16. *Смирнов П.М., Муравин Э.А.* Агрохимия. Учеб. пособ. для высш. с.-х. учеб. заведений. М.: Колос, 1997. 240 с.
17. *Основы агрохимии: Метод. указания к выполнению самостоятельной работы для студентов II курса лесохоз. факультета по направлению подготовки бакалавров “Лесное дело” по теме “Расчеты доз минеральных удобрений” / Сост. З.Н. Маркина.* Брянск: БГИТА, 2012. 35 с.
18. *Цвей Я.П., Бондарь С.А., Сенчук С.М.* Формирование агрохимических показателей чернозема в зависимости от систем удобрения пшеницы озимой в севообороте // Збалансирова природокористування. 2016. № 3. С. 191–194.
19. *Агрохимия / Под ред. В.Г. Минеева.* М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
20. *Михайлова Л.А.* Агрохимия. Научные основы применения удобрений под основные полевые культуры. Пермь: ИПЦ “Прокрость”, 2015. 127 с.
21. *Лукалов В.В., Савич В.И., Панова П.Ю.* Интегральная оценка кислотно-основного состояния почв // Международ. сел.-хоз. журн. 2019. № 3. С. 65–68.
22. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 5. С. 39–47.
23. *Аристархов А.Н.* Агрохимия серы / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
24. *Demkina T.S., Popova I.V., Demkin V.A.* Characterization of the microbial communities in the modern and buried under kurgans soils of solonchic complexes in the dry steppes of the Lower Volga Region // Euras. Soil Sci. 2013. V. 7. P. 768–777.
<https://doi.org/10.1134/S106422931307003X>

Changes in the Chemical and Biological Properties of Arable Soils with Different Duration of the Freezing Period

V. N. Pinskoy^{a, #}, N. N. Kashirskaya^a, A. O. Alekseev^a, V. V. Malyshev^a, and A. V. Borisov^a

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

[#]*E-mail: pinskoy@inbox.ru*

The results of a 2-year vegetation experiment to study the effect of the duration of the frost-free period on the chemical properties and biological activity of agrokashtan soils and agrochernozem are presented. The task of the experiment was to assess changes in soil properties that may occur with further warming of the climate and a reduction in the time of stay of soils in the frozen state. The first variant of the experiment provided for incubation of soils in a frozen state in winter for 160 days, the second – 56 days, in the third variant, the soil

was incubated throughout the winter period at a temperature of $>0^{\circ}\text{C}$. Before winter incubation, the soil was moistened to 60% of FMC, mineral fertilizers and straw were applied. In the spring, spring wheat of the Zlata variety of the selection of the Moscow NIISH "Nemchinovka" was sown in the soil. Throughout the growing season, soil samples were kept in the vegetation pavilion in conditions of natural moisture and illumination. Sampling and measurements of biological properties were carried out in the spring period 10 days after the samples were transferred from the refrigerator to the vegetation pavilion. It was found that, depending on the duration of the freezing period of the studied soils, the most sensitive indicators for temperature changes were microbial biomass (C-LED), basal respiration rate (V-BASRR) of the microbial community and the number of microorganisms (NMO) growing on soil agar and on a rich medium. The soils that were incubated without freezing had the lowest values of C-LED and V-BASRR. The increase in the freezing period of the soil affected the acidity of the soils. In the variants with prolonged freezing in the 2nd year of the study, the pH value increased. For agrochernozeem, a decrease in the content of P_2O_5 was noted as the freezing period increased. For agrokashtan soils, this pattern was less pronounced. In these soils, a tendency to decrease the C : N ratio was revealed with an increase in the time spent in the frozen state. The content of C_{org} , as well as macro- and microelements in all variants practically did not change during the 2 years of the experiment.

Key words: biological activity, arable land, frost-free period of soils, agrokashtan soils, agrochernozeems.

УДК 633.2(470.31)

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ЗЛАКОВЫХ ТРАВ В НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЕ

© 2023 г. В. Н. Баринов

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

E-mail: rusakova.iv@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.

После доработки 30.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Показана возможность использования для подкормки многолетних трав (тимофеевки луговой) азота однолетних бобовых растений путем применения их в качестве покровных культур. Они, увеличивая содержание в почве усвояемых форм азота и других элементов питания, оказывали положительное влияние на развитие трав в осенний и весенний периоды, формирование их биомассы в процессе вегетации, улучшение ее качества, на увеличение развития корневой системы многолетних трав и накопления в ней элементов питания. Эффективное действие покровных культур прослежено в течение 4-х лет, общий прирост укосного урожая за это время составил >120 ц/га, экономический эффект – 17 тыс. рублей.

Ключевые слова: тимофеевка луговая, биологическая подкормка, плодородие почвы, продуктивность посевов, качество урожая, экономическая эффективность

DOI: 10.31857/S0002188123040038, **EDN:** DHXKTC

ВВЕДЕНИЕ

Большинство посевов злаковых многолетних трав на легких почвах Нечерноземной зоны в период отрастания весной страдает от недостаточного азотного питания. Это связано с тем, что осенние запасы азота в пахотном слое вымываются осенними осадками и весенними талыми водами. К тому же ранней весной из-за температурных условий и переувлажнения почвы процесс биологической мобилизации азота почвы очень ослаблен или отсутствует [1]. Агротехникой возделывания многолетних трав предусмотрено проведение весенних подкормок минеральным азотом в дозах 30–45 кг/га [2]. В современных условиях при высоких ценах на минеральные удобрения это слишком дорогостоящее мероприятие и не всегда удачное: в отдельных случаях минеральный азот попадает в сухую почву и не участвует в питании растений, в других – вымывается осадками. В этой связи возникла необходимость разработки теоретических основ и технологий подкормки многолетних трав (тимофеевки луговой) биологическим азотом и другими элементами питания, которые образуются в почве при минерализации корне-поживных остатков покровных бобовых культур.

Исследованиями ВНИИОУ и других научных учреждений установлено, что важнейшим составным элементом биологизации земледелия являются средоулучшающие культуры, среди них особое внимание заслуживает люпин узколистный, который следует рассматривать как универсальную культуру для полевых и кормовых севооборотов, обладающую высоким средоулучшающим свойством, кормопродукционным и ресурсосберегающим потенциалом [3].

В этой связи цель работы – выявление возможностей использования люпина узколистного для оптимизации развития тимофеевки луговой как кормовой культуры на супесчаных дерново-подзолистых почвах Центрального региона Нечерноземной зоны.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение эффективности покровных посевов однолетнего люпина при возделывании тимофеевки луговой проводили на опытном поле ВНИИОУ. Почва под опытом – дерново-подзолистая супесчаная. Пахотный горизонт характеризовался низким содержанием гумуса (1.0–1.5%), реакцией почвенной среды близкой к нейтральной

Таблица 1. Влияние покровных культур на густоту стояния тимофеевки, шт./м²

Вариант	Всходы	Перед уходом в зиму	После перезимовки
Без покрова	154	273	268
Люпин узколистный	157	277	272
<i>НСР</i> ₀₅	11	16	18

($pH_{КС1}$ 6.0–6.2, H_r – 0.43–0.67, S – 6.4–7.1 мг-экв/100 г почвы), повышенной обеспеченностью формами фосфора (128–152 мг/кг почвы) и обменным калием (135–141 мг/кг почвы).

Климат умеренно-континентальный, среднегодовое количество осадков – 526–650 мм, сумма активных температур – 2000–2100°C, ГТК – 1.2–1.3.

Исследование проводили в 2009–2013 гг. Опыт заложен в 2-х полях. Первая закладка опыта была проведена в 2009 г., вторая – в 2011 г.

В опыте использовали тимофеевку луговую сорта Московская 5, которую возделывали без покрова и под покровом однолетнего люпина узколистного сорта Кристалл. Тимофеевку и люпин сеяли перекрестно: сначала люпин, затем тимофеевку. Покровную культуру возделывали по типу однолетних трав. Площадь опытной делянки – 15 м², повторность в опыте четырехкратная.

Предшественником была горчица белая. Под зяблевую вспашку фоном были внесены фосфоритная мука и хлористый калий из расчета 90 кг д.в./га. Агротехника в опыте – общепринятая для Владимирской области [4]. Закладку опыта проводили в 1-й декаде мая.

В опыте определяли влияние покровной культуры на густоту стояния растений тимофеевки луговой в периоды всходов (3-я декада мая), перед уходом в зиму (2-я декада ноября) и после перезимовки (3-я декада мая) [5]. Проводили наблюдения за динамикой содержания нитратного и аммиачного азота в пахотном слое почвы перед по-

севом тимофеевки и весной при ее отрастании [6]. Определяли укосный урожай покровной культуры и тимофеевки в 1-й год жизни и в течение 4-х лет хозяйственного использования [5], развитие сеgetальных видов растений [7], поражение болезнями и вредителями тимофеевки [8, 9]. Определили накопление кормовых единиц в урожае тимофеевки [10], содержание биомассы в пахотном слое [11], ее удобрительные показатели [12], экономическую эффективность покровных культур [13]. Статическую обработку полученных данных проводили по [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что в подпокровные посевы тимофеевки с корнепоживными остатками люпина поступило в почву 140 кг элементов питания/га, из них – 67 кг азота, 25 кг фосфора и 48 кг калия. Люпин, как покровная культура, не оказывал отрицательного влияния на развитие растений тимофеевки в период весенних всходов, перед уходом в зиму и после перезимовки (табл. 1).

Несмотря на то что количество всходов тимофеевки луговой определяли спустя 19 сут после посева, их полнота проявилась лишь к концу вегетации, что, видимо, было связано с качеством посевного материала, но в большей мере повлияла неравномерная глубина заделки семян при перекрестных посевах с люпином.

В процессе вегетации в посевах тимофеевки луговой проводили фитознтомологические исследования. Развитие болезней и вредителей этой культуры не отмечено. На покровной культуре (люпине узколистном) отмечены единичные проявления антракноза.

В годы закладки опыта под покровом люпина узколистного выявлено незначительное снижение урожая зеленой массы тимофеевки луговой 1-го года пользования, на 2-й год под влиянием люпина узколистного по мере минерализации его корневой системы прирост урожайности тимофеевки луговой составил 28%, эта закономерность сохранилась в течение 4-х лет хозяйственного пользования (табл. 2).

Таблица 2. Влияние покровной культуры на урожайность укосной массы тимофеевки луговой

Показатель	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
Беспокровные посеы тимофеевки				
Урожайность, ц/га	112	108	108	107
Сухое вещество, ц/га	31	20	20	32
Покровные посеы тимофеевки				
Урожайность, ц/га	142	138	138	136
Сухое вещество, ц/га	45	43	43	44
Прибавка урожая тимофеевки покровного посева				
Зеленая масса, ц/га	30	30	30	29

Таблица 3. Влияние покровной культуры на развитие корневой системы тимopheевки луговой 2-го года пользования и на содержание подвижного азота в почве

Вариант	Масса корней, ц/га	Содержание в корнях, кг/га				Содержание в почве N-NO ₃ + N-NH ₄ , мг/кг почвы
		N _{общ}	P ₂ O ₅	K ₂ O	итого	
Без покрова	129	103	52	62	217	12.2
Люпин узколистный	219	125	54	70	248	16.7
HCP ₀₅	34	18	12	11	27	2.3

Таблица 4. Урожайность и экономическая эффективность использования покровной культуры при возделывании тимopheевки луговой

Вариант	Урожайность	Прибавка к посеву без покрова	Стоимость прибавки урожая	Затраты на возделывание покровных культур	Условно чистый доход
	ц к.е./га		руб./га		
Без покрова	116	—	—	—	—
Люпин узколистный	149	33	26400	9300	17100

В среднем за 4 года исследования урожайность покровных посевов тимopheевки составила 142, беспокровных — 112 ц/га, средняя прибавка — 30 ц/га. Прирост урожая покровных посевов во все годы исследования был статистически достоверным. Эффект положительного действия покровных культур был связан с процессами минерализации их корне-поживных остатков, что обеспечило в почве увеличение содержания минеральных элементов питания, а также с оптимизацией развития корневой системы тимopheевки луговой, прирост которой составил 90 ц/га, или 70%. В основном по этой причине отмечали длительное положительное последствие покровной культуры на формирование укосного урожая тимopheевки луговой (табл. 3).

В корневой системе тимopheевки луговой под влиянием покровной культуры увеличилось содержание элементов питания на 31 кг/га (на 14%), в том числе — азота на 22 кг/га (на 21%). На 37% увеличилось содержание подвижных форм азота.

При определении экономической эффективности использования покровной культуры суммарную урожайность тимopheевки луговой за 4 года и покровной культуры (среднее 2-х закладок опыта) учитывали в кормовых единицах (к.е.), используя коэффициент пересчета зеленой массы — 0.22 [13], стоимость к.е. — 8 руб., затраты на возделывание и уборку покровных культур определяли по технологическим картам (табл. 4).

Покровная культура обеспечила достоверное увеличение продуктивности травяного севообо-

рота (однолетние травы с подсевом многолетних трав), прирост урожайности зеленой массы трав составил 33 ц к.е./га. Стоимость прибавки урожая составила 26400 руб./га, за вычетом затрат на выращивание и уборку покровной культуры, условно чистый доход достиг 17100 руб./га, что убедительно свидетельствовало о целесообразности возделывания многолетних трав (тимopheевки луговой) под покровом высокопродуктивных бобовых культур на дерново-подзолистых супесчаных почвах Нечерноземной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании на дерново-подзолистых супесчаных почвах Нечерноземной зоны установлена положительная роль узколистного люпина как покровной средоулучшающей культуры для устойчивого развития и формирования урожая тимopheевки луговой в течение ее длительного (4 года) использования. В среднем приоритет урожая тимopheевки луговой составил 337 ц/га. Условно чистый доход от возделывания тимopheевки луговой за счет покровной культуры составил в совокупности 17100 руб./га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков М.Н., Тужилин В.М., Самохина О.А. Система биологизации земледелия в Нечерноземной зоне. М.: Росинформагротех, 2007. 296 с.
2. Андреев Н.Г. Луговое и полевое кормопроизводство. М.: Колос, 1984. 421 с.

3. Такунов И.П. Люпин в земледелии России. Брянск: Придесенье, 1996. 372 с.
4. Автонеев К.И., Агре Д.А. Система ведения земледелия Владимирской области. Владимир, 1983. 313 с.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М., 1968. 336 с.
6. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. I (анализ почвы). М., 1975. 392 с.
7. Шептухов В.Н., Гафуров Р.М., Панасхири Т.В. Атлас основных видов сорных растений России. М.: РАСХ, 2008. 172 с.
8. Хохряков М.К. Определение болезней растений. Л.: Колос, 1966. 532 с.
9. Брянецев В.А. Сельскохозяйственная энтомология. Л.: Колос, 1973. 342 с.
10. Практикум по агрохимии // Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
11. Станков Н.З. Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 280 с.
12. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями и других средств химизации. Ч. II (анализ растений). М.: ВИУА, 1976. 205 с.
13. Методические указания по определению экономической эффективности удобрений и других средств химизации, применяемых в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1979. 25 с.

Biological Methods of Optimization of Cultivation of Perennial Grasses in Agriculture of the Non-Chernozem zone

V. N. Barinov

*All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat –
a Branch of the Verkhnevolzhsky FANC
ul. Pryanishnikova 2, Vladimir region, Sudogodsky district, d. Vyatkinо 601390, Russia
E-mail: rusakova.iv@yandex.ru*

The possibility of using nitrogen of annual legumes for fertilizing perennial grasses (timofeevka meadow) by using them as cover crops has been established. By increasing the content of assimilable forms of nitrogen and other nutrients in the soil, they had a positive effect on the development of grasses in the autumn and spring periods, the formation of their biomass during vegetation, improving its quality, increasing the development of the root system of perennial grasses and the accumulation of nutrients in it. The effective effect of cover crops was traced for 4 years, the total increase in the mowing crop during this time amounted to over 120 kg/ha, the economic effect – of 17 thousand rubles.

Key words: timofeevka meadow, biological fertilization, soil fertility, crop productivity, crop quality, economic efficiency.

УДК 632.122.1:631.46:631.445.24(479.242)

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ОБИЛИЕ БАКТЕРИЙ РОДА *Azotobacter* В СЕРО-БУРЫХ ПОЧВАХ АПШЕРОНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2023 г. С. И. Наджафова

Институт микробиологии
AZ1004 Баку, ул. М. Мушвига, 103, Азербайджан
E-mail: nadjafovas@yahoo.com

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.
После доработки 14.01.2023 г.
Принята к публикации 25.01.2023 г.

Изучено действие разных концентраций тяжелых металлов в серо-бурых почвах Апшеронского полуострова на обилие бактерий рода *Azotobacter*. В качестве информативных показателей были взяты показатели общей численности микроорганизмов и обилия бактерий рода *Azotobacter*. Показано, что в исследованной почве с увеличением концентрации тяжелых металлов (ТМ) при всех сроках учета наблюдали снижение общей численности микроорганизмов по сравнению с контролем. Исследование обилия бактерий р. *Azotobacter* серо-бурой почвы показало, что бактерии данного рода обладали достаточной устойчивостью к воздействию ТМ. В концентрациях 1 ПДК не обнаружено определенного воздействия тяжелых металлов на бактерии данного рода. Однако при действии ТМ в концентрации 5 и 10 ПДК наблюдали снижение обилия бактерий по отношению к контролю. Исследованные металлы по ингибирующему действию в зависимости от природы загрязняющих веществ можно расположить в ряду: Cr > Pb > Cu.

Ключевые слова: серо-бурые почвы, тяжелые металлы, воздействие, микроорганизмы, бактерии р. *Azotobacter*.

DOI: 10.31857/S0002188123040099, **EDN:** DIQDHK

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в результате нерациональной антропогенной деятельности возникло большое количество проблем, связанных с загрязнением окружающей среды токсикантами, в том числе тяжелыми металлами (ТМ).

Поступление ТМ в окружающую среду связано с активной деятельностью человека. Их основные источники – промышленность, автотранспорт, котельные, мусоросжигающие установки и сельскохозяйственное производство. Отраслями промышленности, загрязняющими окружающую среду ТМ, являются добыча топлива, металлургия, стекольное и керамическое производство и др. Для крупных городов с многопрофильными отраслями промышленности, как правило, в окружающей среде присутствуют не отдельные загрязнители, а ассоциации ТМ, которые способны воздействовать на организм комплексно, и при этом вполне вероятно суммирование эффектов [2–4]. Транспорт является источником более половины всех выбросов в окружающую среду. Особенно остро негативное воздействие автомобильного транспорта проявляется в крупных го-

родах. Значительную роль в загрязнении почв придорожных территорий играют тяжелые металлы (хром, медь, свинец и т.п.). Тяжелые металлы в почвах придорожных территорий представляют угрозу для человека, т.к. аэральным путем вместе с частицами почвы могут поступать в его организм. В результате сжигания мусора в биосферу поступает целый ряд ТМ: кадмий, ртуть, свинец, хром и др. В сельском хозяйстве загрязнение почв ТМ связано с использованием удобрений и пестицидов.

В то же время накопление в почве ТМ может отрицательно влиять как на ее плодородие, так и на микробиологическую деятельность, рост и развитие растений и на качество продукции в целом. Таким образом, загрязнение объектов биосферы, в том числе пищевого сырья как растительного, так и животного происхождения, солями ТМ, учитывая их высокую токсичность, способность к биоаккумуляции, способность воздействовать даже в малых концентрациях, в конечном итоге может иметь ряд серьезных последствий для здоровья человека [3–5]. В частности, ТМ вызывают нарушение функционирова-

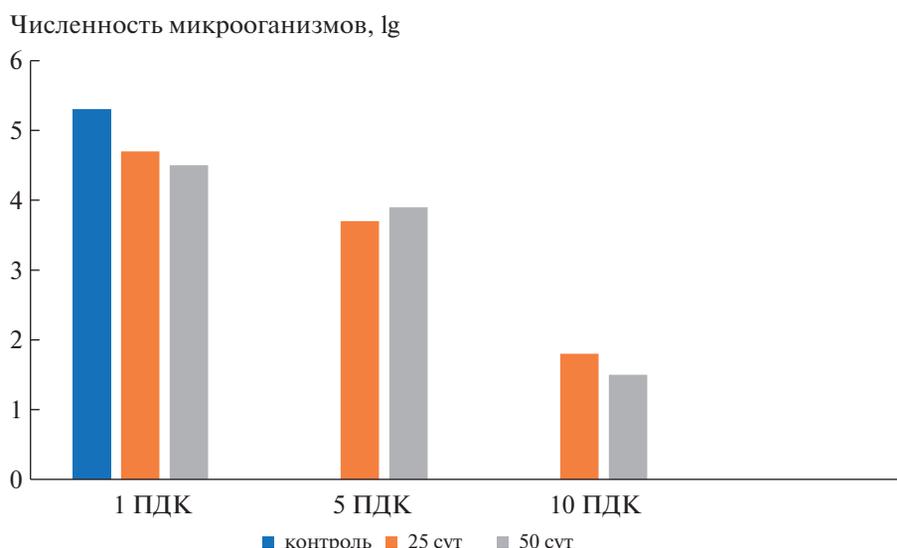


Рис. 1. Динамика изменения общей численности бактерий в серо-бурой почве при ее загрязнении ТМ, % от контроля.

ния центральной нервной системы, изменение состава крови, отрицательно влияют на функции легких, почек, печени и других органов. Долгосрочное действие ТМ может вызвать развитие рака, аллергии, дистрофии, физических и неврологических дегенеративных процессов, похожих на болезни Альцгеймера, Паркинсона и др. Все это указывает на необходимость проведения экологического мониторинга содержания ТМ в почве, воздухе и воде.

Цель работы – изучение воздействия ТМ на обилие бактерий рода *Azotobacter* в серо-бурых почвах Апшеронского полуострова. В качестве информативных показателей были взяты показатели общей численности микроорганизмов и обилия бактерий рода *Azotobacter*.

В соответствии с целью была поставлена следующая задача: исследовать закономерности изменения обилия бактерий рода *Azotobacter* в зависимости от природы и концентрации загрязняющих веществ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была выбрана серо-бурая почва, отобранная на территории Апшеронского п-ва, характеризующаяся низким содержанием гумуса (1.2%), слабощелочной реакцией среды (рН 7.6) и низкой биологической активностью (согласно классификации WRB – Gypsisols [6]).

Почва для экспериментов была отобрана из верхнего слоя 0–20 см методом “конверта” в 3 повторностях. Почву инкубировали в вегетационных сосудах при комнатной температуре и поддержания степени влажности в пределах 50–60% ППВ.

В серии модельных экспериментов исследовали общую численность микроорганизмов и обилие бактерий рода *Azotobacter* при загрязнении ТМ в концентрации 1, 5, 10 ПДК (100, 500 и 1000 мг/кг соответственно). Металлы вносили в форме оксидов Cr_2O_3 , CuO и PbO . Состояние почвы определяли через 25 и 50 сут после загрязнения. Контролем служили образцы почвы, не загрязненные ТМ. Исследование общей численности бактерий проводили посевом на мясопептонном агаре (МПА). Обилие азотфиксирующих бактерий учитывали методом комочков обрастания на среде Эшби.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ общей численности бактерий показал, что в исследованной почве с увеличением концентрации ТМ во все сроки учета наблюдали снижение их численности по сравнению с контролем (рис. 1).

Исследование обилия бактерий р. *Azotobacter* серо-бурой почвы показало, что бактерии данного рода обладали достаточной устойчивостью к воздействию ТМ. В концентрациях 1 ПДК не обнаружено ингибирующего воздействия ТМ на бактерии данного рода. Однако при действии ТМ в концентрации 5 и 10 ПДК наблюдали снижение обилия бактерий по отношению к контролю. В то же время после загрязнения ТМ концентрацией 5 ПДК через 25 сут обилие бактерий снижалось на 30% по отношению к контролю, а через 50 сут отмечено увеличение численности, однако полного восстановления до контрольных показателей не произошло.

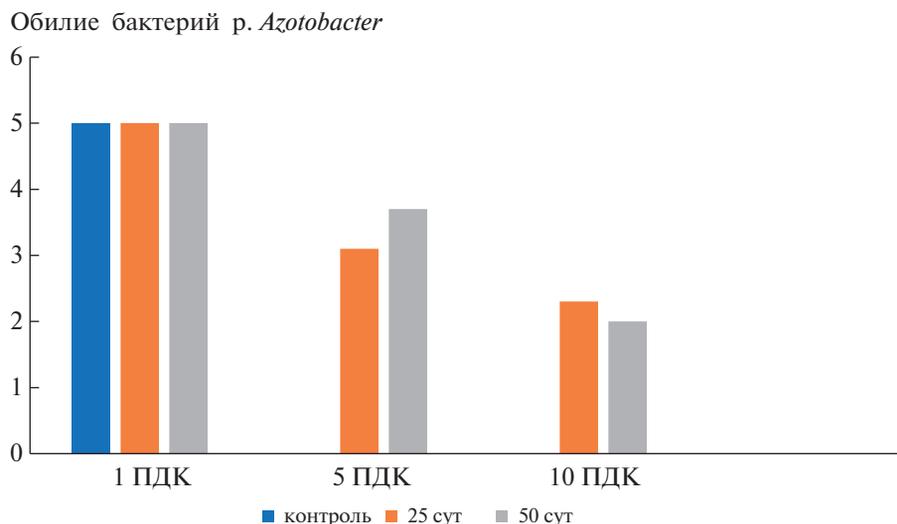


Рис. 2. Динамика изменения обилия бактерий р. *Azotobacter* в серо-бурой почве при загрязнении ТМ, % от контроля.

В результате исследования было установлено, что загрязнение исследованных почв ТМ приводило к ухудшению ее микробиологического состояния. Наблюдали снижение обилия бактерий рода *Azotobacter*. В то же время из исследованных ТМ наиболее значительное негативное воздействие оказывал оксид хрома. Свинец и медь проявили меньшее по силе воздействие. Таким образом, исследованные металлы по ингибирующему действию можно расположить в ряду: Cr > Pb > Cu. Снижение численности микроорганизмов в почве при загрязнении тяжелыми металлами, очевидно, было вызвано их токсическим действием и способностью исследованных металлов связываться с сульфгидрильными группами, в результате чего нарушалась проницаемость клеточных мембран и наблюдали ингибирующее действие тяжелых металлов на численность азотфиксирующих микроорганизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали, что загрязнение серо-бурой почвы оксидами хрома, меди и свинца приводило к изменению ее исследованных биологических показателей и в большей степени – к снижению обилия бактерий рода *Azotobacter*. Степень снижения зависела от природы металла и его концентрации в почве. Например, в исследованной почве с увеличением концентрации тяжелых металлов во все сроки учета наблюдали снижение общей численности микроорганизмов по сравнению с контролем. По оказанию ингибирующего действия на численность азотфиксирующих микроорганизмов тяжелые металлы можно расположить в ряду: Cr > Pb > Cu.

Использованный в работе показатель обилия бактерий рода *Azotobacter* можно рекомендовать к широкому применению при проведении мониторинга, биодиагностики, индикации и выявления ПДК загрязнения почв тяжелыми металлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаев М.П., Исмаилов Н. М., Наджафова С.И., Кейсерухская Ф.Ш., Оруджева Н. К вопросу о разработке ПДК загрязняющих веществ на основе ассимиляционного потенциала различных типов почв Азербайджана // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1393–1400. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110040>
2. Митрохин О.В. Оценка транслокального загрязнения как составная часть социально-гигиенического мониторинга // Здоровье населения и среда обитания. 2001. № 9. С. 11–17.
3. Nadjafova S. I., Babayev A.M., Babayev M.P. Environmental assessment of pollution of heavy metals soil Baku / Mater. Inter. Soil Sci. Congr. on “Soil Science in International Year of Soils 2015” Sochi, Russia, 2015. P. 302–305.
4. Ревич Б.А. Проблемы прогнозирования, “горячие точки” химического загрязнения окружающей среды и здоровье населения России / Под ред. В.М. Захарова. 2007. 367 с.
5. Сидоренко Г.И., Кутепов Е.Н. Проблемы изучения и оценки состояния здоровья населения // Гигиена и санитария. 1994. № 8. С. 33–36.
6. Бабаев М.П., Рамазанова Ф.М., Наджафова С.И. Почвы Азербайджанской Республики. Орошаемые почвы Кура-Араксинской низменности и их производительная способность. М.: Lambert, 2019. 275 с.

Effect of Heavy Metals on the Abundance of Bacteria of the Genus *Azotobacter* in Gray-Brown Soils of the Absheron Peninsula

S. I. Nadjafova

Institute of Microbiology

M. Mushvig str. 103, AZ 1004, Baku, Azerbaijan

E-mail: nadjafovas@yahoo.com

The effect of different concentrations of heavy metals in gray-brown soils of the Absheron Peninsula on the abundance of bacteria of the genus *Azotobacter* has been studied. The indicators of the total number of microorganisms and the abundance of bacteria of the genus *Azotobacter* were taken as informative indicators. It is shown that in the studied soil, with an increase in the concentration of heavy metals (TM) at all accounting periods, a decrease in the total number of microorganisms was observed compared with the control. The study of the abundance of bacteria g. *Azotobacter* of gray-brown soil showed that bacteria of this genus had sufficient resistance to the effects of TM. At concentrations of 1 MPC, no definite effect of heavy metals on bacteria of this genus was detected. However, with the action of TM at concentrations of 5 and 10 MPC, a decrease in the abundance of bacteria was observed in relation to the control. The studied metals according to their inhibitory effect, depending on the nature of pollutants, can be arranged in a row: Cr > Pb > Cu.

Key words: gray-brown soils, heavy metals, exposure, microorganisms, bacteria of the genus *Azotobacter*.