

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 12, 2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Удобрения

- Оценка систем удобрения в пропашном севообороте с картофелем
М. Н. Новиков 3
- Влияние удобрений на сохраняемость овощей и изменение их качества в процессе хранения
В. А. Борисов, Е. В. Янченко, О. Н. Успенская 7
-

Пестициды

- Влияние диэтилмалеата на активность глутатион-S-трансферазы имаго *Musca domestica* L.
А. Г. Кинарейкина, Е. А. Силиванова 14
-

Агроэкология

- Агротехнологические возможности управления климатическими рисками при возделывании зерновых культур
В. А. Романенков, В. Н. Павлова, М. В. Беличенко 19
- Влияние почвенно-ландшафтных условий на химический состав кормовых трав
Д. А. Иванов, Я. С. Лисицын, Д. И. Лотиц, П. С. Лотиц 31
- Биологическое разнообразие фитопатогенных почвенных микромицетов на сортах яровой пшеницы в Западной Сибири
Е. Ю. Торопова, И. Г. Воробьева, О. А. Казакова, Р. И. Трунов 47
- Изменение почвенного фонда йода в агроценозах лесостепи Западной Сибири
Г. А. Конарбаева, В. С. Бойко, В. Н. Якименко 55
-

Экотоксикология

- Влияние цинка на физиологические показатели и продуктивность растений горчицы сарептской
Н. М. Казнина, Ю. В. Батова, Е. С. Холопцева 62
-

ДИСКУССИЯ

- Оценка и оптимизация плодородия агросерой почвы методами многомерного статистического анализа
Р. Н. Ушаков, Т. Ю. Ушакова, А. В. Ручкина, К. В. Абдулаязнова, Ф. Ю. Бобраков 69
-

ОБЗОРЫ

- Влияние удобрений и системы земледелия на секвестрацию углерода в почвах
В. Н. Кудеяров 79
-
-

Contents

No. 12, 2022

EXPERIMENTAL ARTICLES

Fertilizers

- Evaluation of Fertilizer Systems in the Row Crop Rotation with Potatoes
M. N. Novikov 3
- Effect of Fertilizers on the Preservation of Vegetables and Changes
in Their Quality during Storage
V. A. Borisov, E. V. Yanchenko, O. N. Uspenskaya 7
-

Pesticides

- Effect of Diethylmaleate on the Activity of Dlutathione-S-Transferase
Imago *Musca domestica* L.
A. G. Kinareikina, E. A. Silivanova 14
-

Agroecology

- Agrotechnological Possibilities of Climate Risk Management
in the Cultivation of Grain Crops
V. A. Romanenkov, V. N. Pavlova, M. V. Belichenko 19
- Influence of Soil and Landscape Conditions on the Chemical Composition
of Fodder Grasses
D. A. Ivanov, Y. S. Lisitsyn, D. I. Lotz, P. S. Lotz 31
- Biological Diversity of Phytopathogenic Soil Micromycetes on Spring Wheat Varieties
in West Siberia
E. Yu. Toropova, I. G. Vorob'ova, O. A. Kazakova, R. I. Trunov 47
- Changes in the Soil Fund of Iodine in the Agrocenosis of the Forest-Steppe
of Western Siberia
G. A. Konarbaeva, V. S. Boyko, V. N. Yakimenko 55
-

Ecotoxicology

- Effect of Zinc on the Physiological Parameters and Productivity of Sarepta Mustard Plants
N. M. Kaznina, Yu. V. Batova, E. S. Kholoptseva 62
-

DISCUSSION

- Assessment and Optimization of Agricultural Gray Soil Fertility by Methods
of Multidimensional Statistical Analysis
R. N. Ushakov, T. Y. Ushakov, A. V. Ruchkin, K. V. Abdulazyaynov, F. Y. Bobrakov 69
-

REVIEWS

- Influence of Fertilizers and Farming Systems on Carbon Sequestration in Soils
V. N. Kudayarov 79
-
-

ОЦЕНКА СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ В ПРОПАШНОМ СЕВООБОРОТЕ С КАРТОФЕЛЕМ

© 2022 г. М. Н. Новиков

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

E-mail: novik.mih@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.06.2022 г.

После доработки 19.07.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В течение 2001–2014 гг. и в условиях Центральной Нечерноземной зоны на дерново-подзолистых подзолистых супесчаных почвах при возделывании картофеля в полевом севообороте с получением планового урожая 250 ц/га оценили различные системы удобрения. Показано, что кроме традиционной органо-минеральной системы удобрения можно с успехом применять биологизированную систему, включающую вместо навоза и компостов солому полевых культур, сидераты, биологический азот. Обе системы удобрения практически в равной мере оказывали влияние на фитопатологическое и энтомологическое состояние посевов, развитие растений, способствовали улучшению минерального питания картофеля, повышению плодородия почвы, получению урожайности заданных параметров. Судя по показателям урожайности и изменения агрохимических свойств почвы биологизированная система удобрения существенно не уступала традиционной органо-минеральной. Если учесть, что с биологизированной системой удобрения под картофель было внесено элементов питания 334, с органо-минеральной – 849 кг/га, а показатели выноса их урожаем довольно близки, то можно утверждать о приоритетности коэффициента использования элементов питания растениями картофеля из биологизированной системы удобрения. Ввиду того, что с биологизированной системой удобрения применяли под картофель меньше элементов питания, экономически она оказалась более выгодной.

Ключевые слова: системы удобрения, картофель, урожайность, болезни и вредители, плодородие почв, качество клубней.

DOI: 10.31857/S0002188122120109

ВВЕДЕНИЕ

В земледелии Нечерноземной зоны одной из самых острых, но далеко неосознанных проблем является неослабевающее снижение плодородия почв. Главной причиной этого является нарушение сбалансированного круговорота органического вещества и элементов питания в агроценозах. В сложившихся условиях одним из наиболее доступных, низкозатратных и экологически релевантных путей оптимизации землепользования является биологизация земледелия, которая включает: оптимизацию структуры посевных площадей, внедрение севооборотов с насыщением их высокопродуктивными средоулучшающими культурами, рациональное использование всех видов органических и минеральных удобрений, известкование и фосфоритование кислых почв, вовлечение в хозяйственно-биологический круговорот органического вещества и элементов

питания растительных остатков и сидератов, удобрительных биопрепаратов, повышение биологического потенциала азотфиксирующей микрофлоры, применение энергосберегающих приемов обработки почвы, использование физических и биологических методов борьбы с сорняками, болезнями и вредителями растений [1]. Составными производственными частями биологического земледелия являются биологизированные севообороты и системы удобрения. Реализация этой системы более сложна и затратна в пропашных севооборотах с повышенным использованием средств химизации. При этом в сложившихся условиях снижения объемов применения органических и минеральных удобрений особое значение в решении проблемы повышения плодородия почвы и ее продуктивности приобретают биологические методы. Цель работы – в пропашном севообороте с картофелем оценить

Таблица 1. Влияние систем удобрения на урожайность картофеля, ц/га

Система удобрения	Урожайность					Прибавка	
	2006 г.	2007 г.	2013 г.	2014 г.	итого	ц/га	%
Органо-минеральная	284	228	207	320	260	–27	10.4
Биологизированная	338	177	209	208	233		
<i>HCP</i> ₀₅ , ц/га	29	7	40	24	25		

влияние применения различных систем удобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Во ВНИИОУ в течение 2001–2014 гг. в зерно-травянопропашном 6-польном полевом севообороте проводили сравнительную оценку традиционной органо-минеральной и биологизированной систем удобрения на дерново-подзолистой супесчаной почве, которая характеризовалась низкой гумусированностью, среднекислой реакцией почвенной среды, средней обеспеченностью подвижным фосфором и обменным калием. Полевой севооборот включал: люпин однолетний–ячмень с подсевом многолетних трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–озимая пшеница–картофель–яровое тритикале. В органо-минеральной системе удобрения подстилочный навоз в дозе 60 т/га вносили под картофель весной. В биологизированной системе удобрения в состав органических удобрений входили: солома люпина, ячменя, озимой пшеницы, тритикале и сидераты отавы многолетних трав 2-го года пользования. В обеих системах удобрения недостаток элементов для получения планового урожая возделываемых культур (люпин на зерно – 20, ячмень – 25, озимая пшеница и тритикале – 30, картофель – 250, сено многолетних трав – 40 ц/га) компенсировался за счет минеральных удобрений [2]. В органо-минеральной системе удобрения в среднем за 4 года возделывания под картофель внесли N257P300K292, в биологизированной системе удобрения с учетом прямого действия соломы, минеральных удобрений и последствий отавных сидератов многолетних трав – N134P51K149. Величина опытной делянки была равна 112 м², повторность во времени и пространстве трехкратная.

Использовали в опыте сорт картофеля Бриз, агротехника – общепринятая для Владимирской обл. [3]. Наблюдения и исследования в опыте вели по Программе и методике исследований в Географической сети полевых опытов с удобрениями

[4], агрохимические и биологические анализы выполняли по существующим ГОСТам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Годы возделывания картофеля отличались различными климатическими условиями: в 2006 г. отмечен значительный недостаток влаги в почве в начальный период вегетации картофеля, в этой связи из-за слабой минерализации навоза приоритет в формировании урожая имела биологизированная система удобрения, при достаточном количестве влаги весной и незначительном недостатке летом (2007 и 2014 гг.) более эффективной была органо-минеральная система удобрения, из-за недостатка влаги в период формирования клубней (июль 2013 г.) отмечен существенный и равноценный недобор урожая при применении обеих систем удобрения (табл. 1).

В среднем за 4 года возделывания картофеля незначительный приоритет по воздействию на урожайность картофеля имела органо-минеральная система удобрения. Обе системы удобрения обеспечили близкие показатели планового урожая. Прирост урожая в отдельные годы в вариантах произошел в основном за счет увеличения крупной фракции клубней, доля которой зависела не от системы удобрения, а от гидротермических условий вегетационного периода (табл. 2).

В среднем за годы исследования при применении обеих систем удобрения показатели структуры урожая были почти равные, разница для всех фракций не превышала 1%. Около 59% составляла крупная фракция, 23 – семенная, 18% – мелкая (фуражная) фракция.

В период хранения отмечали поражение клубней картофеля фитофторозом, сухой и мокрой гнилями, степень их проявления не зависела от систем удобрения и составляла ≈9%.

Накопление нитратов в клубнях картофеля при применении обеих систем было ниже допустимой нормы, содержание в клубнях азота и калия при биологизированной системе было несколько больше, фосфора при применении обеих систем удобрения – одинаковым. Незначитель-

Таблица 2. Влияние систем удобрения на фракционный состав урожая клубней картофеля

Год	Системы удобрения					
	органо-минеральная			биологизированная		
	масса клубней, %					
	крупных >120 мм	средних 60–120 мм	фуражных <60 мм	крупных >120 мм	средних 60–120 мм	фуражных <60 мм
2006	69.2	17.9	12.9	71.0	18.7	10.3
2007	51.6	30.0	18.4	36.7	36.1	27.2
2013	68.3	21.7	10.0	72.4	18.0	9.6
2014	45.7	25.1	29.2	55.4	19.1	25.5
Среднее	58.7	23.7	17.6	58.9	23.0	18.1

Таблица 3. Влияние систем удобрения на качество урожая клубней картофеля

Система удобрения	Вынос элементов питания, кг/га				Накопление, ц/га		Содержание, %
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	итого	кормовых единиц	белка	крахмала
Органо-минеральная	77.4	43.6	118	239	78.0	4.4	13.3
Биологизированная	76.2	39.0	109	224	70.8	4.3	13.4

Таблица 4. Влияние систем удобрения на агрохимические свойства почвы (среднее за 4 года)

Система удобрения	Сроки анализа почвы	рН _{KCl}	H _г	Ca + Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O
			мг-экв/100 г почвы		мг/100 г почвы	
Органо-минеральная	Апрель	5.3	1.29	5.01	10.9	14.2
	Сентябрь	5.4	1.48	4.88	16.8	15.4
Биологизированная	Апрель	5.2	1.38	5.11	17.5	12.4
	Сентябрь	5.3	1.57	4.79	20.1	12.9

ный приоритет в выносе элементов питания, в накоплении кормовых единиц и белка имела органо-минеральная система удобрения (табл. 3).

Системы удобрения способствовали изменению агрохимических свойств почвы. За период вегетации под посевами картофеля практически не изменялась актуальная кислотность, но отмечено увеличение гидролитической и снижение суммы поглощенных оснований. При применении органо-минеральной системы удобрения содержание подвижного фосфора увеличилось на 35.7, обменного калия – на 7.8%, при применении биологизированной системы – соответственно на 12.7 и 4% (табл. 4).

Судя по показателям урожайности, качества клубней картофеля и изменения агрохимических свойств почвы биологизированная система удобрения существенно не уступала традиционной

органо-минеральной. Если учесть, что с биологизированной системой удобрения под картофель было внесено элементов питания 334 кг/га, с органо-минеральной – 849 кг/га, а показатели выноса их урожаем были довольно близкими, то можно утверждать о приоритетности коэффициента использования элементов питания растениями картофеля из биологизированной системы удобрения.

При определении экономической эффективности систем удобрения [5] затраты на возделывание картофеля взяты из соответствующих технологических карт, затраты на удобрения рассчитывали по стоимости внесенных элементов питания эквивалентно стоимости минеральных удобрений на 2014 г. (1 кг д.в. аммиачной селитры – 36 руб., простого суперфосфата – 90 руб., хлористого калия – 17 руб.), рыночная стоимость удо-

Таблица 5. Экономическая эффективность систем удобрения

Система удобрения	Затраты, тыс. руб./га			Стоимость клубней картофеля	Условно чистый доход	Доход на 1 руб. затрат, руб.
	на возделывание картофеля	на удобрения	итого	тыс. руб./га		
Органо-минеральная	79.0	41.2	120.2	208.0	87.8	0.73
Биологизированная	77.0	12.0	89.0	186.4	97.4	1.09

точного урожая 1 ц картофеля была равна 800 руб. (табл. 5).

Ввиду того, что с биологизированной системой удобрения вносили под картофель меньше элементов питания, экономически она оказалась более выгодной, и ее производственная привлекательность (возможность использования на отдаленных полях навоза при сокращении плеча его перевозки) вполне подтвердилась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях Нечерноземной зоны на легких почвах в севооборотах с картофелем возможно использование биологизированной системы удобрения с получением планового урожая. По воздействию на урожайность, качество продукции и плодородие почв она не уступает существенно ор-

гано-минеральной системе удобрения, но экономически более выгодна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков М.Н., Тужилин В.М., Самохина О.А. Система биологизации земледелия в Нечерноземной зоне. М.: Росинформагротех, 2007. 296 с.
2. Каюмов М.К. Программирование продуктивности полевых культур. Справочник. М.: Росагропромиздат, 1989. 368 с.
3. Система ведения земледелия Владимирской области. Владимир, 1983. 313 с.
4. Панников В.Д. Программа и методика исследований в Географической сети полевых опытов по комплексному применению средств химизации в земледелии М., 1990. 187 с.
5. Методические указания по определению экономической эффективности удобрений и других средств химизации, применяемых в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1979. 25 с.

Evaluation of Fertilizer Systems in the Row Crop Rotation with Potatoes

M. N. Novikov

All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – a Branch of the Verkhnevolzhsky FASC
ul. Pryanishnikova 2, Sudogodsky district, Vladimir region, p. Vyatkinо 601390, Russia

E-mail: novik.mih@yandex.ru

During 2001–2014 and in the conditions of the Central Non-Chernozem zone, various fertilizer systems were evaluated on sod-podzolic sandy loam soils when cultivating potato in a field crop rotation with a planned yield of 250 c/ha. It is shown that in addition to the traditional organo-mineral fertilizer system, a biologized system can be successfully used, which includes straw of field crops, siderates, biological nitrogen instead of manure and compost. Both fertilizer systems had an almost equal effect on the phytopathological and entomological condition of crops, plant development, contributed to improving the mineral nutrition of potatoes, increasing soil fertility, and obtaining the yield of the specified parameters. Judging by the indicators of yield and changes in the agrochemical properties of the soil, the biologized fertilizer system was essentially not inferior to the traditional organo-mineral one. If we take into account that 334 kg/ha nutrition elements were introduced with a biologized fertilizer system for potatoes, 849 kg/ha with an organo-mineral one, and the indicators of their removal by the harvest are quite close, then we can assert the priority of the coefficient of the use of nutrition elements by potato plants from a biologized fertilizer system. Due to the fact that with a biologized fertilizer system, fewer batteries were used for potatoes, economically it turned out to be more profitable.

Key words: fertilizer systems, potatoes, yield, diseases and pests, soil fertility, tubers quality.

УДК :631.81:635.18

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА СОХРАНЯЕМОСТЬ ОВОЩЕЙ И ИЗМЕНЕНИЕ ИХ КАЧЕСТВА В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ

© 2022 г. В. А. Борисов¹, Е. В. Янченко¹, О. Н. Успенская^{1,*}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального научного центра овощеводства
140155 д. Веря, 500, Раменский р-н, Московская обл., Россия

*E-mail: vniioh@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.2022 г.

После доработки 23.07.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В отделе земледелия и агрохимии ВНИИО – филиале ФНЦО в течение длительного времени изучали влияние различных видов удобрений на сохраняемость и качество овощей разных ботанических семейств. Изучали капусту белокочанную, морковь, свеклу столовую, дайкон, редьку, брюкву, репу, капусту цветную и брокколи в краткосрочных и долгосрочных (стационарных) полевых опытах в течение 2005–2020 гг. Было показано, что наилучшую сохраняемость овощей обеспечивало применение полного минерального удобрения (NPK) в научно обоснованных расчетных дозах (87.7%), а также применение фосфорно-калийных (PK) удобрений (87.4%). Для всех культур в целом органические удобрения (навоз, компост на основе птичьего помета) обеспечили сохраняемость продукции на более низком, чем в контроле, уровне (79.9 против 82.1%). Однако для отдельных культур (капуста белокочанная, дайкон, репа) органические удобрения в ряде опытов обеспечили сохраняемость выше контрольной, а свеклы столовой – наивысшую (86.8%). Совместное применение органических удобрений с минеральными улучшало сохраняемость практически всех овощей. Меньше всего подвергались болезням овощи, выращенные с применением полного минерального и фосфорно-калийного удобрений (5.2–5.9%), больше всего – выращенные без удобрений (11.4%) или с применением органических удобрений (12.2%). По сравнению с вариантами без удобрений качественные показатели продукции (сухое вещество, витамины, сахара) как выращенной с применением минеральных, так и органических удобрений, были выше для всех культур, а минеральные удобрения не имели преимуществ перед органическими. Содержание сахаров после хранения в отдельных культурах (морковь, свекла столовая) было больше при применении органических удобрений, чем минеральных. Содержание нитратов при хранении, как правило, снижалось, зачастую значительно, во всех видах овощной продукции.

Ключевые слова: овощи, сохраняемость, болезнеустойчивость, качество, сахара, витамины, нитраты.

DOI: 10.31857/S0002188122120043

ВВЕДЕНИЕ

Овощные культуры являются основным источником витаминов, биологически активных веществ, минеральных солей для человека, продолжительность жизни которого во многом зависит от уровня потребления и качества овощей. Поэтому очень важно в течение всего годового цикла обеспечивать население полноценными овощами.

Известно, что сохраняемость и качество овощей зависит от видов удобрений, применяемых для их выращивания. В последние годы, в связи с внедрением в сельское хозяйство мира новых идей “органического земледелия” наметились

тенденции к отказу от химических удобрений. Однако, известно также, что в некоторых случаях чрезмерное применение органических удобрений может привести к снижению качества продукции и возрастанию болезней овощей при длительном хранении. В связи с создавшимся положением возникает необходимость более тщательного изучения этого вопроса.

Климатические условия России не позволяют обеспечивать круглогодичное снабжение людей свежей овощной продукцией, поэтому ее приходится хранить в течение часто длительных сроков, что требует разработки специальных технологий хранения, строительства современных овощных хранилищ, подбора лучших сортов и

технологий выращивания овощей специально для длительного хранения.

Из общего количества овощей, производимых в России, 30–35% потребляется в период уборки, для 25% зеленных и ранних овощей требуется краткосрочное хранение (до 3-х мес.), 40–45% овощной продукции необходимо хранить от 6-ти до 9-ти мес.

Согласно ранее проведенным исследованиям, выяснена положительная роль фосфорно-калийных удобрений и отрицательный эффект от избытка азотных удобрений, внесенных под поздние овощные культуры [1–4], а также ухудшение лежкости овощей, выращенных на богатых азотом пойменных и торфяных почвах [5]. В более поздних исследованиях разработана технология выращивания овощей специально для длительного хранения [6–9].

В последние годы, в связи с внедрением в сельское хозяйство мира новых идей “органического земледелия” наметились тенденции отказа от химических удобрений, ГМО и пестицидов, и принимаются соответствующие законы. Однако, в настоящее время известно, что в некоторых случаях чрезмерное применение органических удобрений (особенно жидкого навоза КРС и свиного) в овощеводстве может привести к снижению качества продукции и возрастанию болезней овощей при длительном хранении [10, 11]. Эта тенденция недостаточно обоснована в настоящее время и требует более тщательного изучения. Цель работы – изучение применения органических и минеральных удобрений под овощные культуры разных ботанических семейств для определения их влияния на сохраняемость, болезнеустойчивость, товарное и биохимическое качество продукции после хранения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Научную работу проводили в отделе земледелия и агрохимии ВНИИ овощеводства (Раменский р-н, Московская обл.) в краткосрочных и длительных (стационарных) опытах в течение 2005–2020 годов. Полевые опыты закладывали на аллювиальной луговой почве поймы р. Москвы, типичной для овощеводческих хозяйств Подмосковья.

Характеристики почвы: реакция среды – близкая к нейтральной, содержание гумуса – среднее, обеспеченность подвижным фосфором – хорошая, содержание обменного калия – среднее.

Все полевые и лабораторные опыты проводились в соответствии с принятыми методиками [10, 12, 13].

Дозы минеральных удобрений определяли относительно базовой, расчетной потребности каждой из культур в основных элементах питания: капусты белокочанной – N150P100K250, моркови – N90P60K120, свеклы столовой – N120P60K210, дайкона – N60P60K60, редьки – N60P60K60, брюквы – N60P60K60, репы – N60P60K60, капусты цветной – N120P60K150, капусты брокколи – N120P60K150. В некоторых из вариантов опытов какой-то элемент питания отсутствовал, либо его вносили в двойной дозе.

В качестве органических удобрений использовали перепревший навоз КРС в дозах 30–50 т/га, с 2018 г. – биокомпост марки БИУД на основе птичьего помета, торфа, опилок и доломитовой муки в дозе 6 т/га.

Хранение овощей осуществляли в овощехранилище, оборудованном холодильными камерами с регулируемыми условиями хранения. Сохраняемость овощей и поражение их болезнями определяли в соответствии с действующими методиками и методическими указаниями [14–18].

Биохимический состав овощной продукции определяли в агрохимической лаборатории ВНИИО по общеизвестным методикам: сухое вещество – по ГОСТ 28561-90, витамин С – по ГОСТ 24556-89, сахара – по ГОСТ 8756.13-87, нитраты – по ГОСТ 29270-95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты учета сохраняемости 9-ти культур различных ботанических семейств позволили выяснить, что в целом выход товарной продукции после хранения изменялся в очень широких пределах (табл. 1). Наилучшую сохраняемость обеспечивало применение полного минерального удобрения (НРК) в научно обоснованных расчетных дозах. Практически такой же выход товарной продукции был получен при применении фосфорно-калийных минеральных удобрений (РК). В отсутствие фосфорных и особенно калийных удобрений сохраняемость снижалась до уровня, в ряде случаев более низкого, чем в контрольных вариантах (без удобрений). Применение повышенных доз азотных удобрений (N₂РК), как правило, оказывало отрицательный эффект.

Применение органических удобрений снижало сохраняемость продукции. Однако для некоторых культур (капусты белокочанной, дайкона, репы) при применении органических удобрений в

Таблица 1. Влияние удобрений на сохраняемость овощной продукции (2005–2020 гг.)

Культура	Сохраняемость овощей, %									HCP ₀₅
	Без удобрений	NP	NK	PK	NPK	N ₂ PK	NPK ₂	OY	OY+NPK	
Капуста белокочанная	73.0	71.3	73.6	76.2	74.2	71.5	75.5	75.1	77.7	1.2–2.7
Морковь	84.1	81.7	81.9	85.1	85.8	84.5	86.4	79.6	85.7	2.5–4.2
Свекла столовая	80.8	78.4	80.5	86.2	81.9	79.6	83.0	86.8	81.8	2.1–4.1
Дайкон	80.2	89.8	90.3	91.8	91.8	85.9	93.0	83.9	88.5	3.4–4.4
Редька	86.9	88.4	90.7	95.4	94.6	85.5	93.4	86.6	91.0	4.1–4.5
Брюква	91.3	91.4	89.4	94.7	95.7	93.8	95.8	92.5	92.2	2.9–3.4
Репа	94.5	95.8	95.4	98.2	98.0	92.0	98.1	98.0	98.4	2.9–3.6
Капуста цветная	68.6	80.2	82.2	83.1	85.1	–	–	61.8	71.7	3.2–3.8
Капуста брокколи	55.8	57.1	74.3	75.7	82.7	–	–	54.7	62.5	3.3–4.1
Среднее	82.1	81.6	84.3	87.4	87.7	–	–	79.9	83.3	–

Примечание. OY – органические удобрения. То же в табл. 2–6.

Таблица 2. Влияние удобрений на поражение овощей болезнями в период зимнего хранения (2005–2020 гг.)

Культура	Поражение болезнями при хранении, %									HCP ₀₅
	Без удобрений	NP	NK	PK	NPK	N ₂ PK	NPK ₂	OY	OY+NPK	
Капуста белокочанная	23.0	35.3	27.1	16.3	22.5	27.9	20.6	23.5	18.4	0.5–1.2
Морковь	7.3	5.2	10.9	8.6	7.8	8.1	5.5	12.5	9.3	0.4–1.9
Свекла столовая	9.9	12.7	12.3	7.0	10.0	13.5	10.0	7.6	10.6	0.5–2.0
Дайкон	12.0	3.9	3.0	2.8	2.2	8.2	2.7	8.2	4.1	0.3–1.2
Редька	8.4	6.5	4.4	0.6	0.7	8.6	2.2	8.7	4.6	0.3–0.8
Брюква	0	2.7	2.2	0	0	0.7	0	1.6	1.5	1.1–1.7
Репа	2.9	2.5	2.6	0	0	0	0	2.4	0	0.2–0.8
Капуста цветная	18.6	7.7	7.5	5.8	4.4	–	–	22.1	16.8	0.6–1.5
Капуста брокколи	21.2	20.9	14.9	6.3	5.7	–	–	23.1	19.4	0.8–1.8
Среднее	11.4	10.8	9.4	5.2	5.9	–	–	12.2	9.4	–

ряде опытов сохраняемость была выше контрольной, а свеклы столовой – наивысшей. Совместное применение органических удобрений с минеральными улучшало сохраняемость практически всех культур.

Сохраняемость овощей в зимний период особенно сильно зависит от развития болезней при их хранении. Выяснено, что меньше болели традиционные российские корнеплоды брюква и репа, а больше – белокочанная капуста, брокколи и цветная. Меньше всего подвергались болезням овощи, выращенные с применением полного минерального и фосфорно-калийного удобрений,

больше всего – выращенные без удобрений или с применением органических удобрений. Совместное использование органических удобрений с полным минеральным снижало развитие болезней овощей при хранении (табл. 2).

По содержанию сухого вещества часто прогнозируют потенциальную лежкость овощной продукции. Чем больше сухого вещества, тем лучше лежкость. По нашим данным, его содержание во всех вариантах применения удобрений, включая органические, в среднем было выше, чем в не-удобренных вариантах. Избыток азота снижал его содержание практически во всех видах овощей.

Таблица 3. Влияние минеральных и органических удобрений на содержание сухого вещества в овощах после хранения продукции (2005–2020 гг.)

Культура	Содержание сухого вещества, %									Стандартное отклонение (σ)
	Без удобрений	NP	NK	PK	NPK	N ₂ PK	NPK ₂	OY	OY+NPK	
Капуста белокочанная	7.0 ± 0.4	6.7 ± 0.3	6.7 ± 0.3	7.1 ± 0.4	6.8 ± 0.3	6.5 ± 0.3	6.9 ± 0.4	7 ± 0.4	7.1 ± 0.4	0.2
Морковь	9.2 ± 0.5	9.2 ± 0.5	9.1 ± 0.5	9.4 ± 0.5	8.7 ± 0.4	8.6 ± 0.4	9.6 ± 0.5	9.4 ± 0.5	9.3 ± 0.5	0.3
Свекла столовая	14.2 ± 0.7	13.5 ± 0.7	13 ± 0.7	15 ± 0.8	12.9 ± 0.7	10.6 ± 0.5	12.6 ± 0.6	14.1 ± 0.7	12.3 ± 0.6	1.3
Капуста цветная	9.1 ± 0.5	9.1 ± 0.5	9.4 ± 0.5	10.8 ± 0.5	11.3 ± 0.6	–	–	8.4 ± 0.4	8.7 ± 0.4	1.1
Капуста брокколи	9.7 ± 0.5	11 ± 0.6	10.3 ± 0.5	11.3 ± 0.6	11.6 ± 0.6	–	–	10.8 ± 0.5	10.9 ± 0.6	0.6
Брюква	8.9 ± 0.5	11.2 ± 0.6	11.5 ± 0.6	11.6 ± 0.6	11.4 ± 0.6	7.7 ± 0.4	11.3 ± 0.6	10.8 ± 0.54	10.6 ± 0.5	1.4
Репка	7.3 ± 0.4	7.2 ± 0.4	8 ± 0.4	8 ± 0.4	7.8 ± 0.4	7.6 ± 0.4	8 ± 0.4	7.7 ± 0.39	8 ± 0.40	0.3
Дайкон	5.4 ± 0.3	5.1 ± 0.3	5 ± 0.3	5 ± 0.3	5.2 ± 0.3	5 ± 0.3	5.2 ± 0.3	5.3 ± 0.3	5.2 ± 0.3	0.1
Редька	9.3 ± 0.5	8.7 ± 0.4	9.3 ± 0.5	9.3 ± 0.5	9.8 ± 0.5	9.1 ± 0.5	10.1 ± 0.5	9.5 ± 0.5	9.6 ± 0.5	0.4
Среднее	8.8	8.8	9.0	9.3	8.9	–	–	9.1	8.9	–

По сравнению с неудобренными вариантами органические удобрения обеспечивали тот же или более высокий уровень содержания сухого вещества во всех видах овощей. Совместное применение органических и минеральных удобрений не оказало заметного влияния (табл. 3). Наибольшим содержанием сухого вещества отличались свекла столовая, морковь, редька, капуста цветная и брокколи.

Сахаристость овощей является важным показателем их качества и лежкости. Согласно полученным данным, выяснено, что в среднем наибольшее содержание сахаров имели овощи, выращенные при применении фосфорно-калийных удобрений, а также при комплексном применении органических и минеральных удобрений. Если сравнивать действие минеральных удобрений с органическими, то в среднем содержание сахаров во всех культурах было практически одинаковым. Однако применение органических удобрений увеличивало содержание сахаров по сравнению с контролем в отдельных культурах: капусте белокочанной, моркови, дайконе, редьке, капусте брокколи. По сравнению с вариантами применения полного минерального удобрения большую сахаристость после хранения имели морковь и свекла столовая (табл. 4).

Изучение содержания основных витаминов в продукции показало, что как минеральные, так и органические удобрения обеспечивали при хра-

нении практически один и тот же уровень их содержания в овощах (табл. 5). Следует отметить очень высокий уровень содержания витамина С в капусте цветной и брокколи.

В научной литературе активно обсуждаются вопросы о избыточном накоплении нитратов при применении азотных удобрений и даже введены запреты на их применение в органическом земледелии. Наши исследования в течение многих лет показали, что содержание нитратов в овощах можно регулировать путем применения калийных удобрений, сидератов, подбора сортов, регулирования густоты стояния растений [8]. Очень важным фактором уменьшения содержания NO_3^- в овощах являются сроки уборки культур и условия хранения продукции. В процессе хранения содержание NO_3^- в овощах, как правило, снижалось, зачастую значительно (табл. 6). Этот факт открывает путь к закладке на хранение некоторой части выращенной овощной продукции, имеющей превышение содержания в ней нитратов. Уровень превышения и сроки хранения такой продукции предстоит уточнить в дальнейших исследованиях для каждой из культур.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что наилучшую сохраняемость овощей обеспечило применение для их выращивания полного минерального удобрения (NPK) в

Таблица 4. Влияние удобрений на содержание суммы сахаров после хранения овощной продукции (2005–2020 гг.)

Культура	Содержание суммы сахаров, %									Стандартное отклонение (σ)
	Без удобрений	NP	NK	PK	NPK	N ₂ PK	NPK ₂	OY	OY+NPK	
Капуста бело-кочанная	3.2 ± 0.3	3.6 ± 0.1	3.6 ± 0.1	3.5 ± 0.1	3.6 ± 0.1	3.1 ± 0.4	3.3 ± 0.2	3.6 ± 0.1	3.8 ± 0.3	0.23
Морковь	4.5 ± 0.2	4.3 ± 0.4	4.8 ± 0.1	4.5 ± 0.2	4.4 ± 0.3	4.3 ± 0.4	5.2 ± 0.5	5.4 ± 0.6	4.8 ± 0.1	0.4
Свекла столовая	9.2 ± 1.0	8.2 ± 0.3	7.8 ± 0.1	10.0 ± 1.1	8.0 ± 0.1	5.7 ± 1.2	6.6 ± 1.3	8.4 ± 0.5	7.4 ± 0.5	1.3
Дайкон	2.8 ± 0.2	2.9 ± 0.1	3.2 ± 0.2	3.0 ± 0.1	3.1 ± 0.1	3.1 ± 0.1	2.9 ± 0.1	3.2 ± 0.2	2.7 ± 0.3	0.2
Редька	3.5 ± 0.4	3.5 ± 0.4	4.1 ± 0.2	4.4 ± 0.5	3.8 ± 0.1	3.6 ± 0.3	4.2 ± 0.3	3.8 ± 0.1	4.1 ± 0.2	0.3
Брюква	4.9 ± 0.2	5.0 ± 0.2	4.9 ± 0.2	4.8 ± 0.3	5.7 ± 0.6	4.2 ± 0.9	6.6 ± 1.5	4.8 ± 0.3	5.0 ± 0.1	0.7
Репа	4.9 ± 0.2	4.3 ± 0.4	4.6 ± 0.1	5.4 ± 0.7	4.6 ± 0.1	4.6 ± 0.1	5.0 ± 0.3	4.5 ± 0.2	4.5 ± 0.2	0.3
Капуста цветная	2.0 ± 0.2	2.1 ± 0.1	2.2 ± 0.1	2.6 ± 0.4	2.5 ± 0.3	–	–	2.0 ± 0.20	2.0 ± 0.2	0.3
Капуста брокколи	1.20 ± 0.4	1.6 ± 0.1	1.7 ± 0.1	1.9 ± 0.3	2.0 ± 0.4	–	–	1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.1	0.3
Среднее	4.0	3.9	4.1	4.5	4.2	–	–	4.1	4.4	–

Таблица 5. Влияние удобрений на содержание витамина С после хранения овощной продукции (2005–2020 гг.).

Культура	Содержание витамина С, мг%									Стандартное отклонение (σ)
	Без удобрений	NP	NK	PK	NPK	N ₂ PK	NPK ₂	OY	OY+NPK	
Капуста бело-кочанная	18.0 ± 0.2	17.8 ± 0.4	17.2 ± 1.0	18.1 ± 0.1	18.2 ± 0.1	16.3 ± 1.9	18.3 ± 0.1	19.9 ± 1.7	20.0 ± 1.8	1.2
Морковь*	12.4 ± 0.5	12.1 ± 0.8	14.2 ± 1.3	12.7 ± 0.2	12.0 ± 0.9	12.8 ± 0.0	12.7 ± 0.2	12.4 ± 0.5	14.6 ± 1.7	0.9
Свекла столовая	18.0 ± 3.8	20.0 ± 1.8	20.0 ± 1.8	26.4 ± 4.6	21.0 ± 0.8	22.0 ± 0.2	20.0 ± 1.8	20.0 ± 1.8	28.9 ± 7.1	3.5
Капуста цветная	52.5 ± 10.7	66.8 ± 3.6	68.7 ± 5.5	75.9 ± 12.7	69.2 ± 6.0	–	–	58.0 ± 5.2	51.3 ± 11.9	9.3
Капуста брокколи	61.9 ± 8.1	63.4 ± 6.6	73.8 ± 3.8	71.2 ± 1.2	71.8 ± 1.8	–	–	76.3 ± 6.3	71.4 ± 1.4	5.3
Брюква	18.7 ± 4.9	21.3 ± 2.3	24.9 ± 1.3	25 ± 1.4	26.3 ± 2.7	22.4 ± 1.2	26.5 ± 2.9	23.7 ± 0.1	23.9 ± 0.3	2.5
Репа	14.3 ± 0.5	13.8 ± 1.8	14.0 ± 0.8	14.5 ± 0.3	16.0 ± 1.2	12.2 ± 2.6	18.6 ± 3.8	14.8 ± 0.7	15.2 ± 0.4	1.8
Дайкон	11.1 ± 0.5	10.9 ± 0.7	10.8 ± 0.8	12.4 ± 0.8	12.2 ± 0.6	12.0 ± 0.4	10.0 ± 1.6	10.5 ± 1.1	14.8 ± 3.2	1.5
Репа	14.1 ± 0.1	14.8 ± 0.7	12.6 ± 1.5	13.9 ± 0.2	12.3 ± 1.8	13.2 ± 0.9	15.1 ± 1.0	15.5 ± 1.4	15.1 ± 1.0	1.2
Среднее	24.5	26.8	28.5	30.0	28.8	–	–	27.9	28.4	–

*Каротин.

научно обоснованных расчетных дозах (87.7%), а также фосфорно-калийных удобрений (PK) – 87.4%. В отсутствии фосфорных и особенно калийных удобрений сохраняемость продукции снижалась в ряде случаев до уровня более низко-

го, чем в вариантах без удобрений. Повышенные дозы азотных удобрений (N₂PK) оказывали отрицательный эффект на сохраняемость овощей.

2. Применение органических удобрений обеспечило сохраняемость продукции на 79.9%, что

Таблица 6. Влияние удобрений на изменение содержания нитратов в овощной продукции после 6-месячного хранения (2005–2020 гг.)

Удобрения	Морковь		Свекла столовая		Брюква		Репка		Дайкон		Редька	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Без удобрения	104	239	330	158	187	159	147	132	377	283	134	132
NP	492	278	1490	1450	238	209	176	156	456	281	240	129
NK	321	230	1900	1300	278	243	102	91	453	311	261	160
PK	126	164	460	305	196	171	134	125	419	283	214	154
NPK	435	292	1450	1490	252	214	162	142	460	273	261	171
N ₂ PK	499	438	2560	2100	366	312	265	246	580	334	413	197
NPK ₂	435	288	1580	955	160	138	112	90	480	295	213	112
OY	160	142	740	740	167	142	101	80	466	333	304	109
OY + NPK	260	196	1390	775	239	189	157	128	424	318	404	113
Среднее	314	252	1320	1030	231	197	151	132	457	301	272	142

Примечание. В графе 1 – в период уборки, 2 – после хранения.

было меньшим, чем в неудобранных вариантах (82.1%). Однако у некоторых культур (капусты белокачанной, дайкона, репы) при применении органических удобрений в ряде опытов сохраняемость была выше контрольной, а у свеклы столовой – наивысшей (86.8%). Совместное применение органических удобрений с минеральными улучшало сохраняемость практически всех видов овощей.

3. Сохраняемость овощей в зимний период особенно сильно зависела от развития болезней при их хранении. Меньше всего подвергались болезням овощи, выращенные с применением полного минерального и фосфорно-калийного удобрений (5.2–5.9%), больше всего – выращенные без удобрений (11.4%) или с применением органических удобрений (12.2%). Совместное использование органических удобрений с полным минеральным снижало развитие болезней при хранении.

4. Содержание сухого вещества во всех вариантах опытов применения удобрений, включая органические, в среднем было больше (8.9–9.3%), чем в неудобранных вариантах (8.8%). Избыток азота снижал его содержание практически во всех видах овощей. Органические удобрения обеспечивали практически всем культурам тот же или более высокий уровень содержания сухого вещества по сравнению с неудобранными вариантами. Совместное применение органических и минеральных удобрений не оказало заметного влияния на этот показатель качества продукции.

5. Наибольшее содержание сахаров сохраняли овощи, выращенные на фоне фосфорно-калийных удобрений, а также при комплексном применении органических и минеральных удобрений (4.2–4.5%), в неудобранных вариантах – 4.0%. Органические удобрения, особенно совместно с минеральными не снижали сахаристость овощей, а при применении на отдельных культурах показали более высокие результаты по сравнению с контролем: капуста белокачанная, морковь, дайкон, редька, капуста брокколи. По сравнению с применением полного минерального удобрения большая сахаристость после хранения отмечена у моркови и свеклы столовой.

6. Изучение содержания основных витаминов в продукции показало, что наибольшее их количество сохранялось после хранения при выращивании овощей на фоне фосфорно-калийных удобрений. Овощи, выращенные при применении органических удобрений, содержали практически такое же количество витаминов. В отсутствии калия в удобрениях содержание витамина С снижалось.

7. В процессе хранения содержание нитратов в овощах, как правило, снижалось, зачастую значительно. Этот факт открывает путь к закладке на хранение некоторой части выращенной овощной продукции, имеющей превышение ПДК по содержанию в ней нитратов. Уровень превышения и сроки хранения такой продукции предстоит уточнить в дальнейших исследованиях для каждой культуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Церевитинов Ф.В.* Химия и товароведение свежих плодов и овощей. М.: Росторгиздат, 1949. 611 с.
2. *Авдонин Н.С.* Почвы, удобрения и качество растениеводческой продукции. М.: Колос, 1979. 302 с.
3. *Дьяченко В.С.* Овощи и их пищевая ценность. М.: Россельхозиздат, 1979. 159 с.
4. *Полегаев В.И.* Хранение плодов и овощей. М.: Россельхозиздат, 1982. 254 с.
5. *Палилов Н.А., Дьяченко В.С.* Лежкость и качество овощей, выращенных на пойме // Биохимия плодов и овощей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 7. 218 с.
6. *Борисов В.А., Литвинов С.С., Романова А.В.* Качество и лежкость овощей. М., 2003. 627 с.
7. *Борисов В.А., Лысенко И.И.* Удобрения и регуляторы роста на цветной капусте // Картофель и овощи. 2015. № 3. С. 20–21.
8. *Борисов В.А.* Система удобрений овощных культур. М.: Росинформагротех, 2016. 394 с.
9. *Лысенко И.И., Борисов В.А.* Удобрения и регуляторы роста на брокколи // Картофель и овощи. 2014. № 10. С. 15–16.
10. *Литвинов С.С.* Научные проблемы современного овощеводства. М.: РАСХН, 2008. 776 с.
11. *Конашенков А.А.* Научное обоснование систем удобрения для прецизионного применения в условиях Северо-Запада России: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб., 2014. 40 с.
12. Методика полевого опыта в овощеводстве / Под ред. Белика В.Ф. М.: Россельхозиздат, 1979. 159 с.
13. *Литвинов С.С.* Методика опытного дела в овощеводстве. М.: РАСХН, 2011. 648 с.
14. Методические указания по проведению научно-исследовательских работ по хранению овощей. М.: ВАСХНИЛ, 1982. 34 с.
15. Методика опытного дела в овощеводстве и бахчеводстве / Под ред. Белика В.Ф. М.: Агропромиздат, 1992. 319 с.
16. *Дементьева М.И., Выгонский М.И.* Болезни плодов, овощей и картофеля при хранении. М.: Агропромиздат, 1988. 231 с.
17. *Дьяченко В.С.* Болезни и вредители овощей и картофеля при хранении. М.: Агропромиздат, 1985. 192 с.
18. *Богоутдинов Д.З., Фоминых Т.С., Кастальева Т.Б., Гирсова Н.В., Павловская Н.Е., Гагарина И.Н., Мишууров Н.П., Неменуцкая Л.А., Пискунова Н.А.* Методы диагностики возбудителей заболеваний овощных культур. Аналит. обзор. М.: Росинформагротех, 2020. 116 с.

Effect of Fertilizers on the Preservation of Vegetables and Changes in Their Quality during Storage

V. A. Borisov^a, E. V. Yanchenko^a, and O. N. Uspenskaya^{a,#}

^aThe All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing – a Branch of the Federal Scientific Center of Vegetable Growing d. Vereya, 500, Ramenskiy district, Moscow region 140155, Russia

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

The Department of agriculture and agrochemistry of the All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing – a branch of the Federal Scientific Center of Vegetable Growing has been studying the effect of various types of fertilizers on the preservation and quality of vegetables of different botanical families for a long time. White cabbage, carrots, table beets, daikon, radish, rutabaga, turnips, cauliflower and broccoli were studied in short- and long-term (stationary) field experiments during 2005–2020. It was shown that the best preservation of vegetables was ensured by the use of complete mineral fertilizer (NPK) in scientifically based calculated doses (87.7%), as well as the use of phosphorus-potassium (PK) fertilizers (87.4%). For all crops in general, organic fertilizers (manure, compost based on bird droppings) ensured the preservation of products at a lower level than in the control (79.9 vs. 82.1%). However, for individual crops (white cabbage, daikon, turnip), organic fertilizers in a number of experiments provided preservation above the control, and table beets – the highest (86.8%). The combined use of organic fertilizers with mineral fertilizers improved the preservation of almost all vegetables. Vegetables grown with the use of full mineral and phosphorus-potassium fertilizers (5.2–5.9%) were the least affected by diseases, most of all – grown without fertilizers (11.4%) or with the use of organic fertilizers (12.2%). Compared with the options without fertilizers, the quality indicators of products (dry matter, vitamins, sugars) both those grown with the use of mineral and organic fertilizers were higher for all crops, and mineral fertilizers had no advantages over organic ones. The sugar content after storage in individual crops (carrots, table beets) was higher when using organic fertilizers than mineral fertilizers. The nitrate content during storage, as a rule, decreased, often significantly, in all types of vegetable products.

Key words: vegetables, preservation, disease resistance, quality, sugars, vitamins, nitrates.

УДК 57.044:577.151.042

ВЛИЯНИЕ ДИЭТИЛМАЛЕАТА НА АКТИВНОСТЬ ГЛУТАТИОН-S-ТРАНСФЕРАЗЫ ИМАГО *Musca domestica* L.¹

© 2022 г. А. Г. Кинарейкина¹, Е. А. Силиванова^{1,*}¹Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной энтомологии и арахнологии – филиал ТюмНЦ СО РАН

625517 Тюменская обл., Тюменский р-н, с. Мальково, ул. Мира, 5, Россия

*E-mail: sylvanovaea@mail.ru

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Диэтилмалеат (DEM) – синергист инсектицидных соединений, который применяют при изучении механизмов инсектицидной устойчивости насекомых. Оценена гибель самок и самцов комнатной мухи *Musca domestica* L. после топикального нанесения DEM в разных дозах (0.2–5.0 мкг/особь), а также активность глутатион-S-трансферазы (GST) у выживших особей через 1 и 48 ч после обработки. Доза DEM, не приводившая к гибели насекомых, составила 0.2 и 0.5 мкг/особь для самцов и самок соответственно. Топикальное нанесение DEM в дозе 2 мкг/особь не приводило к статистически значимому изменению активности GST у самок и самцов *Musca domestica* L. по сравнению с контрольными особями, при этом гибель насекомых не превышала допустимый уровень (5%). Использование DEM в качестве ингибитора GST в дозе 5 мкг/особь, вызывавшей 10–30%-ную гибель *M. domestica* обоего пола, может не приводить к угнетению активности целевого фермента у самок в отличие от самцов.

Ключевые слова: синергисты инсектицидов, ингибиторы, ферменты детоксикации, самки, самцы, комнатная муха.

DOI: 10.31857/S0002188122120079

ВВЕДЕНИЕ

Синергисты инсектицидов – это химические вещества, которые при использовании их в сублетальных концентрациях способны значительно повышать токсичность инсектицида для насекомых [1, 2]. Синергисты могут улучшать проникновение, транспортировку или доступность инсектицида, выступать в качестве суррогатных субстратов или ингибиторов ферментов детоксикации и белков-транспортеров, изменяя тем самым ответную реакцию насекомого на пестицид [1, 2]. Синергисты представляют коммерческий интерес, поскольку их сочетание с инсектицидами повышает эффективность последних, что помогает свести использование пестицидов к минимуму и

является полезным в преодолении инсектицидной резистентности насекомых [2]. Синергисты, обладающие активностью в отношении специфических ферментных систем детоксикации, используют для изучения механизмов устойчивости к инсектицидам и определения конкретных метаболических путей [3].

Диэтилмалеат (Diethyl maleate, **DEM**) является синергистом, который обычно используют в качестве ингибитора глутатион-S-трансфераз (**GSTs**, КФ 2.5.1.18) насекомых для выявления метаболической устойчивости или для повышения эффективности инсектицидов [3–7]. Глутатион-S-трансферазы представляют семейство ферментов II фазы детоксикации, которые катализируют реакцию с восстановленным глутатионом (**GSH**) и конъюгируют ксенобиотические соединения через сульфгидрильную группу, образуя более растворимое соединение, которое может выводиться из организма [8]. DEM способен конъюгировать GSH, что снижает способность GSTs использовать его для конъюгации с инсектицидами

¹ Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований РАН (№ 121042000076-5 “Разработка методов научно-обоснованного применения средств дезинсекции, химической и биологической регуляции численности паразитов с целью сохранения эпизоотического благополучия и качества здоровья сельскохозяйственных и непродуктивных животных, пчел и птиц”), запланированных во ВНИИВЭА-филиале ТюмНЦ СО РАН на 2021–2023 гг.

или с продуктами окислительного стресса, который они вызывают [9].

Как правило, синергистические соединения применяют в концентрациях и дозах, которые не приводят или приводят к очень низкой смертности насекомых, но являются достаточно высокими для достижения максимального ингибирования целевых ферментов детоксикации [2]. Диапазон концентраций DEM, используемых при изучении механизмов резистентности, довольно широк и составляет от 0.96 [10] до 25–50 мкг/особь [7, 11] для разных видов насекомых. В опубликованных исследованиях механизмов инсектицидной устойчивости комнатной мухи *Musca domestica* (вид, который является модельным при тестировании инсектицидов) приведены разные дозы DEM для взрослых особей: 1 мкг/самка [5, 6], 7 мкг/самка [12], 10 мкг/самка [13], 40 мкг/особь [9]. Однако крайне мало работ, демонстрирующих ингибирование GSTs в организме насекомых под воздействием DEM [14]. Цель работы – оценка влияния диэтилмалеата на активность глутатион-S-трансферазы самок и самцов *Musca domestica* при его топикальном нанесении.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были самки и самцы 3–5-суточного возраста лабораторной линии *Musca domestica* L., содержащейся в стандартных условиях [15]. В предварительных экспериментах методом топикального нанесения устанавливали дозу синергиста, не приводящую к гибели насекомых. На вентральную часть грудного отдела насекомых наносили ацетоновые растворы DEM в объеме 1 мкл. Всего было протестировано 5 доз DEM в диапазоне 0.2–5.0 мкг/особь. В контроле особей обрабатывали 1 мкл ацетона. Затем насекомых помещали в стеклянные стаканчики, снабженные поилками с 5%-ным раствором глюкозы. Учет гибели насекомых проводили через 24 и 48 ч.

Для оценки влияния DEM на активность GST из групп контрольных и обработанных синергистом насекомых отбирали часть особей (по 5–10 самок и самцов для каждой дозы) через 1 ч и 48 ч после обработки (использовали только выживших насекомых) и до исследования хранили при –80°C. Из каждой особи готовили гомогенаты в 0.1 М фосфатном буфере pH 7.6, содержащем 1 мМ DTE, 1 мМ EDTA, 1 мМ PTU, 1 мМ PMSF. Активность GST и содержание белка определяли в супернатантах сразу после центрифугирования (10000 g, 2 мин). Содержание белка в гомогенатах определяли по методу Лоури, используя бычий

сывороточный альбумин в качестве стандарта. Определение активности GST проводили в 96-луночных микропланшетах (MiniMed, Россия) на микропланшетном фотометре Multiskan FC (Thermo Fisher Scientific Inc., Финляндия) с использованием синтетического субстрата 1-хлор-2,4-динитробензена при длине волны 340 нм в течение 20 мин в режиме кинетика [15]. Удельную активность фермента рассчитывали с учетом неферментативного преобразования субстрата, фактора разведения гомогената и содержания белка в пробе и выражали как изменение оптической плотности за 1 мин на мг белка ($\Delta OD/\text{мин}/\text{мг}$ белка). Статистический анализ результатов определения активности фермента проводили с использованием ANOVA и критерия Тьюки для множественных сравнений с помощью пакета программ Statistica 13.3 (StatSoft, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Литературные сведения о дозе диэтилмалеата, применяемой в исследованиях на *M. domestica* разнятся [5, 6, 9, 12, 13], поэтому в предварительных экспериментах оценили смертность имаго при воздействии разными дозами синергиста. Согласно представленным в табл. 1 данным, при обработке взрослых особей *M. domestica* DEM нулевая гибель среди самцов отмечена при использовании дозы 0.2, среди самок – 0.2 и 0.5 мкг/особь. При обработке насекомых DEM в дозе до 2 мкг/особь включительно отмечали допустимый уровень гибели (до 5%) как среди самок, так и среди самцов. Нанесение DEM в дозе 5 мкг/особь приводило к увеличению смертности до 10% среди самок и до 30% среди самцов.

К сожалению, в научной литературе скудно представлены результаты исследований по влиянию разных доз синергистов на активность ферментов детоксикации у насекомых. В частности, в работе [14] изучали влияние DEM в концентрациях, не вызывающих гибель насекомых, на активность GST у 6-ти видов насекомых и обнаружили, что степень ингибирования фермента варьировалась от 18 до 48% в зависимости от вида. Согласно этим исследованиям, увеличение дозы DEM сопровождалось незначительным повышением или снижением степени ингибирования GST у отдельных видов насекомых [14]. Полученные нами результаты определения активности GST у самок и самцов *M. domestica* через 1 ч и 48 ч после топикального нанесения разных доз DEM представлены на рис. 1. Статистический анализ полученных данных не выявил значимого варьирования активности фермента между группами

Таблица 1. Гибель имаго *Musca domestica* через 24 и 48 ч после топикального нанесения диэтилмалеата (DEM)

Доза DEM, мкг/особь	Самки			Самцы		
	число особей в опыте, экз.	число погибших особей, экз. (абс. %)		число особей в опыте, экз.	число погибших особей, экз. (абс. %)	
		через 24 ч	через 48 ч		через 24 ч	через 48 ч
0 (контроль)	80	0 (0%)	1 (1.25%)	75	1 (1.33%)	1 (1.33%)
0.2	50	0 (0%)	0 (0%)	50	0 (0%)	0 (0%)
0.5	40	0 (0%)	0 (0%)	40	2 (5%)	2 (5%)
1	50	0 (0%)	1 (2%)	60	3 (5%)	3 (5%)
2	60	1 (1.7%)	1 (1.7%)	80	2 (2.5%)	2 (2.5%)
5	30	2 (6.7%)	3 (10%)	30	7 (23%)	9 (30%)

самок, обработанных разными дозами синергиста, через 1 ч после обработки. Напротив, варьирование активности GST между группами самцов в такой же период времени после нанесения тех же доз DEM было статистически значимым ($p < 0.001$). Статистически значимого варьирования ферментативной активности как между группами самок, так и между группами самцов через 48 ч после обработки DEM не обнаружено ($p = 0.260$ и $p = 0.0998$ соответственно). Выявлено снижение активности GST у самцов в 1.70 ($p = 0.0016$) и 1.40 ($p = 0.271$) раза через 1 ч и 48 ч соответственно после воздействия DEM в дозе 5 мкг/особь по сравнению с активностью у контрольных особей. Отмеченное угнетение активности GST у самцов через 1 ч после обработки дозой 5 мкг/особь и частичное восстановление активности фермента через 48 ч, вероятно, были связаны с изменением уровня восстановленного глутатиона. Действительно, в опытах на самцах *M. domestica* обнаружили, что нанесение DEM в дозе 40 мкг/особь приводило к снижению содержания глутатиона [9]. Максимальное снижение (до 50% от начального уровня) авторы отмечали через 2 ч, а значительное, но не полное восстановление через 8 ч после обработки [9].

Наблюдала статистически значимые ($p < 0.05$) отличия в активности GST между самками и самцами в контроле и в группе особей, обработанных DEM в дозе 5 мкг/особь (через 1 ч после обработки): у самцов ферментативная активность была соответственно в 1.29 и в 1.98 раза ниже, чем у самок. Выявленные отличия в активности GST по полу в контрольной группе согласовались с литературными сведениями, согласно которым на протяжении имагинальной стадии *M. domestica*

активность GST у самок почти в 2 раза выше, чем у самцов [8].

Проведенные ранее исследования показали, что DEM способен увеличивать токсичность инсектицидов для особей резистентных линий насекомых [7, 11], однако это не всегда бывает так [4, 10]. Что касается *M. domestica*, синергизм DEM по отношению к имидаклоприду наблюдали при использовании дозы 1 мкг/особь в опытах с самками 4-суточного возраста имидаклоприд-резистентной линии [5, 6]. В то время как в исследовании [13] применение DEM не оказало влияния на токсичность спиносада для *M. domestica* резистентной линии при нанесении синергиста на самок 4–6-суточного возраста в дозе 10 мкг/особь. Общепринято, что DEM выступает как ингибитор GSTs, и наблюдаемый синергистический эффект свидетельствует о возможном вкладе GSTs в формирование инсектицидной устойчивости [5–7, 11]. Отсутствие синергизма объясняют тем, что формирование резистентности происходит по механизму нечувствительности мишени к инсектициду вследствие мутаций (например, kdr-мутации в случае пиретроидов) либо тем, что GSTs не принимают участия в метаболизме данного инсектицида [4, 10, 13]. Следует отметить, что в упомянутых выше работах не приведены сведения об активности GST или других ферментов детоксикации у насекомых после обработки DEM. Согласно нашему исследованию, топикальное нанесение DEM в дозе 1 и 2 мкг/особь не сопровождалось статистически значимым изменением активности GST у имаго *M. domestica* лабораторной линии. Полученные результаты демонстрируют также, что использование DEM в качестве ингибитора GST в дозе 5 мкг/особь, вызывавшей 10–30%-ную гибель *M. domestica* обоего пола, мо-

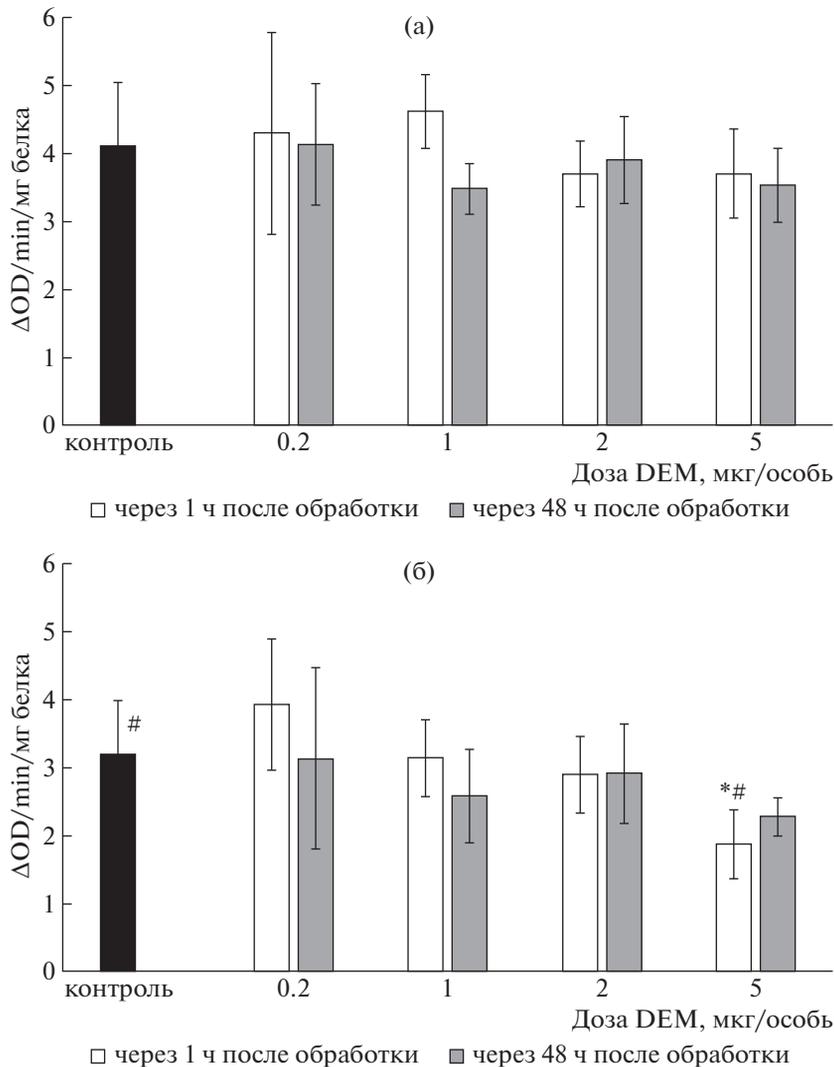


Рис. 1. Активность глутатион-S-трансферазы у самок (а) и самцов (б) *Musca domestica* лабораторной культуры через 1 ч и 48 ч после топикального нанесения диэтилмалеата (DEM) в разных дозах. * Статистически значимо относительно контрольных особей, $p < 0.01$, ** статистически значимо относительно самок аналогичной группы, $p < 0.05$.

жет не приводит к угнетению активности целевого фермента у самок в отличие от самцов. Учитывая полученные результаты и литературные данные, считаем, что для уточнения механизма синергистического действия DEM в отношении инсектицидов необходимы дополнительные исследования по оценке его влияния на активность GST и других ферментов детоксикации у насекомых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синергисты являются важным инструментом для исследований инсектицидной устойчивости насекомых и находят широкое применение при разработке инсектицидных препаратов. Доза синергиста диэтилмалеата, при топикальном нанесении вызывавшая не более 5% гибели имаго

Musca domestica, составила 2 $\mu\text{g}/\text{особь}$. Однако при воздействии данной дозы DEM не обнаружено статистически значимого изменения активности GST ни у самок, ни у самцов по сравнению с контрольными особями. Применение более высокой дозы DEM (5 $\mu\text{g}/\text{особь}$) приводило к увеличению смертности насекомых и только у самцов сопровождалось угнетением активности GST через 1 ч после обработки синергистом. У выживших особей (как самок, так и самцов) не отмечено статистически значимого снижения активности GST через 48 ч после нанесения DEM (5 $\mu\text{g}/\text{особь}$). Обнаруженные особенности изменения активности одного из ферментов детоксикации у самок и самцов *M. domestica* в ответ на воздействие синергистом DEM необходимо учитывать при проведении исследований на данном виде насекомых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bbernard C., Philogene B.J.R. Insecticide synergists – role, importance, and perspectives // J. Toxicol. Environ. Health. 1993. V. 38 (2). P. 199–223.
2. Snoeck S., Greenhalgh R., Tirry L., Clark R.M., Van Leeuwen T., Dermauw W. The effect of insecticide synergist treatment on genome-wide gene expression in a polyphagous pest // Sci. Rep. 2017. V. 7. № 13440.
3. Еремина О.Ю. Синергисты как инструмент энтомотоксикологических исследований: исследование ферментных систем комнатных мух *Musca domestica* L. Сообщ. 1 // Прикл. энтомол. 2011. № 1. С. 27–37.
4. Еремина О.Ю., Олифер В.В., Лопатина Ю.В. Механизмы резистентности к циперметрину и фипронилю у рыжего таракана *Blattella germanica* (L.) (Blattodea: Ectobiidae) // Мед. паразитол. и паразитар. болезни. 2019. № 2. С. 37–47.
5. Li J., Wang Q., Zhang L., Gao X. Characterization of imidacloprid resistance in the housefly *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) // Pest. Biochem. Physiol. 2012. V.102 (2). P. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2011.10.012>
6. Ma Z., Li J., Zhang Y., Shan C., Gao X.W. Inheritance mode and mechanisms of resistance to imidacloprid in the house fly *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) from China // PLOS ONE. 2017. V. 12 (12). № 0189343.
7. Gonzalez-Morales M.A., Romero A. Effect of synergists on deltamethrin resistance in the common bed bug (Hemiptera: Cimicidae) // J. Economic Entomol. 2019. V. 112 (2). V. 786–791.
8. Clark A.G. The comparative enzymology of the glutathione S-transferases from non-vertebrate organisms // Comp. Biochem. Physiol. 1989. V. 92 (3). V. 419–46.
9. Wang W., Mo J.C., Cheng J.A., Zhuang P.J., Tang Z.H. Selection and characterization of spinosad resistance in *Spodoptera exigua* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae) // Pest. Biochem. Physiol. 2006. V. 84 (3). P. 180–187.
10. Pang S., You W.Y., Duan L.S., Song X.Y., Li X.F., Wang C.J. Resistance selection and mechanisms of oriental tobacco budworm (*Helicoverpa assulta* Guenee) to indoxacarb // Pest. Biochem. Physiol. 2012. V. 103 (3). P. 219–223.
11. Ahmadi E., Khajehali J., Rameshgar F. Evaluation of resistance to permethrin, cypermethrin and deltamethrin in different populations of *Musca domestica* (L.), collected from the Iranian dairy cattle farms // J. Asia-Pacific Entomol. 2020. V. 23 (2). P. 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2020.01.014>
12. Shono T., Scott J.G. Spinosad resistance in the housefly, *Musca domestica*, is due to a recessive factor on autosome 1 // Pest. Biochem. Physiol. 2003. V. 75 (1–2). P. 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0048-3575\(03\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0048-3575(03)00011-7)
13. Welling W., de Vries J.W. Synergism of organophosphorus insecticides by diethyl maleate and related compounds in house flies // Pest. Biochem. Physiol. 1985. V. 23 (3). P. 358–369. [https://doi.org/10.1016/0048-3575\(85\)90097-5](https://doi.org/10.1016/0048-3575(85)90097-5)
14. Wu G., Miyata T., Kang C. Y., Xie L. H. Insecticide toxicity and synergism by enzyme inhibitors in 18 species of pest insect and natural enemies in crucifer vegetable crops // Pest. Manag. Sci. 2007. V. 63 (5). P. 500–510.
15. Силиванова Е.А., Шумилова П.А., Левченко М.А. Активность ферментов детоксикации у имаго комнатной мухи *Musca domestica* L. при селекции хлорфенапиром // Биомика. 2020. Т. 12. № 4. С. 492–503.

Effect of Diethylmaleate on the Activity of Dlutathione-S-Transferase Imago *Musca domestica* L.

A. G. Kinareikina^a and E. A. Silivanova^{a, #}

^aThe All-Russian Research Institute of Veterinary Entomology and Arachnology – Branch of the Tyumen Scientific Research Center SB RAS
ul. Mira 5, Tyumen region, Tyumen district, s. Malkovo 625517, Russia

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

Diethylmaleate (DEM) is a synergist of insecticidal compounds, which is used in the study of the mechanisms of insecticidal resistance of insects. The death of females and males of the housefly *Musca domestica* L. after topical application of DEM in different doses (0.2–5.0 mcg/individual), as well as the activity of glutathione-S-transferase (GST) in surviving individuals 1 and 48 hours after treatment, was evaluated. The dose of DEM, which did not lead to the death of insects, was 0.2 and 0.5 micrograms/individual for males and females, respectively. Topical application of DEM at a dose of 2 mcg/individual did not lead to a statistically significant change in GST activity in females and males of *Musca domestica* L. compared with the control individuals, the death of insects did not exceed the permissible level (5%). The use of DEM as a GST inhibitor at a dose of 5 mcg/individual, which caused 10–30% death of *M. domestica* of both sexes, may not lead to inhibition of the activity of the target enzyme in females, unlike males.

Key words: insecticide synergists, inhibitors, detoxification enzymes, females, males, housefly.

УДК: 632.11:633.1:631.421.1

АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИМИ РИСКАМИ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР¹

© 2022 г. В. А. Романенков^{1,3,*}, В. Н. Павлова², М. В. Беличенко^{3,**}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119992 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии
249038 Обнинск, Калужская обл., просп. Ленина, 82, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

*E-mail: romanenkov@soil.msu.ru

**E-mail: geosetvniia@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2022 г.

После доработки 28.06.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Сравнение устойчивости сельскохозяйственных культур к засухам в некоторых регионах Приволжского и Северо-Кавказского ФО, полученной на основе обработки статистических данных и данных Географической сети опытов с удобрениями за периоды 1994–2014 гг. и 1995–2020 гг. позволило выявить тенденции и пространственные закономерности климатических рисков потерь урожаев озимых и яровых пшеницы и ячменя. Показано, что климатически обусловленные риски устойчивости во времени и снижаются в ряду яровая пшеница > ячмень > озимая пшеница. Оптимизация минерального питания растений снижает риск недобора урожая зерновых культур в случае засухи в большинстве случаев на одну градацию. Наибольшее относительное снижение рисков (11–19%) для длительных полевых опытов с удобрениями указывает на более благоприятные условия реализации биоклиматического потенциала зерновыми культурами в опытах по сравнению с производственными условиями за счет лучшей агротехники и более высокого уровня почвенного плодородия на опытных делянках. Экспериментально подтверждена возможность управления устойчивостью систем земледелия с помощью оптимизации доз минеральных удобрений и увеличения посевных площадей зерновых культур, риски возделывания которых снижаются в условиях современного климата.

Ключевые слова: агротехнологии, климатические риски, возделывание зерновых культур.

DOI: 10.31857/S0002188122120110

ВВЕДЕНИЕ

Производство сельскохозяйственных культур является одним из основных секторов экономики, подверженных значительному воздействию изменений климата. Статистика последних лет свидетельствует о растущем во всем мире ущербе в сельскохозяйственном производстве от опасных погодных и климатических явлений [1, 2]. В про-

блеме продовольственной безопасности оценка влияния климатических изменений на возможность использования сельскохозяйственных ресурсов является междисциплинарной, а учет климатических рисков — многоцелевой задачей, включающей мониторинг посевов и прогнозирование урожайности, использование климатической информации для управления рисками, оптимизацию агротехнологий для устойчивого производства, разработку систем поддержки принятия решений, сельскохозяйственное страхование, применение адаптационных подходов в соответствии с наблюдаемыми и ожидаемыми рисками.

По данным Национального союза агроэкологов, в Российской Федерации основными рисками, которые привели к страховым выплатам

¹ Работа поддержана Евразийским центром по продовольственной безопасности (Аграрным центром) МГУ им. М.В. Ломоносова, а также в рамках темы 3.1. “Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций” Плана НИТР Росгидромета на 2020 г., утвержденного приказом № 745 от 31.12.2019 г.

в 2012–2018 гг., стали почвенная засуха (22.2% от объема выплат), атмосферная засуха (21.7%), сухой (19.5%), переувлажнение почвы (16.6%) [3]. В системе агрострахования обычно рассматривают “риск недобора продукции/урожая”. Реализация данного риска проявляется в снижении урожая по причине действия неблагоприятных природных факторов – погодных явлений, не соответствующих условиям развития сельскохозяйственных культур, или распространении болезней растений [1].

Вследствие увеличения частоты засух происходит рост климатически обусловленных рисков при производстве сельскохозяйственных культур [4]. Для преодоления возможных отрицательных последствий и максимального использования положительных воздействий разработана и принята Национальная программа адаптации сельского хозяйства России, которая предусматривает различные уровни адаптации – от России в целом и до субъектов, районов и даже хозяйств. Эти меры адаптации должны в максимальной степени учитывать как наблюдаемые тенденции, так и прогнозы изменений климата, а также ожидаемые последствия этих изменений для зернопроизводящих регионов России.

Ранее нами была проведена работа по изучению устойчивости сельскохозяйственных культур к засухам в некоторых регионах Приволжского и Северо-Кавказского ФО [5]. На основе данных опытов с удобрениями Географической сети с 1993 по 2014 гг. были рассчитаны риски недобора климатически обусловленной урожайности яровых и озимых пшеницы и ячменя. Установлено, что средние дозы азотных удобрений обеспечивают наибольшее положительное влияние на устойчивость данных культур к неблагоприятным погодным условиям. Самой отзывчивой на оптимизацию минерального питания культурой оказалась яровая пшеница, для которой снижение рисков было наибольшим. Для остальных культур средние и высокие дозы удобрений снижали риск недобора урожая в среднем на одну градацию.

Цель работы – продолжить исследование тенденций и пространственных закономерностей климатических рисков и потерь урожайности, отражающих агроклиматические особенности производства сельскохозяйственной продукции на территории регионов, оценить устойчивость их проявления и изучить возможности управления ими за счет оптимизации условий питания растений и элементов агротехнологий.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования выбраны периодически страдающие от засухи и засушливых явлений субъекты (области, края и республики) в Приволжском и Северо-Кавказском федеральных округах за период 1995–2020 гг. Агроклиматические расчеты проведены с помощью имитационной системы Климат–Почва–Урожай [6–8] с использованием данных наблюдений Росгидромета на метеорологических станциях (МС) и постах (МП).

Гидрометеорологические данные. В работе использованы архивы показателей среднемесячной температуры воздуха и сумм осадков с января по декабрь за период с 1995 по 2020 г. из базы данных “Климат”, сформированной в институте Глобального климата и экологии [9]. Также привлечены среднесуточные данные температуры и дефицита влажности воздуха, солнечной радиации и суточных сумм осадков в отдельных реперных точках на исследованной территории за этот же период.

Данные урожайности. Источником данных урожайности зерновых колосовых культур – яровой, озимой пшеницы и ярового и озимого ячменя с 1995 по 2020 г. на исследованной территории явились ежегодные результаты опытов 14 учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями. Выборки урожайности культур разделены на варианты: контроль (без внесения удобрений), средние и высокие дозы внесения действующего вещества азотных удобрений. В Поволжском регионе в качестве средних были приняты суммарно внесенные дозы до 60 кг д.в./га включительно, в Северо-Кавказском регионе – 80 кг д.в./га и больше. В основном в опытах применяли минеральные удобрения, в некоторых вариантах применяли органические удобрения: навоз, осадок сточных вод, гороховую солому, которые были пересчитаны для оценки поступления с ними азота. Для оценки возможности управления использованием биоклиматического потенциала за счет оптимизации минерального питания растений расчеты по обусловленным засухой климатическим рискам были проведены отдельно для каждого длительного опыта с яровой пшеницей, яровым ячменем и озимой пшеницей в Поволжском регионе (5, 11 и 9 временных рядов) и с озимой пшеницей и ячменем в Северо-Кавказском регионе (4 и 2 временных ряда).

Анализ динамики урожайности и частоты засушливых лет проводили с использованием данных Росстата средней областной урожайности изученных культур с 1995 по 2020 гг.

Имитационная система Климат–Почва–Урожай. В настоящее время общепризнанным методологическим подходом при решении задач, связанных с оценкой последствий изменений климата, в частности в агросфере, является математическое моделирование процессов влияния гидрометеорологических условий на рост, развитие и продуктивность сельскохозяйственных культур [10, 11]. Имитационная система Климат–Почва–Урожай (КПУ) представляет собой набор программных модулей для моделирования динамики и роста сельскохозяйственных культур [11].

С помощью системы КПУ с суточным шагом по времени в течение вегетационного периода выполняют расчет динамики накопления фитомассы посева, включая ее продуктивную часть (урожай), а также основных составляющих водного баланса почвы и запасов почвенной влаги. Один из основных показателей продуктивности в системе КПУ – биоклиматический потенциал (БКП), который определяют как суммарную сухую массу в ц/га, синтезируемую за теплый период года, начиная с даты перехода температуры воздуха через 5°C весной и заканчивая датой перехода через 5°C осенью.

Оценка климатических рисков при возделывании сельскохозяйственных культур. Концепция риска становится все более важной в оценках изменений климата, а также в разработке адаптационных решений и мер по смягчению последствий таких изменений. Причина совместного рассмотрения адаптации и риска состоит в том, чтобы обеспечить понимание того, как формировать решения, которые объединяют известное настоящее и неизвестное будущее, связанное с множеством неопределенностей. В связи с этим наиболее распространена оценка риска как произведение вероятности некоторого события и его последствия. В применении к климатическим изменениям обычно оперируют представлениями об опасности, воздействии и уязвимости. Все 3 компонента увязаны с изменениями климата, социальными и экономическими процессами. Например, уязвимость определяется Межгосударственной комиссией по изменению климата как предрасположенность к неблагоприятному воздействию, включая такие понятия, как чувствительность, восприимчивость и отсутствие способности к адаптации.

Для оценки климатического риска крупных неурожаев при неблагоприятных погодных условиях был использован методический подход, подробно описанный ранее [12–14]. Количественная оценка климатического риска определяется как произведение вероятностей неблагоприятных

гидрометеорологических условий и уязвимости субъекта (зоны выращивания сельскохозяйственной культуры). Таким образом, риск ожидаемых потерь урожайности вытекает из взаимодействия между неблагоприятными метеорологическими факторами и уязвимостью территории. Оценка уязвимости территории зависит от соотношения БКП и средней урожайности сельскохозяйственной культуры. Средняя величина урожайности определяется по данным Росстата либо рассчитывается с помощью имитационной системы Климат–Почва–Урожай за период 1995–2020 гг. Количественная оценка степени уязвимости территории по отношению к неблагоприятным климатическим условиям можно рассматривать как оценку степени “недоиспользования” биоклиматического потенциала при возделывании сельскохозяйственных культур. Критерием наступления сильной атмосферной засухи является гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) за период с мая по август, не превышающая величины 0.6 ($ГТК \leq 0.6$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При современном агроклиматическом районировании территория среднего и нижнего Поволжья, а также территория отдельных субъектов Северо-Кавказского ФО, которые рассмотрены в настоящей работе, отнесена к зоне недостаточного увлажнения [15]. Интенсивные и продолжительные засухи приводят здесь к значительным потерям урожая. При прогнозируемой аридизации климата, увеличение частоты засух можно будет наблюдать на изученных территориях с большой вероятностью [16].

Оценки климатических рисков крупных неурожаев, выраженные в процентах от максимальной величины риска (равной 100), а также агроклиматические показатели для их расчета: биоклиматический потенциал территории и повторяемость засушливых лет ($ГТК \leq 0.6$), представлены в табл. 1.

Зона самых высоких рисков неурожаев яровой пшеницы и ярового ячменя (от 22 до 36%) охватывает территорию степной и сухостепной зон крайнего юго-востока – Саратовскую и Самарскую обл. В то же время север Приволжского ФО – Пермский край, Кировская и Нижегородская обл. и Республика Удмуртия относятся к зоне низких рисков (от 0 до 5.3%). Средние риски недобора урожайности составляют $\approx 10\%$ в Башкортостане, где расположены самые большие посевные площади яровой пшеницы на рассматриваемой территории (36.7%).

Таблица 1. Оценки рисков крупных недоборов урожайности ячменя, яровой и озимой пшеницы за 1995–2020 гг. и относительная посевная площадь (%) на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского ФО

Область, край, республика	Число лет с засухой (ГТК ≤ 0.6), ед.	Риск недобора урожая (R)			Биоклиматический потенциал ВСП, средний в субъекте, ц/га
		яровая пшеница*	озимая пшеница	ячмень*	
Приволжский ФО					
Саратовская	13	35.8	24.7	35.9	35.2
Самарская	12	22.1	17.3	22.1	42.4
Башкирия	4	9.6	7.6	8.8	43.6
Мордовия	4	8.6	7.2	8.3	43.0
Нижегородская	2	4.7	4.0	4.5	44.4
Ульяновская	2	5.3	4.3	5.0	45.3
Пермский край	0	0	0	0	42.0
Кировская	0	0	0	0	37.2
Удмуртия	0	0	0	0	38.8
Северо-Кавказский ФО					
Ставропольский край	6	13.4	6.2	4.1	43.0
Северная Осетия	1	2.5	2.1	2.1	52.9
Кабардино-Балкария	1	2.1	1.6	1.7	50.1

*Поволжье – ячмень яровой, Северный Кавказ – ячмень озимый.

В Ставропольском крае климатические риски при возделывании яровой пшеницы достигают величины 13.4%. В то же время на территории округа в Северной Осетии и Кабардино-Балкарии рассчитанные климатические риски невелики и составляют 2.5 и 2.1% соответственно. Оценки рисков недобора урожая, наложенные на картографическую основу, показаны на рис. 1. Показано, что риски потерь урожаев зерновых, рассчитанных в 2-х выборках за 1994–2013 гг. и 1995–2020 гг., в значительной степени совпадали (рис. 2). При этом прослежено их абсолютное снижение, в целом в выборке, составившее 2%. Наибольшие абсолютные изменения претерпели оценки рисков для Ставропольского края, которые понизились на 5.0–6.4%. Для ячменя снижение риска неурожая от первого периода ко второму зафиксировано в градации от средней к низкой. В Кабардино-Балкарии за тот же период абсолютное снижение составило 3.9–4.6%, что соответствует устойчивым низким рискам возделывания зерновых культур. В большей степени риски понижались при возделывании яровой пшеницы. В то же время в Северной Осетии, где среди рассмотренных регионов Северного Кавказа наблюдается наиболее благоприятная ситуа-

ция с возделыванием зерновых культур, абсолютное снижение рисков не превышало 1.3%. Наблюдаемая тенденция может быть связана со сравнительно более благоприятными климатическими условиями последних лет для реализации урожайности.

При сравнении 2-х периодов для Поволжья величина рисков оказалась более устойчивой, максимальное абсолютное снижение наблюдали для Самарской обл. – 3.1–3.9%, в остальных случаях оставаясь в диапазоне 0.2–2.6%. В Ульяновской обл. риски возросли на 1.0–1.5% в 1995–2020 гг.

Возможность управления рисками по данным опытов Геосети. Полученные в длительных опытах Геосети средние урожаи культур в контрольных вариантах оказались близкими к средней областной урожайности за тот же период или превысили ее в Поволжском ФО в 2.3 раза и на Северном Кавказе – в 1.5 раза.

Варианты опытов со средними дозами удобрений отличались по урожайности от среднеобластных показателей в 1.2–2.8 раза в Поволжье и в 1.5–1.7 раза в Северо-Кавказском ФО. Повышение доз удобрений увеличивало диапазон варьирования урожаев зерновых культур, при неизменных минимальных урожаях величины максимальных возрас-



Рис. 1. Пространственное распределение рисков недобора урожая озимой и яровой пшеницы и ячменя в 1995–2020 гг. на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского ФО. Расчеты сделаны на основе данных среднеобластной урожайности.

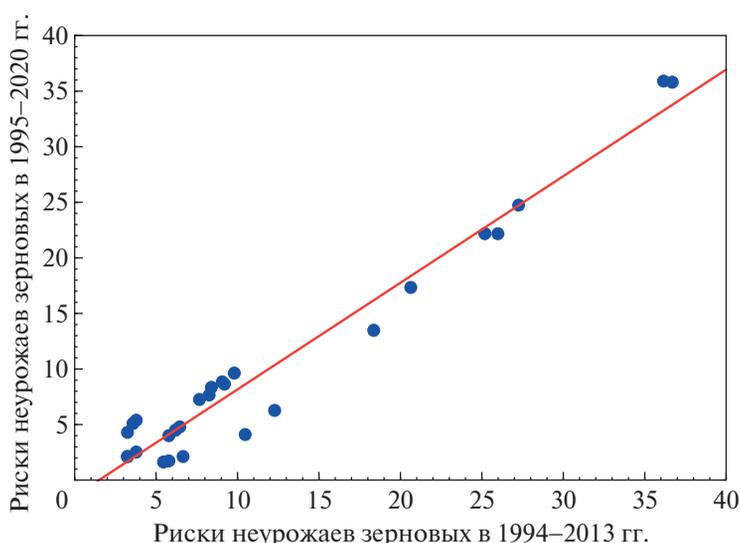


Рис. 2. Соответствие рисков неурожая зерновых культур в 1994–2013 и 1995–2020 гг., %. Расчеты сделаны на основе данных среднеобластной урожайности.

тали, наибольший рост варьирования (на 2–8 ц/га) характерен для озимых культур. При этом величины средней областной урожайности по статистическим данным и в длительных опытах в вариантах с высокой дозой азотных удобрений различались на 7–38 ц/га.

Оценка возможности управления урожаем зерновых культур в случае засухи путем оптимизации минерального питания растений проведена на основе расчетов климатических рисков для каждого длительного опыта для яровой и озимой пшеницы, ярового и озимого ячменя (рис. 3).

Озимая пшеница. Расчеты показали, что в Ульяновской, Саратовской и Нижегородской обл. и в Республике Мордовия относительная величина риска при выращивании озимой пшеницы для контрольных вариантов длительных опытов была меньше на 1–23%, чем для варианта расчета по

среднеобластным данным. Для Самарской обл. риски повысились на 4.5%. В опытах Ставропольского ГАУ и Ставропольского НИИСХ риск снизился на одну градацию. В опыте НИИСХ Юго-Востока средняя урожайность озимой пшеницы в контрольных вариантах составила 34.4 ц/га, средняя в области – 17.8 ц/га, риск недобора урожая снизился от высокого до очень низкого. Для опытов Мордовского НИИСХ, Ульяновской ГСХА, Горского ГАУ, Кабардино-Балкарского НИИСХ не произошло понижения градации изначально низкого и очень низкого риска недобора урожайности.

Внесение средних доз удобрений сопровождается относительным изменением величины риска в среднем на 28%, а высоких доз – на 68% по сравнению со среднеобластными данными. Максимальные абсолютные величины изменения риска

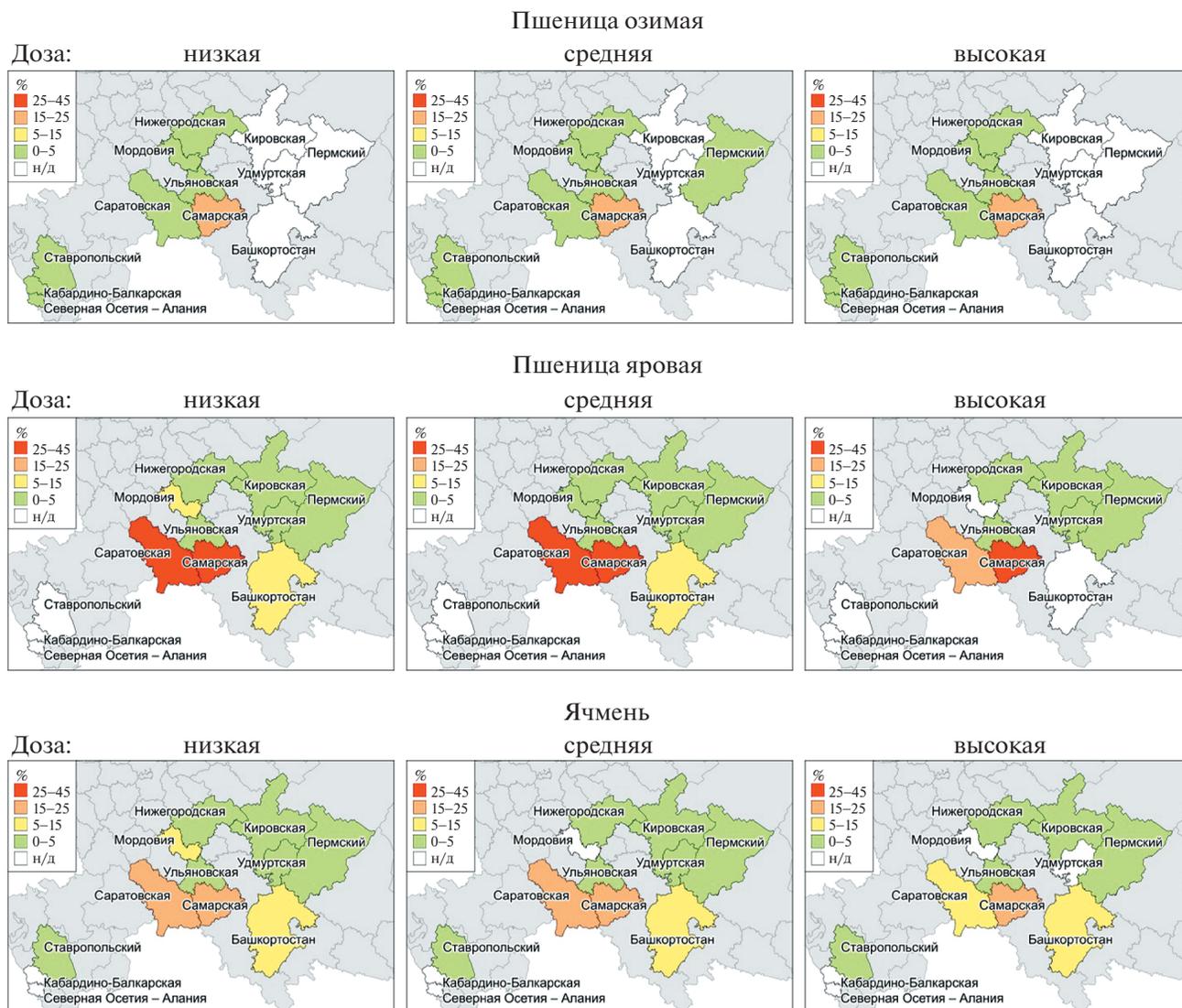


Рис. 3. Пространственное распределение рисков недобора урожая озимой и яровой пшеницы и ячменя (Поволжье – яровой, Северный Кавказ – озимый) в 1995–2020 гг. на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского ФО. Расчеты сделаны на основе данных опытов Геосети для низких, средних и высоких доз азотных удобрений.

составили при его изначально высоком и среднем уровне 5–27%, низком и очень низком – 1–2%.

Из сравнения рис. 1 и 3 можно видеть, что опыты в Саратовской обл., Мордовии, Удмуртии, Ставропольском и Пермском краях демонстрируют снижение риска на одну градацию по сравнению со среднеобластными данными, при этом снижение достигается и в контрольных вариантах опыта. Увеличение доз азотных удобрений не приводит к изменению градаций риска. На фоне наблюдаемого снижения рисков заметно его увеличение для Самарской обл.

Яровая пшеница. При возделывании яровой пшеницы в контрольных вариантах повысились риски в опыте Поволжского НИИСС на 10%,

произошло небольшое снижение рисков (на 2–5%) в опытах Мордовского НИИСС и НИИСС Юго-Востока. Необходимо отметить, что в опытах, проводимых в северных районах Приволжского ФО (Кировской обл., Пермском крае и Удмуртии) климатические риски, как и в случае анализа среднеобластных данных урожайности, отсутствовали.

Применение средних доз удобрений обеспечило сравнительно большее влияние на снижение абсолютной величины климатических рисков при возделывании яровой пшеницы по сравнению с соблюдением других элементов агротехнологии в опытах Поволжского НИИСС, Нижегородского НИИСС, Ульяновской ГСХА, Мордов-

ского и Башкирского НИИСХ. Влияние же высоких доз на дальнейшее снижение абсолютной величины рисков практически не прослеживалось. Разброс абсолютных величин изменения риска составил при его изначально высоком и среднем уровне 2–14%, а при низком и очень низком –1–5%. Из сравнения рис. 1 и 3 видно, что опыты в Удмуртии показали снижение риска на одну градацию по сравнению со среднеобластными данными в контрольных вариантах опыта. Увеличение доз азотных удобрений до средних снижало риск возделывания яровой пшеницы в Мордовии до низкого, а высокие дозы определяли снижение риска возделывания в Саратовской обл. от высокого до среднего. В то же время в Самарской обл. произошел рост рисков до высокого уровня.

Управление рисками с помощью увеличения доз азотных удобрений до высоких оказалось более эффективным приемом при возделывании яровой пшеницы по сравнению с озимой. Роль азотных удобрений может возрасти при уменьшении продолжительности вегетационного периода зерновых культур, когда достаточное азотное питание оказывается важным фактором в скорости прохождения фаз во время вегетации. В случае развития озимой культуры относительно меньшее влияние изменения доз азота в управлении рисками может быть связано со сглаживанием влияния климатических стрессов на развитие более длительно вегетирующей культуры, а также менее подверженному рискам периоду усвоения примерно половины требуемого для развития культуры азота осенью и ранней весной.

Яровой ячмень. Анализ возможности управления рисками при возделывании ячменя показал сравнительно малое их относительное снижение (0.2–13.3%) в контрольных вариантах по сравнению со среднеобластными показателями. Это не позволило достичь более низкой градации риска во всех длительных опытах, за исключением опыта НИИСХ Юго-Востока, где абсолютный риск снизился с 36 до 22% (от очень высокого к высокому). Можно отметить небольшое, на 1%, повышение риска в опыте Нижегородского НИИСХ. Вероятнее всего, поскольку ячмень не является ценной культурой в севообороте, на него могло оказывать влияние отсутствие лучшего предшественника.

Применение средних доз удобрений позволило понизить относительные риски на 1.3–19%, при этом только в одном случае – в опыте НИИСХ Юго-Востока – наблюдали переход от очень высокого до высокого риска. Влияние высоких

доз удобрений, как и в случае с яровой пшеницей, было менее выражено. Во всех 4-х опытах в северных районах Приволжского ФО климатические риски возделывания ячменя, как и в случае с яровой пшеницей, отсутствовали. Если при высоком и очень высоком уровне риска максимальные абсолютные величины его снижения составили 7–21%, при среднем, низком и очень низком они не превышали 1.9–3.3%.

Проведение сравнительных исследований на основе нескольких длительных опытов, осуществляемых в одном регионе, дает возможность выявить наиболее удачные технологические приемы и условия, обеспечивающие адаптацию систем земледелия к условиям засухи. Например, для ячменя более благоприятные условия складывались в опыте Нижегородской ГСХА, где на фоне применения средних доз удобрений было достигнуто снижение риска от низкого до очень низкого. В то же время в опыте Нижегородского НИИСХ даже высокие дозы азотных удобрений не позволили достичь снижения климатического риска <4%.

Сходные результаты получены и для озимого ячменя в 2-х опытах, проведенных в Ставропольском крае. Если в опыте Ставропольского НИИСХ достигнуто 3% снижение абсолютного риска по сравнению с наблюдениями в регионе (последовательно от среднего до низкого уровня) и отсутствие риска в вариантах с максимальной дозой удобрений, то в опыте Ставропольского ГАУ в контроле риск повышался на 1%, а при применении удобрений снижение составило только 0.2% по сравнению с региональными показателями.

При сравнении рис. 1 и 3 показано, что опыты в Саратовской, Ульяновской обл. и Ставропольском крае показали снижение риска возделывания ячменя на одну градацию по сравнению со среднеобластными показателями в контрольных вариантах. Увеличение доз азотных удобрений до высоких снижало риск возделывания ячменя в Саратовской обл. на 2 градации – от очень высокого до среднего. Для Самарской обл., Башкирии и Мордовии влияние доз азотных удобрений на управление рисками по сравнению со среднеобластными показателями не проявилось.

Результаты сопоставления рисков неурожаев зерновых, рассчитанных по результатам опытов Геосети со средними дозами удобрений за 1995–2020 гг. и за 1994–2013 гг. представлены на рис. 4. Основное отличие от результатов, полученных по данным среднеобластной урожайности (рис. 2), заключается в том, что данные полевых опытов демонстрируют более значительное снижение

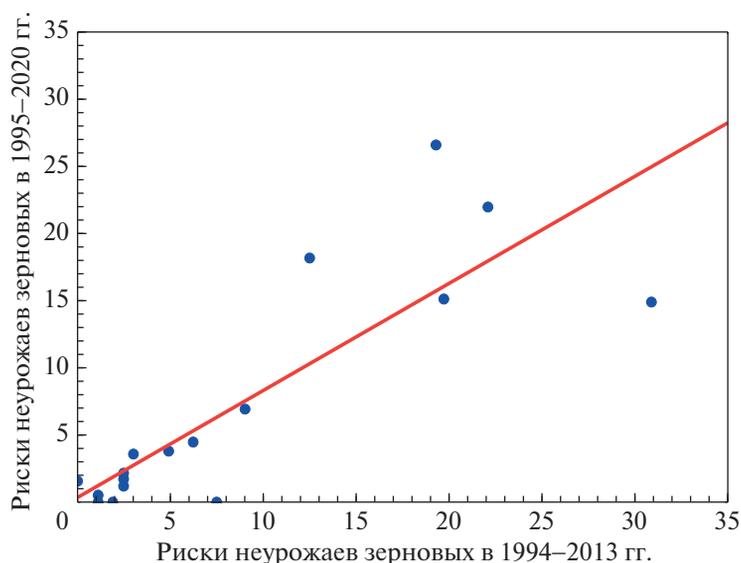


Рис. 4. Соотношение рисков неурожаев зерновых культур в 1994–2013 и 1995–2020 гг., %. Расчеты сделаны по данным опытов Геосети при средних дозах азотных удобрений.

(5–6% по сравнению с 2%) за период 1995–2020 гг. по сравнению с 1994–2013 гг. для областей средних и высоких рисков, в то время как при низких рисках тенденция к снижению не прослеживается. Также можно отметить, что рассчитанные риски не превышали 27% в 1995–2020 гг., в то время как по данным среднеобластной урожайности, максимум составил >35%.

Относительное снижение рисков составило 17% для низких доз, 19% — для средних доз и 11% — для высоких доз азота. Оно проявлялось при средних и высоких рисках неурожая зерновых культур. При низких рисках неурожая (до 5%) чаще наблюдался их рост, при этом риск оставался в пределах одной градации. При этом изменение рисков во времени оказалось различным для разных культур. Для озимой пшеницы наибольшее абсолютное снижение — 3–7% отмечено в Ставропольском крае, в остальных регионах Северного Кавказа снижение составило 0.8–1.8%, что в целом повторяет отмеченные тенденции при анализе среднеобластной урожайности. В Нижегородской и Ульяновской обл. снижение составило 0.1–1.9%. В большей степени влияние прослеживалось для средних доз азотных удобрений. Увеличение рисков возделывания озимой пшеницы в 1995–2020 гг. по сравнению с 1994–2013 гг. зафиксировало для Самарской обл. (5–6%) и Саратовской обл. (0.5–1.6%).

Сравнение 2-х периодов возделывания яровой пшеницы показывают в целом рост рисков, наиболее значительный для Самарской обл. (7–8%), Саратовской обл. (3.6%), Ульяновской обл. и

Мордовии (0.3–0.6%). В то же время условия возделывания ярового ячменя обнаружили тенденцию к снижению рисков. Риски понизились в Удмуртии на 7–16, в Самарской обл. — на 5, в Саратовской и Ульяновской обл. — на 2 и в Кировской и Нижегородской обл. — ≈к 1%.

Уровень окультуренности и риски. Наблюдаемые тенденции к изменению рисков в различных учреждениях Геосети по сравнению со среднеобластными данными сравнивали с уровнем окультуренности в вариантах длительных опытов. Табл. 2 содержит информацию о содержании подвижных форм фосфора и калия в пахотном слое вариантов опытов в качестве критериев окультуренности почвы. В большинстве случаев наблюдается рост содержания подвижных форм обоих элементов при сравнении контрольных вариантов и вариантов со средними дозами. Содержание подвижных форм фосфора и калия сравнивали со средним содержанием элементов в пахотных почвах субъектов РФ, где расположены опыты. Для сравнения использовали данные текущих агрохимических обследований. Для 11-ти учреждений, приведенных в табл. 2, в 6-ти из них зафиксирован рост содержания фосфора, соответствующий в 2-х случаях повышению обеспеченности на 2 градации, а в 4-х — на одну градацию. Внесение высоких доз удобрений обусловило дополнительное увеличение обеспеченности еще на одну градацию в 6-ти случаях. Вместе с тем тенденция к росту обеспеченности фосфором не выявлена для НИИСХ Юго-Востока, Ульяновской ГСХА,

Таблица 2. Изменение показателей почвенного плодородия в опытах Геосети на территории Приволжского и Северо-Кавказского ФО за период 1994–2013 гг.

Субъект РФ: область, республика, край	Учреждение Геосети	Подвижный фосфор			Подвижный калий		
		мг/кг почвы					
		контроль без удобрений	средняя доза	высокая доза	контроль без удобрений	средняя доза	высокая доза
Саратовская	НИИСХ Юго-Востока	12.2 ▼	20.0	17.7	345 ▼	330 ▼	276 ▼▼
Самарская	Поволжский НИИСС	186 ▲	270 ▲▲	325 ▲▲	217 ▲	270 ▲	280 ▲
Нижегородская	Нижегородская ГСХА	96	137 ▲	160 ▲▲	65	142	136
Нижегородская	Нижегородский НИИСХ	198 ▲	215 ▲	387 ▲▲	80	103	254 ▲▲
Ульяновская	Ульяновская ГСХА	119	118	Нет данных	123	121	Нет данных
Пермский	Пермский НИИСХ	185 ▲	235 ▲▲	294 ▲▲	105	198 ▲	292 ▲▲
Удмуртская	Удмуртский НИИСХ	76 ▼	190	175	122	161 ▲	149 ▲
Ставропольский	Ставропольский ГАУ	21.4	24.2	24.0	265	275	275
Ставропольский	Ставропольский НИИСХ	18	48 ▲	64 ▲▲	218	195 ▼	199 ▼
Кабардино-Балкария	Кабардино-Бал- карский НИИСХ	22.5	44.5 ▲	58.5 ▲▲	370	450 ▲	505 ▲
Северная Осетия	Горский ГАУ	81	88	103 ▲	146	151	158

Примечание. ▲/▲▲ – рост на одну или 2 градации, ▼/▼▼ – снижение на одну или 2 градации по сравнению со средним содержанием элемента питания в пахотных почвах субъекта РФ.

Ставропольского НИИСХ, Удмуртского НИИСХ и слабо была выражена для Горского ГАУ.

Содержание подвижного калия также имело тенденцию к росту с увеличением доз примененных удобрений, но выраженную в меньшей степени. Например, при средних дозах увеличение обеспеченности на 1 градацию зафиксировано в 4-х случаях без дальнейшего роста при высоких дозах. Высокие дозы применения удобрений приводили к росту обеспеченности на 2 градации по сравнению со средними показателями в субъекте РФ только в 2-х случаях. Для НИИСХ Юго-Востока и Ставропольского НИИСХ наблюдали снижение обеспеченности калием на 2 и 1 градацию соответственно, в варианте применения высоких доз по сравнению со среднеобластными показателями. В 4-х случаях – для Ставропольского ГАУ, Ульяновской и Нижегородской ГСХА

и Горского ГАУ – значительного роста обеспеченности калием не отмечено.

Полученные результаты по снижению или отсутствию роста обеспеченности фосфором и калием можно сопоставить с зафиксированным возрастанием риска при возделывании ячменя при внесении средних доз удобрений в НИИСХ Юго-Востока; увеличением риска при возделывании ячменя при максимальной дозе удобрений в опытах Ставропольского ГАУ в 1995–2020 гг. Сопоставление 2-х временных периодов показывает рост риска при возделывании озимой пшеницы на 5 и 2% в опытах Ставропольского ГАУ по сравнению со Ставропольским НИИСХ на фоне высоких доз удобрений в период 1994–2013 и 1995–2020 гг. соответственно. Для озимого ячменя за период 1995–2020 гг. различия в рисках составляют 4%. Таким образом, влияние окульту-

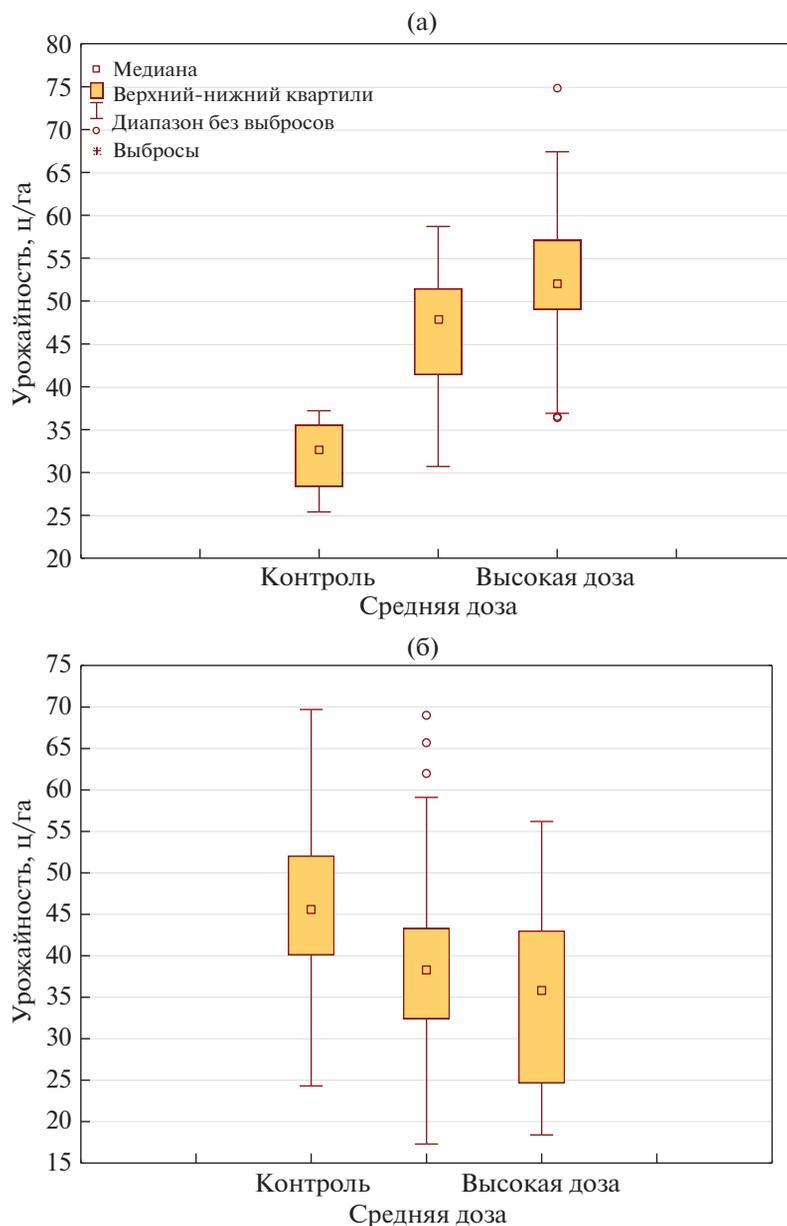


Рис. 5. Диаграмма размаха урожайности озимой пшеницы в длительном опыте Геосети Кабардино-Балкарского НИИ-ИСХ (а) и Ставропольского ГАУ (б) за период 1994–2013 гг.

ренности сопоставимо с наблюдаемым изменением урожайности при сравнении 2-х временных периодов.

Вместе с тем для Поволжского НИИСС, где наблюдали рост окультуренности почвы при увеличении доз удобрений, в 1995–2020 гг. риск производства зерновых понизился для вариантов со средними и высокими дозами удобрений на 6–7% только для ячменя, не изменился для озимой пшеницы и вырос на 6% для яровой пшеницы при сравнении со среднеобластной урожайностью. Эти данные отличаются от периода 1994–

2013 гг., когда риски удавалось снизить на 15–16% для всех зерновых культур.

Важно, чтобы в случае, когда показатели плодородия в опыте Геосети оказывались выше по сравнению с показателями, характерными для пахотных почв региона, при последовательном увеличении доз удобрений рост медианы оказывался достоверным с учетом диапазона варьирования урожайности в выборке. Такая зависимость прослежена, например, в опыте Кабардино-Балкарского НИИССХ, в котором окультуренность почвы росла с повышением доз (рис. 5а, табл. 2). Обратная за-

висимость отмечена в опыте Ставропольского ГАУ в отсутствии тренда роста обеспеченности фосфором и калием, где варьирование не снижалось с ростом доз удобрений при снижении медианы (рис. 5б, табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение климатически обусловленных рисков для озимой и яровой пшеницы и озимого и ярового ячменя на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского федеральных округов за 1994–2013 и 1995–2020 гг. показало устойчивость полученных оценок во времени. Зона высоких рисков неурожая яровой пшеницы и ярового ячменя охватывает территорию Саратовской и Самарской обл., средние риски недобора урожайности отмечены в Башкортостане и Мордовии.

Во второй период наблюдений прослежено абсолютное снижение рисков, в целом в выборке составившее 2%. Наблюдаемая тенденция может быть связана со сравнительно более благоприятными климатическими условиями последних лет для реализации урожайности. Наибольшее снижение претерпели оценки рисков для Ставропольского края, среди культур – для яровой пшеницы.

Оценка возможности управления рисками, по данным опытов Геосети, показала, что за тот же период наблюдали снижение рисков до 5–6%. Относительное снижение рисков проявлялось при средних и высоких рисках неурожая зерновых культур и составило 19% для средних доз, 17% для низких доз и 11% для высоких доз азотных удобрений. Снижение обеспечивалось главным образом улучшением условий возделывания ярового ячменя для изученной территории и озимой пшеницы на Северном Кавказе.

Показано, что снижение или отсутствие роста обеспеченности фосфором и калием можно сопоставить с зафиксированным возрастанием риска для зерновых культур, что указывает на необходимость сбалансированного внесения удобрений для управления почвенным плодородием.

В результате исследования установлено, что по мере роста урожайности зерновых культур экспериментально подтверждается также возможность управления устойчивостью систем земледелия. Оно может быть достигнуто как за счет оптимизации доз минеральных удобрений, так и расширения посевных площадей зерновых культур, риски возделывания которых снижаются в условиях современного климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. СПб., 2017. 106 с.
2. Lobell D.B., Schlenker W., Costa R.J. 2011: Climate trends and global crop production since // *Science*. 1980. V. 333 (6042). 616620.
3. Агрострахование: новые горизонты. Годовой отчет 2018. 52 с.
4. Diffenbaugh N.S., Field C.B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions // *Science*. 2013. V. 341. P. 486–492.
5. Романенков В.А., Павлова В.Н., Беличенко М.В. Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов Геосети // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 77–86.
6. Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // *Тр. ГГО*. 2012. Вып. 565. С. 132–151.
7. Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв // *Метеоролог/ и гидролог*. 1995. № 4. С. 107–114.
8. Sirotenko O.D. Crop modelling: Advances and problems // *Agron. J.* 2001. V. 93. P. 650–653.
9. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
10. Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. 034010. <https://doi.org/2019https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8be1>
11. Павлова В., Караченкова А. Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России // *Фундамент. и прикл. климатол.* 2021. № 4. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-4-68-87>
12. Павлова В.Н., Варчева С.Е. Анализ и оценка уязвимости и риска производства зерновых культур при современных изменениях климата в Калужском регионе // *Тр. регион. конкурса проектов фундамент. научн. исслед.-й. Калуж. гос. ин-т развития образования*. 2016. Вып. 21. С. 246–251.
13. Павлова В.Н., Варчева С.Е. Оценка климатических рисков при производстве зерновых культур в Приволжском федеральном округе // *Агрофизика*. 2017. № 2. С. 1–8.
14. Павлова В.Н., Варчева С.Е. Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожая зерновых культур в зерносеющих регионах России // *Метеоролог. и гидролог*. 2017. № 8 (в печати).
15. Страшная А.И., Коренкова Н.В. О засушливости в Среднем Поволжье и ее влиянии на урожайность яровой пшеницы // *Тр. ГМЦ России*. 2005. Вып. 340. С. 25–34.
16. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.

Agrotechnological Possibilities of Climate Risk Management in the Cultivation of Grain Crops

V. A. Romanenkov^{a,c,#}, V. N. Pavlova^b, and M. V. Belichenko^{c,##}

^a*M.V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie gory, 1, p. 12, Moscow 119992, Russia*

^b*All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Meteorology
prosp. Lenina 82, Kaluga region, Obninsk 249038, Russia*

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

[#]*E-mail: romanenkov@soil.msu.ru*

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

A comparison of the resistance of agricultural crops to droughts in some regions of the Volga and North Caucasus Federal Districts, obtained on the basis of statistical data and data from a Geographical network of experiments with fertilizers for the periods 1994–2014 and 1995–2020, allowed us to identify trends and spatial patterns of climatic risks of loss of winter and spring wheat and barley. It is shown that climate-related risks are stable over time and decrease in the row spring wheat > barley > winter wheat. Optimization of mineral nutrition of plants reduces the risk of shortage of grain crops in case of drought in most cases by one gradation. The greatest relative risk reduction (11–19%) for long-term field experiments with fertilizers indicates more favorable conditions for the realization of bioclimatic potential by grain crops in experiments compared to production conditions due to better agricultural technology and a higher level of soil fertility in experimental plots. The possibility of managing the sustainability of farming systems by optimizing the doses of mineral fertilizers and increasing the acreage of grain crops, the risks of cultivation of which are reduced in the conditions of modern climate, has been experimentally confirmed.

Key words: agrotechnologies, climatic risks, cultivation of grain crops.

УДК 631.58:633.2

ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННО-ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЙ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОРМОВЫХ ТРАВ

© 2022 г. Д. А. Иванов¹, Я. С. Лисицын¹, Д. И. Лотц^{2,*}, П. С. Лотц²

¹Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт имени В.В. Докучаева”
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

²Тверская государственная сельскохозяйственная академия
170904 Тверь, ул. маршала Василевского (Сахарово), 7, Россия

*E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

После доработки 14.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Изучили влияние факторов природной среды конечно-моренного холма на формирование и взаимовлияние химических составов надземной и подземной биомассы молодого клеверо-тимофеечно-го травостоя. Исследования проводили в 2019 г. на трансекте, пересекающей основные микроландшафтные позиции холма — межхолмные депрессии, склоны и вершину. Содержание химических элементов определяли рентгенфлуорисцентным методом в образцах вегетативных органов, корней и почв, взятых в точках опробования, регулярно расположенных вдоль трансекты. Там же определяли агрохимические, физические и водно-физические свойства почв. Полученные данные статистически исследовали. Приведены результаты статистического исследования химического состава трав. Выявлено, что химические составы надземных и подземных органов трав принципиально не различались. Химический состав вегетативных органов был менее вариабелен по сравнению с корнями, однако зависел от большего количества факторов. Увеличение доли злаков в фитоценозе приводило к снижению содержания в кормах бора, меди, магния и к увеличению в них концентрации марганца и цинка. Преобладание бобовых способствовало накоплению в кормах бора, кадмия, меди и магния, а также обеднению их марганцем. От содержания бора, меди, магния, марганца и стронция в подземных органах зависела концентрация бора, бария, кальция, меди, магния, марганца, молибдена, натрия в кормах. В кормах изменчивость концентрации кальция имела уникальный характер, тогда как в корнях он образовал с другими металлами единый кластер. Содержание химических элементов в травах в наибольшей степени зависело от агрохимических свойств почв. Слабее на него влиял валовой состав почв. Агрофизические свойства почв в наименьшей степени воздействовали на содержание химических элементов в биомассе растений. Изменчивость химического состава растений во многом зависела от неоднородности геологического фундамента агроландшафта и от вариабельности характера геохимических обстановок. Учет комплекса факторов, влияющих на миграционные возможности различных химических элементов в пределах сельскохозяйственно-го угодья, позволит управлять качеством кормов в режиме адаптивно-ландшафтного земледелия.

Ключевые слова: химический состав растений, кормовые травы, агроландшафт, статистический анализ.

DOI: 10.31857/S0002188122120055

ВВЕДЕНИЕ

Процессам взаимосвязи химического состава горных пород, почв, вод и растений посвящены труды основателей почвоведения и геохимии [1, 2]. В.В. Докучаев, а вслед за ним и В.И. Вернадский уделяли вопросу миграции макро- и микроэлементов в ландшафте пристальное внимание. С момента становления классического почвоведения и аналитической геохимии накоплен большой материал по вопросу трансформации химического состава горных пород в процессе почво-

образования, ландшафтогенеза и формирования биомассы. Однако на современном этапе развития ноосферы и человеческого общества проблема формирования химического состава продукции растениеводства стала более актуальной в связи с обострением экологического и продовольственного кризисов.

Процесс исследования химического состава разнообразных сред и компонентов ландшафта сопряжен с определенными трудностями, связанными с технологией взятия, обработки и хра-

нения образцов, а также с экономическими аспектами непосредственно анализа. В связи с этим количество литературы, посвященной проблемам геохимии растениеводства, не столь велико, как следовало бы ожидать из масштаба и важности проблемы.

Весьма ограниченный объем работ, написанных по этой тематике с 2017 г., может быть разделен на несколько потоков. Прежде всего следует отметить работы, посвященные описанию химического состава горных пород и почв. Например, в работе [3] отмечена необходимость контроля содержания тяжелых металлов в почвах, используемых в сельском хозяйстве. В центре внимания должны оказаться пахотные почвы. В работе [4] исследовали химический состав вулканического пепла на предмет использования его в качестве удобрения. Процессы трансформации химических свойств почв под воздействием человека изучены в работах [5, 6].

Важным вопросом является характер взаимодействия химического состава почв и культурной растительности. В статье [7] исследовано влияние почв атлантических горных лугов на характер кормов, в работе [8] изучали агрономические характеристики и химический состав глирицидии заборной, выращиваемой на разной высоте и в разные сезоны года. Проведены исследования химического состава почв, кормов и продуктов метаболизма животных в системе взаимосвязанных круговоротов [9, 10]. На современном этапе все более актуально изучение процессов загрязнения продукции растениеводства в результате промышленной деятельности [11].

Значительная часть публикаций направлена на выявление зависимости химического состава лекарственных растений от условий среды [12–15]. Некоторые авторы приходят к выводу о действии генетических барьеров при формировании вегетативных органов лекарственных трав, что приводит к относительной стабильности их химического состава [14].

Большинство работ рассматривают химический состав растений как производное от химического состава других компонентов ландшафта. Однако можно предположить, что на содержание макро- и микроэлементов в растениеводческой продукции влияют и другие параметры природной среды, такие, например, как физические свойства почв. Практический интерес представляет также взаимовлияние химических составов разных органов растений в различных ландшафтных условиях. Цель работы – изучение влияния факторов природной среды агроландшафта ко-

нечно-моренного холма на формирование и взаимовлияние химических составов надземной и подземной биомассы молодого клеверо-тимофеечного травостоя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение химического состава надземной и подземной биомасс клеверо-тимофеечного травостоя под покровом овса проводили на агроэкологическом полигоне ВНИИ мелиоративных земель площадью 50 га, расположенном в 4-х км к востоку от г. Тверь, на холме с относительной высотой 15 м, состоящим из плоской вершины, северного пологого (2–3°) и южного более крутого (3–5°) склонов и межхолмных депрессий.

Двучленные отложения, состоящие из верхнего, относительно легкого слоя, подстилаемого моренными карбонатными закаменными суглинками, являются основными почвообразующими породами стационара. В его южной части мощность песчано-супесчаного наноса иногда превышает 1.5 м, на вершине и северном склоне холма она меняется ≈ 1 м, а в межхолмной депрессии на севере морена местами выходит на поверхность. Почвы в ареалах с господством мощных поверхностных слоев, как правило, характеризуются пахотными горизонтами более легкого гранулометрического состава, чем в местах с близким к поверхности залеганием морены.

В пределах полигона основным типом элементарных почвенных структур являются подзолисто-гидроморфно-эрозионные вариации-ташеты. Пестрота почвенного покрова обусловлена литологической неоднородностью почвообразующих пород по горизонтали и вертикали. Полигон осушен регулярным гончарным дренажем со средним междренним расстоянием 30 м.

Для достижения поставленной цели провели химический анализ надземной и подземной биомассы молодого травостоя рентген-флюоресцентным методом [16]. Травостой состоял из клевера красного сорта ВИК 7, тимopheевки луговой сорта ВИК 9 и сорных видов, вышедшего в 2019 г. из-под покрова ярового овса сорта Аргамак. Травостой произрастал на агроэкологической трансекте (физико-географическом профиле) – узком севооборотном массиве, шириной 7.2 м и длиной 1300 м, пересекающим все микроландшафтные позиции конечно-моренного холма: транзитно-аккумулятивные (Т-А) геокомплексы межхолмных депрессий и нижних частей склонов, где происходит накопление элементов питания из намывных и грунтовых вод; транзитные (Т) ландшафты центральных частей склонов, в которых

преобладает латеральный (параллельный поверхности) ток влаги; элювиально-транзитные (Э-Т) местоположения верхних частей склонов, где происходит латерально-вертикальное перемещение влаги по почвенному профилю и элювиально-аккумулятивный (Э-А) ландшафт вершины, в котором наряду с вертикальным промыванием почвенного профиля происходит локальная концентрация влаги в микропонижениях.

Мониторинг химических показателей вегетативных частей растений, химических и физических свойств почвенного покрова [17, 18] осуществляли в 30-ти точках, равномерно расположенных по трансекте на расстоянии 40 м друг от друга. Химический состав корней определяли в 27 точках. Площадь учетной делянки – 20 м².

Статистический анализ массивов данных выполняли на основе пакета Statistica 12. При выполнении процедуры описательной статистики определяли общие черты и различия химического состава подземной и надземной частей агроценоза. В ходе корреляционного анализа рассчитывали влияние параметров почвенного покрова на химический состав различных частей растений. Кластерный анализ позволил выявить основные ассоциации химических элементов в корнях и вегетативных органах. Однофакторный дисперсионный анализ позволил выявить достоверные отличия в содержании элементов в растениях в разных частях агроландшафта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав надземной части растений в основном совпадал с таковой корневой массы (рис. 1а). Можно отметить только достоверное превышение содержания Li и Pb в корнях, что объясняется наличием генетического барьера, не позволяющего беспрепятственно проникать поллютантам в надземные органы растений. Достоверные различия в пробах, взятых в различных точках, обнаружены для десяти элементов: Ва, Са, Cd, Fe, Mn, Мо, Na, Pb, Ti и Zn. Железо, магний, алюминий и кальций образовали группу макроэлементов, концентрация которых в органах растений значительно больше, чем других элементов, что обусловлено их господством в земной коре и почвах [19, 20].

Данные описательной статистики, выраженные через соотношения средних величин содержаний элементов в надземной и подземной биомассе, а также их коэффициентов вариации, показали, что большая часть из 20-ти исследованных элементов сильнее концентрировалась в корнях (рис. 1б).

Сравнение соотношений средних содержаний элементов, а также их показателей вариационности обнаружило, что только 7 элементов из изученных двадцати (мышьяк, бор, барий, кальций, магний, марганец и стронций) интенсивнее накапливались в вегетативных органах растений, а 8 элементов (кальций, хром, литий, магний, молибден, натрий, свинец и стронций) сильнее варьировали в пространстве в составе надземной биомассы. Следовательно, можно сказать, что в основном в корнях происходило усиленное накопление макро- и микроэлементов, а также более сильная изменчивость их химического состава в пространстве, что объясняется, во-первых, нахождением этих органов растений непосредственно в почве, а во-вторых, наличием, по-видимому, генетических барьеров, регулирующих химический состав генеративных органов.

На химический состав надземной массы, которая является кормом для животных, большое влияние оказывал видовой состав травостоя. Корреляционный анализ показал, что на содержание в сене таких элементов как бор, кадмий, медь, магний, марганец и цинк существенное влияние оказывал характер пространственной динамики суммарной массы основных компонентов травостоя – тимофеевки, клевера и пырея. Увеличение массы тимофеевки в травостое приводило к снижению содержания в кормах бора ($r = -0.58$), меди ($r = -0.63$) и магния ($r = -0.55$) и увеличению в них содержания марганца ($r = 0.77$) и цинка ($r = 0.58$). Вариабельность массы пырея также оказывала влияние на содержание в кормах бора, меди и магния ($r = -0.65$, -0.56 и -0.61 соответственно). В отличие от злаков, пространственная вариабельность массы бобовых (клевера) оказывала влияние на содержание в сене следующих элементов: бора ($r = 0.82$), кадмия ($r = -0.54$), меди ($r = 0.78$), магния ($r = 0.67$) и марганца ($r = -0.66$). В данной работе были достоверны корреляции $\geq |0.34|$.

Наблюдали определенную зависимость качества сена и от химического состава корней. Можно сказать, что наибольшее влияние на химический состав корма оказывали 5 элементов, содержащихся в корнях, – бор, медь, магний, марганец и стронций. Бор, медь и магний в корнях в основном влияли на содержание в сене бора, бария, кальция, меди, магния, марганца, молибдена и натрия. Содержание марганца в корнях оказывало влияние еще и на содержание свинца и цинка. Стронций в корнях в некоторой степени определял содержание в кормах бора, кальция, хрома, меди, лития, магния, марганца, молибдена, натрия, стронция, ванадия и цинка. Наиболее силь-

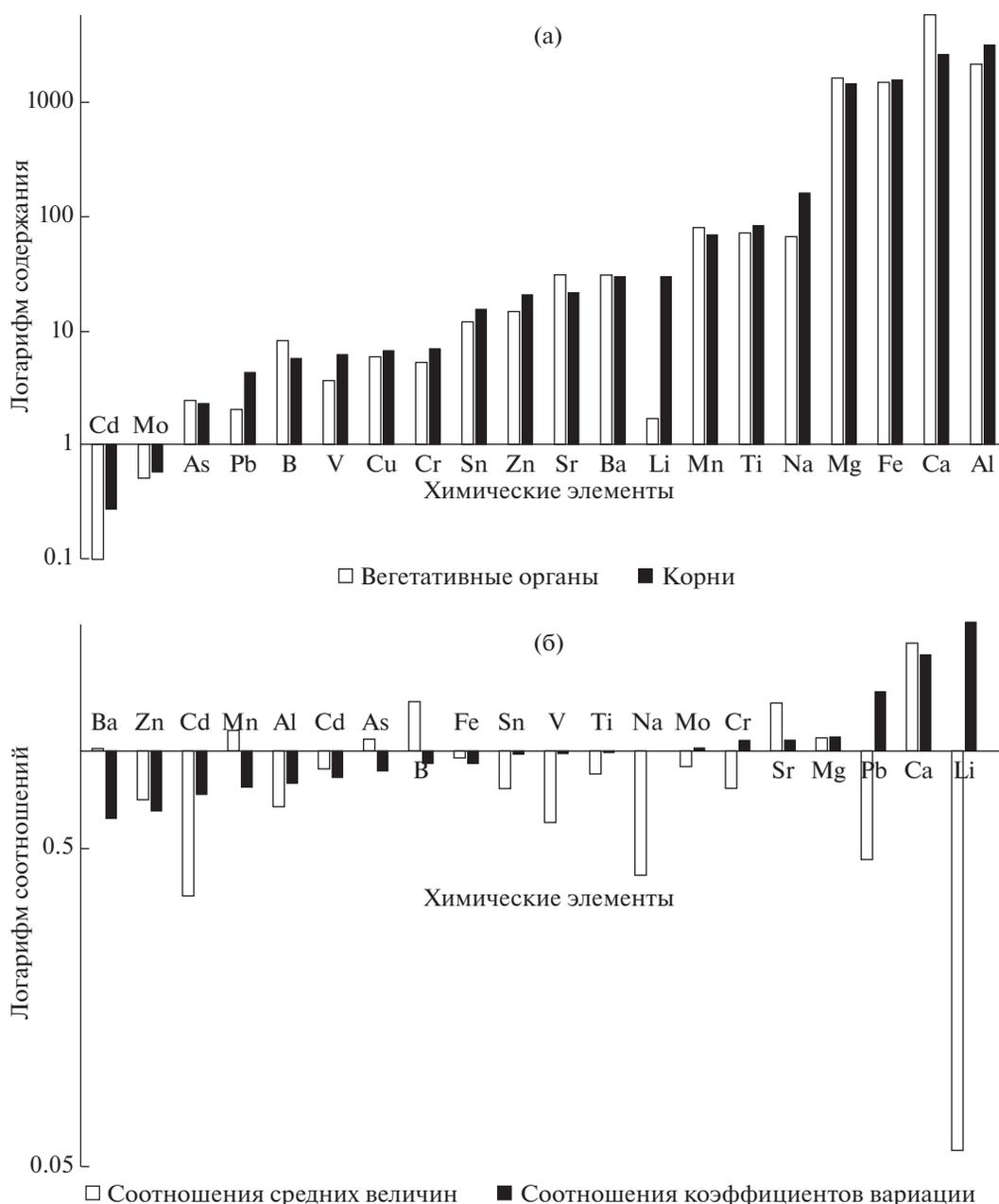


Рис. 1. Средние показатели содержания химических элементов (а) и отношения “вегетативные органы/корни” параметров описательной статистики (б).

но от химического состава корней зависело содержание в корне натрия, магния и кальция (табл. 1).

Кластерный анализ полученных данных показал, что имеются существенные различия в характере взаимосвязей элементов в различных частях растений (надземных и подземных) (рис. 2). Показано, что несмотря на определенное подобие характера ассоциации элементов в вегетативных органах и корнях, отмечены между ними и значительные различия. Во-первых, взаимосвязи меж-

ду содержаниями химических элементов в корнях значительно более тесные, чем в надземных частях растений; во-вторых, в надземной биомассе изменчивость концентрации кальция имела уникальный характер, тогда как в корнях он образовывал с другими металлами единый, хотя и рыхлый кластер. По-видимому, поглощение кальция корнями растений во многом было связано с кислотностью почв (кластер с алюминием), тогда как концентрация кальция в надземных органах регу-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между показателями химического состава подземной и надземной биомассы

		Элементы, мг/кг																			
		Вегетативные органы																			
Корни		Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Pb	Sn	Sr	Ti	V	Zn
Al	0.14	-0.01	0	0.07	-0.16	-0.03	0.13	0.01	0.2	0.11	-0.14	-0.05	-0.05	-0.05	-0.34	0.32	0.1	-0.33	0.2	0.11	-0.18
As	-0.24	-0.32	-0.32	-0.4	-0.33	-0.18	-0.37	-0.25	-0.27	-0.33	-0.29	0.27	0.46	0.46	-0.39	-0.06	-0.4	0.05	-0.26	-0.39	0.37
B	-0.05	0.04	0.82	0.69	0.84	-0.27	0.14	0.84	-0.01	0.14	0.84	-0.68	-0.62	0.68	-0.15	-0.15	0.19	-0.14	-0.16	0.23	-0.27
Ba	0.1	0.03	0.03	0.16	-0.13	0.02	0.1	0.04	0.19	0.09	-0.14	0.05	-0.11	-0.36	0.31	0.09	0.09	-0.26	0.18	0.08	-0.01
Ca	-0.25	-0.08	0.1	0.01	0.08	-0.25	-0.24	0.2	-0.19	-0.23	0.09	-0.07	0.2	-0.09	-0.04	-0.2	-0.16	-0.16	-0.21	-0.18	0.3
Cd	-0.26	-0.07	-0.46	-0.3	-0.39	0.3	-0.26	-0.4	-0.18	-0.31	-0.55	0.34	0.09	-0.46	-0.04	-0.28	0.08	0.08	-0.11	-0.34	0.34
Cr	0.02	-0.06	0.03	0.04	-0.1	-0.16	0.03	0.06	0.09	0.05	-0.05	-0.05	0.02	-0.29	0.07	0.03	-0.25	0.08	0.08	0.02	-0.19
Cu	-0.02	-0.02	0.88	0.74	0.85	-0.21	0.18	0.87	0.03	0.17	0.82	-0.66	-0.7	0.63	-0.09	0.23	-0.1	-0.12	-0.12	0.25	-0.26
Fe	0.15	0.01	0.17	0.2	0	-0.08	0.18	0.18	0.22	0.15	0.02	-0.16	-0.17	-0.22	0.3	0.16	-0.36	-0.36	0.19	0.17	-0.23
Li	0.15	0.05	0.17	0.26	0.03	0.01	0.2	0.19	0.24	0.17	0.03	-0.14	-0.24	-0.2	0.3	0.18	-0.37	-0.37	0.2	0.2	-0.23
Mg	-0.15	-0.05	0.69	0.52	0.76	-0.23	0.05	0.74	-0.11	0.02	0.74	-0.65	-0.48	0.6	-0.15	0.08	-0.27	-0.27	-0.22	0.14	-0.26
Mn	0.09	0.02	-0.64	-0.45	-0.75	0.17	-0.03	-0.66	0.12	-0.06	-0.72	0.74	0.43	-0.75	0.39	-0.07	-0.07	-0.07	0.23	-0.11	0.44
Mo	-0.18	-0.02	0.08	-0.22	-0.01	-0.4	-0.2	0.16	-0.16	-0.18	0.14	-0.06	0.35	-0.14	-0.06	-0.18	-0.11	-0.11	-0.15	-0.14	0.12
Na	0.01	-0.12	0.5	0.34	0.55	-0.19	0.16	0.47	0.01	0.11	0.46	-0.44	-0.27	0.41	-0.1	0.16	-0.03	-0.03	-0.09	0.18	-0.15
Pb	0.08	0.02	-0.23	-0.14	-0.37	-0.02	0.02	-0.22	0.15	0	-0.36	0.14	0.13	-0.53	0.23	0.23	-0.01	-0.16	0.19	-0.01	-0.04
Sn	0.07	-0.05	0.05	0.1	-0.09	-0.04	0.09	0.08	0.15	0.05	-0.07	-0.12	-0.12	-0.29	0.28	0.07	0.07	-0.37	0.13	0.08	-0.19
Sr	-0.28	-0.06	-0.44	-0.34	-0.4	-0.02	-0.44	-0.41	-0.26	-0.38	-0.49	0.57	0.53	-0.52	-0.11	-0.4	0.45	0.45	-0.19	-0.43	0.76
Ti	0.14	-0.04	-0.22	-0.13	-0.38	0.01	0.08	-0.2	0.18	0.06	-0.35	0.13	0.12	-0.5	0.38	0.03	-0.36	-0.36	0.23	0.04	-0.1
V	0.14	-0.03	-0.06	0	-0.22	-0.06	0.11	-0.04	0.18	0.08	-0.19	-0.01	0.04	-0.38	0.35	0.07	-0.36	-0.36	0.2	0.09	-0.15

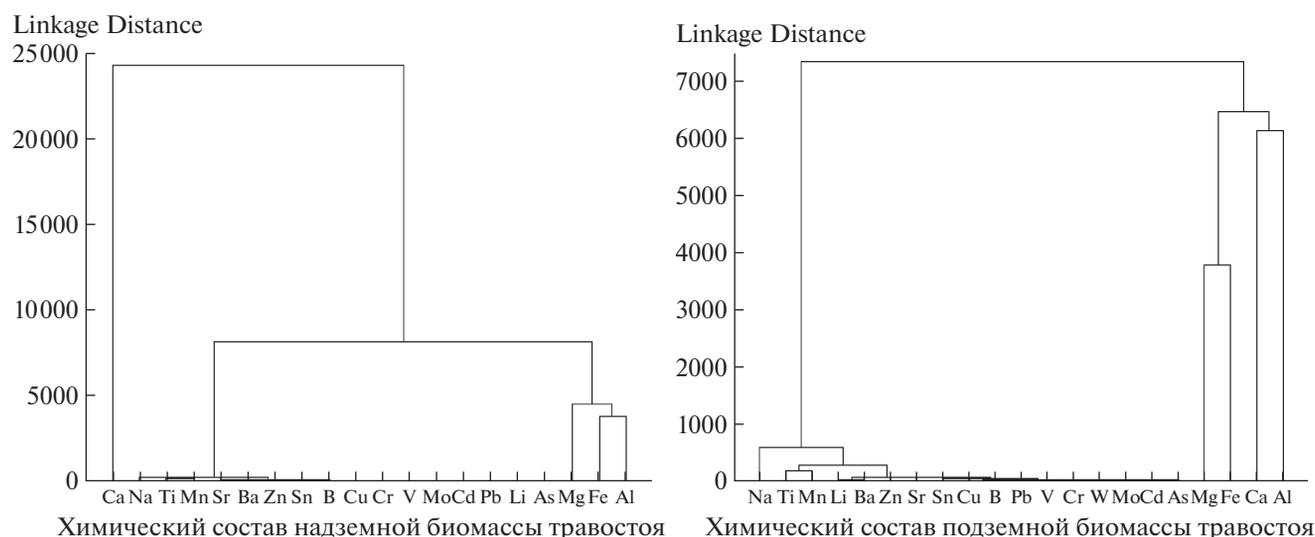


Рис. 2. Результаты кластерного анализа химического состава различных частей растений.

лировалась генетическим барьером, определяющим миграцию этого элемента в растении.

В ходе работы было рассчитано множество коэффициентов корреляции, анализ которых удобно осуществить в рамках вероятностного подхода. На основе данных табл. 2 и 3 отмечено количество случаев (частота) достоверного влияния (независимо от знака) какого-либо фактора почвенно-ландшафтной среды на содержание химических элементов в растениях и, тем самым, определялась вероятность его воздействия на их химический состав.

На рис. 3 показаны результаты данного подхода. Видно, что с максимальной вероятностью трансформация содержания макро- и микроэлементов в различных частях биомассы трав происходит при изменении агрохимических свойств почв. Содержание только 7-ми элементов (Al, As, Cd, Fe, Pb, Sr, Ti) из 20-ти, определенных в надземной части растений, достоверно не зависели от агрофона. В корнях таких элементов было больше (Al, Ba, Ca, Cd, Cr, Fe, Sn, Ti, V). Пространственная вариабельность содержания валовых форм элементов в почвах также значительным образом влияла на химический состав биомассы. Валовые формы элементов не оказывали влияния на содержание в вегетативных частях растений таких элементов как алюминий, мышьяк, кадмий, железо, стронций, в корнях — кальция, хрома, молибдена. Динамика агрофизических свойств почвы влияла на химический состав биомассы в наименьшем числе случаев, однако полностью в надземных органах от нее не зависело лишь содержание свинца, а в корнях —

кальция, кадмия, молибдена, натрия (рис. 3а). Следует отметить, что на химический состав надземной биомассы указанные группы факторов влияли, как правило, чаще, чем на содержание элементов в корнях.

Наименее часто влияло на химический состав вегетативных органов растений изменение кислотности почв и содержания в них гумуса. Наблюдалась прямо пропорциональную зависимость содержания в надземной части растений бора и кальция и обратно пропорциональную — марганца от показателя pH почв. Увеличение содержания гумуса в почве положительно влияло на содержание в сене магния и натрия, при этом в нем снижалось содержание марганца, молибдена и цинка. С наибольшей вероятностью на химический состав надземной биомассы влияло содержание в почве обменных калия и магния, а также легкоподвижного фосфора. Внесение в почву калия и фосфора способствовало накоплению в сене молибдена и цинка и препятствовало накоплению в нем бора, бария, кальция, хрома, меди, лития, магния, натрия, олова и ванадия. Используя удобрения с большим содержанием магния, можно управлять этими процессами, ингибируя влияние на растения калия и фосфора. Для корней были характерны практически те же закономерности, однако наиболее частое влияние на их химический состав оказывало содержание в почве обменного кальция (рис. 3б).

Пространственная вариабельность содержания в почве валовых форм кальция, железа, свинца и титана, зависящего во многом от минералогического состава пород — наиболее частая причина транс-

Таблица 2. Результаты корреляционного анализа зависимости химического состава вегетативных органов трав от факторов ландшафтно-почвенной среды

Фактор	Элементы, мг/кг																				
	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Pb	Sn	Sr	Ti	V	Zn	
Агрохимические свойства почв																					
pH	-0.05	-0.17	0.37	0.05	0.37	-0.3	0	0.35	-0.12	0	0.36	-0.48	-0.1	0.3	-0.24	0.02	0.09	-0.18	-0.01	-0.29	
Легкоподвижный фосфор, мг/кг	-0.16	-0.25	-0.5	-0.66	-0.46	-0.24	-0.37	-0.54	-0.29	-0.35	-0.49	0.28	0.69	-0.45	-0.21	-0.4	0.34	-0.18	-0.42	0.23	
Обменный Ca, мгэкв/кг	0.16	0.01	0.57	0.48	0.61	-0.07	0.32	0.57	0.11	0.31	0.6	-0.65	-0.55	0.71	-0.11	0.33	-0.16	0.03	0.33	-0.44	
Обменный Mg, мгэкв/кг	0.29	0.2	0.6	0.57	0.47	-0.08	0.41	0.52	0.3	0.37	0.48	-0.46	-0.58	0.33	0.18	0.4	-0.27	0.18	0.4	-0.3	
Обменный калий, мг/кг	-0.29	-0.27	-0.56	-0.5	-0.56	0.08	-0.47	-0.56	-0.29	-0.47	-0.6	0.3	0.51	-0.54	-0.23	-0.47	0.12	-0.27	-0.53	0.4	
Легкогидролизуемый азот, мг/кг	0.1	0.11	0.48	0.38	0.5	-0.07	0.23	0.52	0.09	0.32	0.65	-0.45	-0.39	0.77	-0.15	0.31	-0.12	0.01	0.32	-0.39	
Гумус, %	0.21	0.21	0.28	0.22	0.28	0.07	0.31	0.27	0.21	0.35	0.39	-0.44	-0.38	0.5	-0.07	0.34	-0.16	0.15	0.32	-0.55	
Валовой химический состав почв																					
K, %	-0.31	-0.3	0.25	0.13	0.4	-0.16	-0.26	0.29	-0.35	-0.28	0.29	-0.28	-0.03	0.33	-0.42	-0.23	0.29	-0.38	-0.24	0.17	
Zn, %	-0.03	0.09	0.32	0.2	0.36	-0.21	0.05	0.41	-0.05	0.04	0.31	-0.36	-0.35	0.26	-0.07	0.02	0.04	-0.09	0.07	-0.19	
Ca, %	0.11	0.04	0.53	0.34	0.56	-0.28	0.18	0.43	0.05	0.2	0.59	-0.54	-0.3	0.67	-0.21	0.26	0.26	-0.03	0.25	-0.34	
Fe, %	0.16	0.21	0.87	0.7	0.88	-0.15	0.4	0.84	0.19	0.39	0.9	-0.74	-0.75	0.86	-0.04	0.45	-0.04	0.03	0.48	-0.53	
Pb, %	0.05	-0.08	0.39	0.32	0.33	-0.1	0.17	0.48	0.09	0.12	0.35	-0.51	-0.48	0.21	0.15	0.15	-0.29	0.03	0.21	-0.4	
Ti, %	0.01	-0.06	0.62	0.44	0.68	-0.23	0.21	0.58	0	0.17	0.71	-0.66	-0.53	0.61	-0.04	0.22	-0.09	-0.04	0.26	-0.48	
Cu, %	-0.07	-0.13	-0.26	-0.22	-0.21	0.26	-0.07	-0.19	-0.08	-0.11	-0.23	0	-0.03	-0.13	0.19	-0.13	-0.21	0.03	-0.09	-0.13	
Агрофизические свойства почв																					
Плотность, г/см ³	0.18	0.07	-0.32	-0.02	-0.32	0.26	0.15	-0.33	0.24	0.2	-0.32	0.26	-0.1	-0.08	0.23	0.17	-0.03	0.23	0.18	-0.26	
ПВ, об. %	0.19	0.14	0.29	0.21	0.2	-0.12	0.28	0.26	0.16	0.23	0.33	-0.1	-0.14	0.21	0.1	0.26	-0.28	0.17	0.23	0.08	
НВ, об. %	0.26	0.24	0.27	0.24	0.22	0.04	0.38	0.22	0.26	0.3	0.22	0.05	-0.17	0.2	0.28	0.38	-0.14	0.26	0.34	0.16	
Гравитационная пористость, %	0.08	0.02	0.22	0.12	0.12	-0.21	0.12	0.21	0.03	0.1	0.31	-0.19	-0.08	0.15	-0.07	0.08	-0.32	0.04	0.07	-0.01	
МГ, %	0.16	0.04	0.5	0.53	0.38	-0.03	0.27	0.54	0.21	0.27	0.51	-0.44	-0.46	0.4	0.02	0.31	-0.44	0.07	0.28	-0.24	

Таблица 2. Продолжение

Фактор	Элементы мг/кг																					
	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Pb	Sn	Sr	Ti	V	Zn		
Сухое просеивание	>10 мм	0.03	-0.04	0.13	0.33	0.07	0	0.05	0.08	0.06	0.1	-0.14	-0.17	-0.01	-0.06	0.09	-0.12	0.02	0.05	-0.12		
	10-7 мм	0.15	0.09	0.36	0.62	0.33	0.22	0.43	0.22	0.31	0.37	-0.46	-0.66	0.49	0.11	0.37	-0.52	0.13	0.35	-0.41		
	7-5 мм	0.23	0.21	0.17	0.35	0.13	0.3	0.38	0.26	0.34	0.21	-0.34	-0.55	0.36	0.26	0.39	-0.63	0.26	0.37	-0.42		
	5-3 мм	0.23	0.22	0.15	0.27	0.14	0.16	0.4	0.21	0.38	0.24	-0.29	-0.54	0.4	0.26	0.39	-0.5	0.29	0.4	0.4	-0.5	
	3-2 мм	0.37	0.3	0.1	0.19	0.03	0.2	0.47	0.11	0.38	0.17	-0.2	-0.45	0.3	0.27	0.44	-0.37	0.43	0.46	0.46	-0.58	
	2-1 мм	0.35	0.37	-0.03	-0.02	-0.04	0.11	0.4	-0.04	0.33	0.4	0.02	0.03	-0.16	0.18	0.3	0.37	-0.12	0.4	0.38	0.38	-0.35
	1-0.5 мм	-0.08	-0.07	-0.12	-0.3	-0.1	0.19	-0.13	-0.2	-0.05	-0.15	-0.19	0.39	0.37	-0.25	-0.03	-0.13	0.33	-0.04	-0.15	0.38	
	0.5-0.25 мм	-0.13	0.06	-0.36	-0.43	-0.36	-0.07	-0.23	-0.41	-0.14	-0.25	-0.41	0.58	0.54	-0.42	-0.02	-0.23	0.35	-0.1	-0.27	0.63	
	<0.25 мм	0.03	0.08	-0.28	-0.5	-0.28	-0.16	-0.11	-0.34	-0.06	-0.15	-0.34	0.33	0.5	-0.42	0.12	-0.19	0.38	0.04	-0.15	0.27	
Мокрое просеивание	7-5 мм	-0.12	0.01	0	0.01	0.1	0.33	0	-0.09	-0.05	0.07	-0.23	-0.21	0.14	-0.02	0.01	-0.03	-0.02	0	-0.46		
	5-3 мм	0.11	0.12	-0.05	-0.09	-0.07	0.14	0.2	-0.07	0.16	0.01	-0.08	-0.14	-0.02	0.21	0.15	-0.23	0.21	0.17	-0.39		
	3-2 мм	0.31	0.3	-0.12	-0.02	-0.17	0.23	0.32	-0.1	0.34	-0.12	0.22	0.02	-0.07	0.28	0.29	-0.28	0.38	0.25	-0.09		
	2-1 мм	0.22	0.23	0.05	0.05	0.02	0.07	0.23	0.02	0.19	0.14	0.07	-0.05	0.02	0.01	0.19	0	0.22	0.2	-0.23		
	1-0.5 мм	0.23	0.19	0.45	0.47	0.42	0.15	0.41	0.41	0.39	0.47	-0.35	-0.56	0.58	0.23	0.48	-0.26	0.24	0.47	-0.41		
	0.5-0.25 мм	0.21	-0.04	0.16	0.39	0.04	0.22	0.19	0.17	0.21	0.05	-0.24	-0.34	0.07	0.17	0.18	-0.27	0.16	0.15	-0.03		
	<0.25 мм	-0.37	-0.26	-0.25	-0.4	-0.17	-0.38	-0.49	-0.21	-0.4	-0.45	-0.26	0.26	0.51	-0.3	-0.31	-0.48	0.39	-0.41	-0.46	0.49	

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа зависимости химического состава корней трав от факторов ландшафтно-почвенной среды

Фактор	Элементы, мг/кг																				
	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Pb	Sn	Sr	Ti	V	Zn	
Агрохимические свойства почв																					
pH	-0.15	-0.09	0.18	-0.19	-0.12	-0.29	0.04	0.23	-0.09	-0.2	0.1	-0.42	0.11	0.37	-0.19	-0.15	-0.34	-0.2	-0.16	-0.47	
Легкоподвижный фосфор, мг/кг	-0.19	0.33	-0.62	-0.24	-0.25	0.01	-0.08	-0.64	-0.29	-0.43	-0.65	0.27	0.05	-0.3	0.05	-0.25	0.27	-0.04	-0.15	0.04	
Обменный Са, мгэкв/кг	-0.13	-0.37	0.53	-0.23	-0.28	-0.24	-0.07	0.54	-0.05	-0.05	0.46	-0.67	-0.42	0.64	-0.32	-0.12	-0.57	-0.26	-0.17	-0.65	
Обменный Mg, мгэкв/кг	0.07	-0.21	0.63	0.06	-0.02	-0.32	0.05	0.62	0.16	0.2	0.54	-0.5	-0.23	0.46	-0.14	0.08	-0.33	-0.06	0.02	-0.37	
Обменный калий, мг/кг	-0.26	-0.2	0.47	-0.27	0.06	-0.35	-0.1	0.43	-0.18	-0.16	0.45	-0.62	0.13	0.18	-0.41	-0.23	-0.38	-0.35	-0.29	-0.58	
Легкогидролизуемый азот, мг/кг	0.15	0.42	-0.51	0.12	-0.04	0.31	0.01	-0.47	0.04	-0.04	-0.57	0.32	-0.03	-0.28	0.38	0.11	0.43	0.21	0.15	0.24	
Гумус, %	-0.08	-0.12	0.25	-0.19	-0.27	-0.05	0.01	0.11	-0.05	-0.07	0.21	-0.53	-0.19	0.13	-0.13	-0.11	-0.42	-0.16	-0.11	-0.61	
Валовой химический состав почв																					
K, %	-0.26	0.11	0.16	-0.25	0.12	0	-0.22	0.23	-0.21	-0.24	0.13	-0.27	-0.13	0.34	-0.34	-0.25	-0.14	-0.33	-0.26	-0.18	
Zn, %	0.07	0.13	0.29	0.09	-0.04	0.08	0.04	0.23	0.1	0.17	0.2	-0.25	-0.13	-0.04	0.02	0.11	-0.2	-0.02	0.05	-0.11	
Ca, %	-0.31	-0.1	0.33	-0.35	-0.18	-0.47	-0.26	0.3	-0.22	-0.33	0.18	-0.48	-0.12	0.41	-0.38	-0.3	-0.39	-0.43	-0.34	-0.41	
Fe, %	-0.15	-0.38	0.83	-0.16	-0.04	-0.42	-0.17	0.77	0.01	0.04	0.77	-0.72	-0.06	0.56	-0.41	-0.08	-0.59	-0.36	-0.2	-0.52	
Pb, %	0.54	-0.11	0.53	0.49	0.19	0.02	0.34	0.51	0.61	0.64	0.56	-0.29	0.04	0.26	0.36	0.6	-0.27	0.37	0.52	-0.1	
Ti, %	0.07	-0.32	0.77	-0.04	0.1	-0.25	-0.04	0.69	0.16	0.17	0.8	-0.62	-0.11	0.56	-0.21	0.1	-0.38	-0.11	0.06	-0.54	
Cu, %	0.3	0.04	0.03	0.2	0.11	0.36	0.03	-0.03	0.21	0.29	0.17	-0.09	-0.15	-0.22	0.25	0.27	0.19	0.3	0.32	-0.11	
Агрофизические свойства почв																					
Плотность, г/см ³	0.13	-0.2	-0.37	0.08	-0.38	0.18	0.16	-0.4	0.08	0.12	-0.35	0.39	-0.3	-0.06	0.2	0.14	-0.09	0.2	0.13	0.28	
ПВ, об. %	-0.16	0.14	0.2	-0.07	0.18	-0.23	-0.14	0.26	-0.08	-0.11	0.16	-0.04	0.16	0.13	-0.24	-0.17	-0.27	-0.18	-0.15	0.05	
НВ, об. %	-0.1	0.05	0.15	0.03	0.19	-0.06	-0.13	0.24	-0.01	-0.04	0.12	0.15	0.03	0.27	-0.17	-0.09	-0.12	-0.11	-0.08	0.3	
Гравитационная пористость, %	-0.17	0.17	0.18	-0.14	0.11	-0.3	-0.1	0.2	-0.11	-0.13	0.15	-0.19	0.22	-0.04	-0.23	-0.19	-0.31	-0.18	-0.17	-0.2	
МГ, %	0.28	0.02	0.54	0.27	0.24	-0.27	0.29	0.62	0.38	0.39	0.52	-0.44	0.05	0.32	0.05	0.34	-0.33	0.14	0.24	-0.29	

Таблица 3. Продолжение

Фактор	Элементы, мг/кг																				
	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Pb	Sn	Sr	Ti	V	Zn	
Сухое просеивание	>10 мм	0.54	0.11	0.1	0.51	0.22	0.24	0.41	0.21	0.57	0.52	0.09	0.07	-0.12	0.16	0.42	-0.05	0.47	0.52	0.01	
	10–7 мм	0.31	-0.27	0.54	0.32	0.21	-0.04	0.2	0.57	0.39	0.44	0.55	-0.33	-0.16	0.36	0.06	-0.33	0.19	0.28	-0.21	
	7–5 мм	0.31	-0.18	0.26	0.31	0.11	0.02	0.26	0.31	0.35	0.42	0.32	-0.18	0	0.13	0.14	-0.44	0.25	0.28	-0.14	
	5–3 мм	0.15	-0.3	0.19	0.13	-0.08	0	0.24	0.22	0.18	0.27	0.22	-0.1	-0.16	0.11	0.01	-0.5	0.15	0.13	-0.15	
	3–2 мм	0.09	-0.34	0.07	0.03	-0.25	-0.05	0.22	0.08	0.09	0.16	0.05	-0.18	-0.14	-0.03	0.03	0.08	0.09	0.06	-0.29	
	2–1 мм	-0.2	-0.3	-0.14	-0.25	-0.34	-0.05	0.04	-0.23	-0.22	-0.16	-0.16	0	-0.15	-0.07	-0.2	-0.23	-0.12	-0.2	-0.18	
	1–0.5 мм	-0.27	0.09	-0.27	-0.24	-0.07	-0.04	-0.32	-0.21	-0.31	-0.27	-0.24	0.1	0.1	-0.13	-0.12	-0.29	-0.25	-0.28	0.21	
	0.5–0.25 мм	-0.4	0.12	-0.41	-0.31	-0.19	0.11	-0.28	-0.47	-0.44	-0.49	-0.48	0.47	0.02	-0.28	-0.17	-0.4	0.44	-0.29	-0.38	0.48
	<0.25 мм	-0.31	0.1	-0.34	-0.34	-0.18	-0.1	-0.31	-0.43	-0.37	-0.43	-0.34	0.22	0.15	-0.25	-0.12	-0.34	0.32	-0.21	-0.26	0.16
	Мокрое просеивание	7–5 мм	0.06	-0.48	0.15	0	-0.06	0.09	-0.01	0.07	0.06	0.1	0.24	-0.24	-0.01	-0.04	0.01	-0.24	0	0.03	-0.25
5–3 мм		0.06	-0.41	0.14	0.01	-0.14	-0.1	0.02	0	0.02	0.07	0.15	-0.16	0.05	0.02	0.04	-0.1	0.05	0.05	-0.24	
3–2 мм		0.04	-0.17	-0.08	0.05	-0.1	0.12	0.24	-0.13	0	0.03	-0.07	-0.01	-0.08	-0.05	0.03	-0.02	0.13	0.06	-0.23	
2–1 мм		-0.3	-0.05	0.04	-0.29	-0.3	-0.2	-0.09	-0.18	-0.3	-0.24	-0.03	-0.21	-0.11	-0.03	-0.27	-0.32	-0.17	-0.29	-0.29	-0.3
1–0.5 мм		0.18	-0.3	0.42	0.14	0.19	-0.06	-0.01	0.51	0.25	0.33	0.5	-0.3	0.02	0.21	-0.03	0.21	-0.41	0.05	0.14	-0.13
0.5–0.25 мм		0.36	-0.09	0.21	0.33	0.01	0.06	0.12	0.37	0.38	0.39	0.16	-0.16	-0.29	0.23	0.16	0.36	-0.24	0.25	0.31	-0.08
<0.25 мм		-0.18	0.42	-0.32	-0.13	0.09	0.04	-0.09	-0.29	-0.2	-0.28	-0.33	0.36	0.18	-0.16	0	-0.17	0.41	-0.09	-0.14	0.36

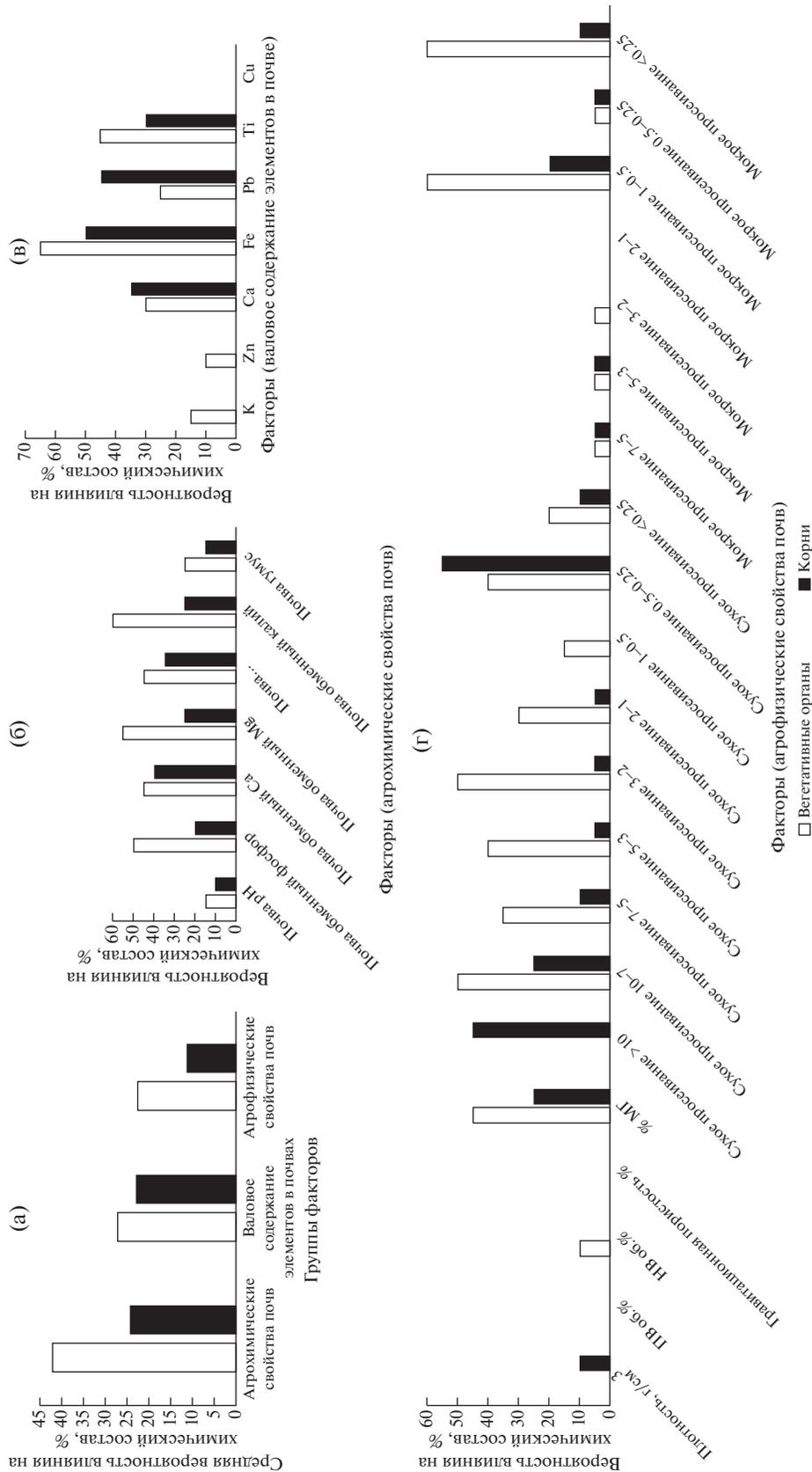


Рис. 3. Вероятности воздействия на химический состав различных частей растений групп факторов ландшафтной среды (а), агрохимических (б), химических (в) и агрофизических (г) свойств почв.

формации химического состава биомассы трав. Лидером по влиянию на химический состав как надземной, так и подземной биомассы было содержание в почве валового железа: отмечена сильная прямо пропорциональная зависимость между содержанием этого элемента и содержанием бора, бария, кальция, меди, магния и натрия в надземной биомассе и бора, меди и магния в корнях. Следует отметить, что на ожелезненных почвах во всей биомассе наблюдали пониженное содержание марганца и цинка, в кормах — еще и молибдена, а в подземной биомассе — стронция (табл. 2, 3).

Свинец и кальций чаще воздействовали на химический состав корней, а железо и титан — на качество надземных органов растений. Следует отметить, что изменчивость валового содержания в почвах калия и цинка влияла на химический состав только вегетативных органов растений, а зависимость химических свойств биомассы от валового содержания меди не обнаружена (рис. 3в).

Из всех факторов водно-воздушного режима почв максимальное влияние на химический состав растений оказывала пространственная вариабельность максимальной гигроскопической влажности почв, являющейся функцией их плотности, порозности, гранулометрического и минералогического состава. Она в 2 раза чаще воздействовала на химический состав вегетативных органов, чем корней. В местах с ее повышенными показателями наблюдали умеренное накопление в кормах бора, бария, кальция, меди, магния и натрия, однако в этом случае замедлялся процесс накопления в надземных органах растений марганца, молибдена и стронция. В корнях в этом случае заметно аккумулировались бор, медь, железо, литий, магний и терялся марганец. В 10% случаев вегетативные органы зависели от пространственного изменения показателей наименьшей полевой влагоемкости, а корни — от плотности почвы.

Гранулометрический состав почв, изученный методом сухого просеивания, заметно влиял на химический состав различных органов растений. По мере уменьшения диаметра частиц почвы от скелетных элементов до 1.0–0.5 мм их влияние на химический состав подземной биомассы уменьшался. Однако максимальное воздействие на состав корней оказывали частицы размером 0.5–0.25 мм: в местах с повышенным содержанием в почве среднего песка в корнях трав отмечена аккумуляция марганца, стронция и цинка, а также наблюдали снижение содержания алюминия, бора, меди, железа, лития, магния, олова и ванадия. Вегетативные органы трав также заметно зависели от содержания скелетных частиц в почве.

Их химический состав в половине случаев зависел от содержания в почве мелких камней (10–7 мм), увеличение которого способствовало повышению концентрации в кормах бора, бария, меди, натрия, олова, ванадия и уменьшению марганца, молибдена, стронция и цинка. Также от количества частиц диаметром от 2 до 3 мм прямо пропорционально зависело содержание алюминия, хрома, железа, лития, олова, титана, ванадия и обратно пропорционально — молибдена, стронция и цинка. Заметно слабее на него влияли частицы почвы от 3 до 5 мм и от 0.5 до 0.25 мм.

В 20% случаев на химический состав корней влияло содержание в почве водопрочных агрегатов размером от 1 до 0.5 мм, заметное влияние оказывали на него и самые мелкие водопрочные частицы. Химический состав вегетативных органов в 3 раза сильнее зависел от изменчивости этих же фракций водопрочной структуры почв (рис. 3г, табл. 2, 3). Увеличение в пахотном горизонте количества водопрочных частиц диаметром >0.5 мм приводило к заметному росту в сене молодых трав содержания бора, бария, кальция, хрома, меди, лития, магния, натрия, олова и ванадия и снижению содержания в нем марганца, молибдена и цинка. Увеличение содержания в почве наиболее мелких водопрочных агрегатов приводило к росту содержания в кормах молибдена, стронция и цинка и снижению — алюминия, бария, кадмия, хрома, железа, лития, олова, титана и ванадия.

Пространственная динамика концентрации некоторых металлов в кормах и корнях, а также соотношения их содержаний в надземной и подземной биомассе показаны на рис. 4. Все металлы принадлежали к группе, содержание которых в кормах достоверно изменялись в пределах агроландшафта. Содержание кальция и натрия возрастало в кормах по мере утяжеления гранулометрического состава почв, в то время как содержание марганца уменьшалось. Качественный перелом был обнаружен в районе расположения точек № 14–17 — в элювиально-аккумулятивном микроландшафте вершины и транзитно-аккумулятивном АМЛ северного склона — там, где песчаные и супесчаные почвы уступали место супесчаным и легкосуглинистым. Более тяжелые породы характеризовались значительными запасами Са и Na, что отразилось на качестве кормов. Эти породы также склонны к заболачиванию, что активизирует миграционные процессы Mn, который наиболее растворим в своей закисной, токсичной форме, что обуславливает изменение химического состава сена (рис. 4а).

Пространственная вариабельность содержаний этих элементов в корнях не подчинялась выше опи-

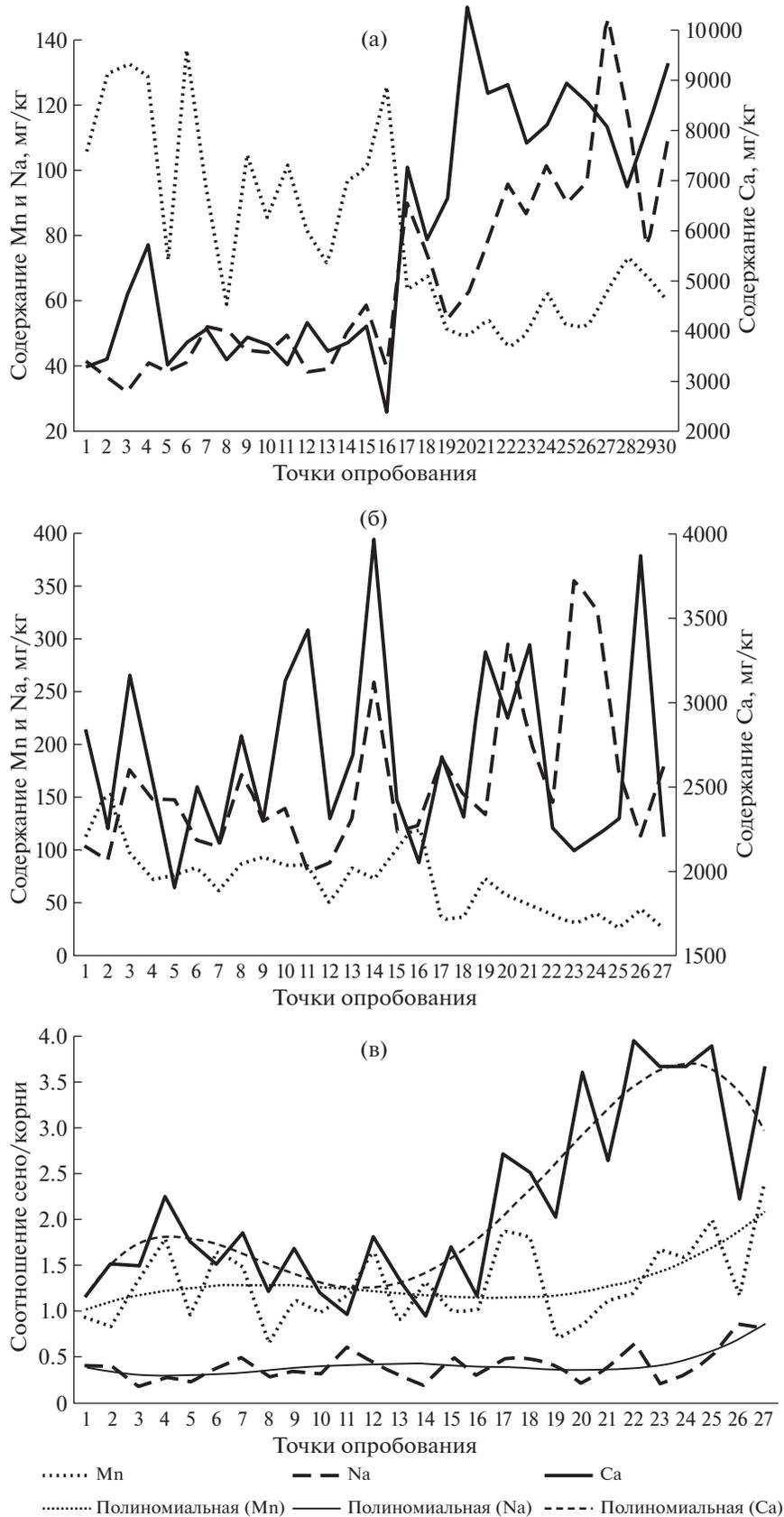


Рис. 4. Пространственная динамика содержания кальция, марганца и натрия в кормах (а), корнях (б) и их соотношений между надземной частью растений и корнями (в) в пределах конечно-моренного холма.

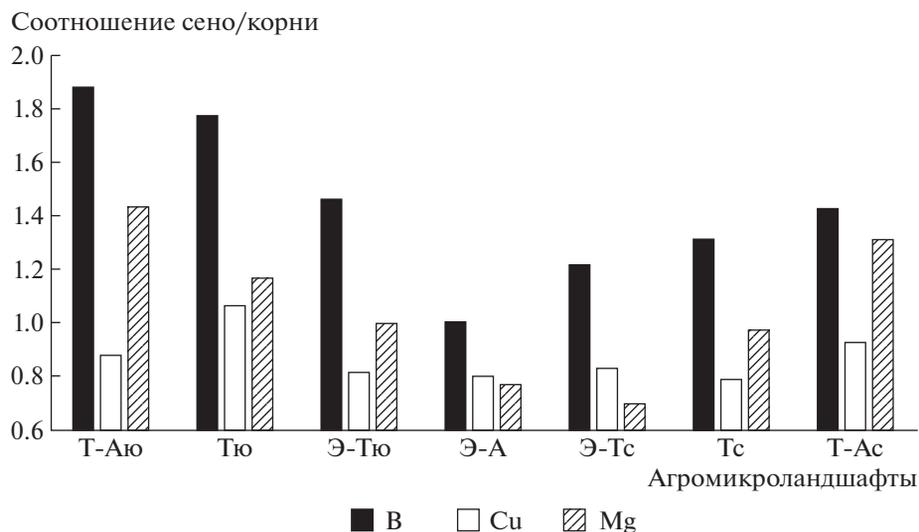


Рис. 5. Показатели соотношений химических элементов в надземных и подземных частях трав в различных частях агроландшафта моренного холма.

саным закономерностям — на фоне сильных микроколебаний тренда к изменению содержания кальция не обнаружено, тогда, как содержания марганца и натрия характеризовались их разнонаправленными динамиками (рис. 4б).

Анализ рис. 4в показал механизм поглощения различных элементов растениями. В среднем в агроландшафте максимальным коэффициентом поглощения (соотношение содержаний элемента в надземной части и в корнях) характеризовался кальций (2.16), у марганца этот коэффициент был лишь несколько >1 (1.3), содержание натрия в корнях превышало таковое в надземной части растений (0.8). Анализ пространственной динамики соотношений показал, что на северном склоне коэффициенты поглощения кальция резко возрастали — растения интенсивно накапливали этот элемент в надземных органах в тех местах, где почвы им были обогащены. Увеличение интенсивности накопления марганца и натрия наблюдали только в нижней части северного склона и в межхолмной депрессии — там, где отмечено интенсивное заболачивание почв. По-видимому, на переувлажненных почвах генетический барьер, регулирующий попадание этих элементов в надземные органы, ослабевал.

Наиболее наглядно закономерности пространственной динамики содержания химических элементов в растениях можно выразить на основе результатов дисперсионного анализа. Сравнение средних показателей в агромикрорландшафтах позволило выявить основные закономерности формирования химического состава растений в разных ландшафтных условиях (рис. 5). Показано,

что наиболее сильно от характера природных условий конкретных АМЛ зависело соотношение содержаний бора и магния. Пространственная динамика накопления этих элементов в кормах значительным образом была обусловлена напряженностью элювиальных процессов в агроландшафте. Максимальная их аккумуляция в сене отмечена в местах с отсутствием или весьма слабым развитием вертикального промывания почвенного профиля — в нижних и средних частях склонов, а на верхних гипсометрических отметках, где элювиальные процессы преобладают, содержание этих элементов в сене не превышало таковое в корнях. Содержание меди в сене было повсеместно меньше, чем в корнях за исключением средней части южного склона, что свидетельствовало о генетических механизмах регуляции ее метаболизма в вегетативных органах, которые могли изменяться в местах с экстремальными условиями (с наибольшим напряжением гидротермических стрессов).

ВЫВОДЫ

1. Химический состав надземных и подземных органов трав принципиально не различались. Вегетативные органы характеризовались меньшей пространственной вариабельностью содержания химических элементов, однако их химический состав, в отличие от корней, зависел от большего количества факторов.

2. Видовой состав травостоя существенным образом влиял на химический состав сена. Увеличение количества злаков в фитоценозе приводило к снижению содержания в кормах бора, меди,

магния и к увеличению в них содержания марганца и цинка. Преобладание бобовых способствовало накоплению в кормах бора, кадмия, меди и магния, а также обеднению их марганцем.

3. Установлено достоверное влияние химического состава корней на качество сена. От содержания бора, меди, магния, марганца и стронция в подземных органах зависело содержание бора, бария, кальция, меди, магния, марганца, молибдена, натрия и других элементов в кормах.

4. Взаимосвязи между химическими элементами в корнях были значительно более тесными, чем в надземных частях растений: в кормах изменчивость содержания кальция имела уникальный характер, тогда как в корнях он образовывал с другими металлами единый, хотя и рыхлый кластер. По-видимому, содержание кальция в надземных органах регулировалось генетическим барьером, определяющим миграцию этого элемента в растении.

5. С наибольшей вероятностью трансформация содержания макро- и микроэлементов в различных частях биомассы трав происходила при изменении агрохимических свойств почв. Немного слабее на химический состав растений влиял валовой состав почв. Агрофизические свойства почв в наименьшей степени воздействовали на содержание химических элементов в биомассе растений.

6. Пространственная изменчивость химического состава растений во многом зависела от неоднородности геологического фундамента агроландшафта и от вариабельности характера геохимических обстановок в его пределах.

7. Учет комплекса факторов, влияющих на миграционные возможности различных химических элементов в пределах сельскохозяйственного угодья, позволит управлять качеством кормов в режиме адаптивно-ландшафтного земледелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Н.Н. В.В. Докучаев как геолог и геоморфолог // Сб. работ Центр. музея почвоведения им. В.В. Докучаева. Вып. 1. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 70–99.
2. Садовничий В.А. Владимир Иванович Вернадский (1863–1945). О людях Московского университета. 3-е изд., доп. М.: Изд-во МГУ, 2019. С. 81–87. 356 с.
3. Попова Ю.А., Иваненко Н.В. Содержание тяжелых металлов в пахотных почвах Приморского края // Усп. совр. естествознания. 2022. № 5. С. 65–69.
4. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Гайнатулина В.В., Аргунеева Н.Ю., Макарова М.А., Бредун О.В., Ряховская Н.И. Вулканические пеплы Камчатки как потенциальный источник улучшения биопродуктивности почв // Агрохимия. 2020. № 4. С. 66–75.
5. Рублюк М.В., Иванов Д.А., Карасева О.В. Влияние компоста многоцелевого назначения на агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы и продуктивность культур в мелиорированных агроландшафтах // Аграр. вестн. Урала. 2021. № 6. С. 12–21.
6. Рублюк М.В., Иванов Д.А., Карасева О.В. Мониторинг агрохимических свойств почв различных угодий в пределах агроландшафта // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2020. № 1. С. 27–30.
7. Gonzalo García-Baquero, Iñaki Odriozola, Arantza Aldezabal. Floristic composition mediates change in forage nutritive quality of atlantic mountain grasslands after experimental grazing exclusion // Agronomy. 2021. V. 11. № 1. P. 25.
8. Silva S.F., Carneiro M.S. de S., Edvan R.L., Pereira E.S., Neto L.B. de M., Pinto A.P., y Camilo D. de A. Características agronómicas y composición química de *Gliricidia sepium* cultivadas bajo diferentes alturas residuales en diferentes estaciones del año. Cien. Inv. // Ciencia e Investigación AGRARIA. 2017. V. 44. № 1. P. 35–42.
9. Касамун А.Д., Иванов Д.А., Анциферова О.Н., Павлючик Е.Н., Иванова Н.Н. Элементы метаболизма цинка в организме молочных коров в зимних и летних рационах кормления // Международный сел.-хоз. журн. 2020. № 3 (375). С. 13–16.
10. Касамун А.Д., Иванов Д.А., Павлючик Е.Н., Иванова Н.Н., Васильева Е.А. Элементы метаболизма кальция в организме молочных коров в зимних и летних рационах кормления // Бюл. науки и практики. 2018. Т. 4. № 9. С. 120–126.
11. Круглая А.А. Макро- и микроэлементный состав травы зопника колючего и зопника клубненосного, произрастающих на северном Кавказе // Вестн. ВГУ. Сер. химия, биология, фармацевтика. 2006. № 2. С. 294–296.
12. Сариев А.Х., Чербакова Н.Н., Дербенев К.В., Федина Е.В. Химический состав кормовых растений, произрастающих в зоне влияния промышленных предприятий // Вестн. КрасГАУ. 2019. № 5. С. 68–74.
13. Круглов Д.С. Лекарственные средства, применяемые для профилактики и лечения железодефицитных состояний // Научн. обзор. Мед. науки. 2017. № 4. С. 26–41.
14. Круглов Д.С., Круглова М.Ю. Микроэлементный состав растений рода *Filipendula* из различных мест произрастания // Международный научн.-исслед. журн. 2021. № 4 (106). С. 156–161.
15. Zhao Z., He X., Zhang Q., Wei X., Huang L. Traditional uses, chemical constituents and biological activities of plants from the genus *Sanguisorba* L., Am. J. // Chin. Med. 2017. V. 45. P. 199–224.
16. Ширкин Л.А. Рентгенофлуоресцентный анализ объектов окружающей среды: уч. пособ. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 65 с.

17. *Радов А.С., Пустовой И.В., Корольков А.В.* Практикум по агрохимии. М.: Колос, 1978. 351 с.
18. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. Уч. пособ. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
19. *Лабушев М.М.* Бинарные массы земной коры и биосферы // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 37–43.
20. *Ферсман А.Е.* Геохимия. Т. 1. Л.: Госхимтехиздат, 1933. 328 с.

Influence of Soil and Landscape Conditions on the Chemical Composition of Fodder Grasses

D. A. Ivanov^a, Y. S. Lisitsyn^a, D. I. Lotz^{b,#}, and P. S. Lotz^b

^a*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”
Pyzhevsky per. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia*

^b*Tver State Agricultural Academy
ul. Marshala Vasilevskogo (Sakharovo) 7, Tver 170904, Russia*

[#]*E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru*

The influence of environmental factors of a finite moraine hill on the formation and mutual influence of chemical compositions of aboveground and underground biomass of young clover-thymothecal herbage was studied. The research was carried out in 2019 on a transect crossing the main micro-landscape positions of the hill – inter-hill depressions, slopes and the top. The content of chemical elements was determined by the X-ray fluorescence method in samples of vegetative organs, roots and soils taken at sampling points regularly located along the transect. Agrochemical, physical and water-physical properties of soils were also determined there. The obtained data were statistically investigated. The results of a statistical study of the chemical composition of herbs are presented. It was revealed that the chemical compositions of aboveground and underground organs of herbs did not differ fundamentally. The chemical composition of the vegetative organs was less variable compared to the roots, but it depended on more factors. An increase in the proportion of cereals in the phytocenosis led to a decrease in the content of boron, copper, magnesium in feed and to an increase in the concentration of manganese and zinc in them. The predominance of legumes contributed to the accumulation of boron, cadmium, copper and magnesium in feed, as well as their depletion by manganese. The concentration of boron, barium, calcium, copper, magnesium, manganese, molybdenum, and sodium in feed depended on the content of boron, copper, magnesium, manganese, and strontium in underground organs. In the feed, the variability of calcium concentration had a unique character, whereas in the roots it formed a single cluster with other metals. The content of chemical elements in herbs was most dependent on the agrochemical properties of soils. It was less influenced by the gross composition of soils. The agrophysical properties of soils had the least effect on the content of chemical elements in the biomass of plants. The variability of the chemical composition of plants largely depended on the heterogeneity of the geological foundation of the agricultural landscape and on the variability of the nature of geochemical conditions. Taking into account the complex of factors affecting the migration capabilities of various chemical elements within the agricultural land will allow you to manage the quality of feed in the mode of adaptive landscape farming.

Key words: chemical composition of plants, fodder grasses, agricultural landscape, statistical analysis.

УДК 632.04.01/.08:633.11“321”(571.1)

Работа посвящена светлой памяти основателя Сибирской научной школы по защите растений профессора, заслуженного деятеля науки РФ Валентины Андреевны Чулкиной

БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ФИТОПАТОГЕННЫХ ПОЧВЕННЫХ МИКРОМИЦЕТОВ НА СОРТАХ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ¹

© 2022 г. Е. Ю. Торопова^{1,2,*}, И. Г. Воробьева³, О. А. Казакова^{1,2}, Р. И. Трунов¹

¹Новосибирский государственный аграрный университет
630039 Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

³Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН
630090 Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, Россия

*E-mail: 89139148962@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.06.2022 г.

После доработки 20.06.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Биологическое разнообразие микромицетов в системе органов яровой пшеницы имеет теоретическое и практическое значение для стабильности функционирования агроценозов. Цель исследования – выявление биологического разнообразия фитопатогенных микромицетов в системе подземных и генеративных органов сортов яровой пшеницы. Задачи исследования включали также количественный анализ влияния сортов и условий года на разнообразие фитопатогена и оценке общности видового состава микромицетов в подземных и генеративных органах. Исследование проводили на 11 сортах яровой пшеницы в 2020–2022 гг. в северной лесостепи Приобья по общепринятым и авторским методикам. На подземных и генеративных органах 11 сортов яровой пшеницы разного географического происхождения в северной лесостепи Приобья доминировали *B. sorokiniana*, *F. oxysporum*, *F. roae*, причем первые 2 вида доминировали и в подземных, и в генеративных органах растений, тогда как *F. roae* на зерновках и органах являлся субдоминантом. Грибы рода *Alternaria* входили в число доминантов только на генеративных органах сортов яровой пшеницы. На подземных органах общее биологическое разнообразие составило 12 таксонов, на зерновках – 6 таксонов. Сорта и условия года статистически достоверно влияли на биологическое разнообразие микромицетов. Например, сила влияния фактора “сорт” составляла на подземных органах 14.7–35.4, фактора “год” – 12.6–33.1%. Биологическое разнообразие фитопатогенных микромицетов возрастало до 30% после гидротермических стрессов, снижавших устойчивость растений к корневым гнилям. Сила влияния фактора “сорт” на биологическое разнообразие микромицетов на зерновках сортов яровой пшеницы составила 34.4, фактора “год” – 18.2%. Общность видового состава микромицетов на зерновках была высокой – 0.83. Коэффициент общности видового состава на зерновках и подземных органах составил в среднем по годам 0.67. Виды и таксоны микромицетов были в разной степени приурочены к отдельным подземным и генеративным органам сортов яровой пшеницы, что отражало дифференцированную реализацию ими потенциальных экологических ниш под действием растений-хозяев, условий среды и межвидовых отношений микромицетов.

Ключевые слова: яровая пшеница, сорт, подземный орган, зерновка, *B. sorokiniana*, *Fusarium*, биологическое разнообразие, сила влияния, условия года.

DOI: 10.31857/S000218812210012X

ВВЕДЕНИЕ

Фитопатогенные почвенные микромицеты имеют широкое распространение и вредоносность в агроценозах яровой пшеницы в регионах Российской Федерации и Мира [1–4].

Особенно распространены на всех континентах Мира паразитарные системы пшеница–почвенные фитопатогены родов *Fusarium* Link. и *Helminthosporium*. Среди почвенных фитопатогенов грибы рода *Fusarium* и *H. sativum* Ram. занимают особое место не только потому, что являются возбудителями болезней (корневых гнилей, пятнистостей и ожогов листьев, увяданий, вилтов и др.)

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-26-00066.

более 200 видов культурных и дикорастущих растений и заселяют почвы всего Мира, но и благодаря их способности вызывать у зерновых культур чрезвычайно опасный для людей и животных микотоксикоз зерна [5–7].

Все грибы рода *Fusarium* являются почвенными микромицетами и способны длительное время, до 15 лет, сохраняться в почве в форме хламидоспор, склероциев и других покоящихся структур, формируя долговременные стационарные очаги [8, 9]. *H. sativum* сохраняется в почве в форме конидий, хламидоспор и мицелия 5–7 лет [10, 11]. Экологические ниши фитопатогенных грибов *H. sativum* и рода *Fusarium* включают не только подземные органы растений, но и генеративные органы, которые они заражают при благоприятных гидротермических условиях. Фитопатогены могут сохраняться в зерновках до 7 лет, что расширяет почвенные очаги и способствует формированию новых при высеве инфицированных семян [12, 13]. Заражение колоса может происходить по сосудам или воздушно-капельным путем [14–16]. Интенсивность заражения колоса фитопатогенными микромицетами определяется рядом абиотических и биотических факторов, среди которых существенную роль играют сортовые особенности культуры, фитосанитарное состояние почвы, конкуренция с другими фитопатогенами, погодные условия [17–19].

Колонизируя колос, грибы р. *Fusarium* могут продуцировать 148 токсических соединений, крайне опасных для здоровья человека и животных [20–22]. Многие виды *Fusarium*, поражающие зерновые культуры, продуцируют фузариотоксины дезоксиниваленол (ДОН), ниваленол (НИВ), зеараненон (ЗЕА), Т-2 токсин, а также фумонизины, индуцирующие онкологические заболевания [23]. Например, основной возбудитель фузариоза колоса озимой пшеницы токсипродуцирующий вид *F. graminearum* Schwabe. синтезирует ДОН и его ацетатные производные, а также НИВ [20, 22]. Фузариотоксины обладают нефратоксичными, иммуносупрессивными и канцерогенными свойствами [12, 20, 22]. *H. sativum* продуцирует токсины гельминтоспорол, гельминтоспорал, вик-токсин, цитокинин, опасные для здоровья людей и животных [20, 22].

В 2007–2008 гг. произошла смена доминирования фитопатогенов на подземных органах яровой и озимой пшеницы, и грибы рода *Fusarium* заняли преобладающее положение, формируя совместные патоккомплексы с ранее доминировавшим *H. sativum*. Самая высокая частота встречаемости на подземных органах яровой пшеницы и ячменя (4–5 лет из 5-ти) в 2007–2016 гг. была у *F. sporotrichioides*, *F. avenaceum*, *F. poae*, *F. equiseti*, *F. oxysporum*, *F. solani*, *F. subglutinans* [24, 25]. Установлены

факторы, способствующие доминированию грибов рода *Fusarium* в патоккомплексе корневых гнилей зерновых культур – это минимизация обработки почвы, широкое применение триазольных протравителей, снижение супрессивности почвы, усугубление и повышение частоты засушливых периодов в течение вегетации, засоренность почвы семенами нежелательных (сорных) растений [25].

На семенах яровой пшеницы постоянно присутствовал *H. sativum* и достаточно широкий набор видов рода *Fusarium*, среди которых с разной частотой встречались *F. sporotrichioides*, *F. poae*, *F. oxysporum*, *F. culmorum*, *F. solani*, *F. equiseti*, *F. avenaceum*, *F. incarnatum*, *F. heterosporum*, *F. acuminatum*, *F. solani* и др. Установлено, что вредоносность фитопатогенов усугублялась при раннем, в период колошения, инфицировании зерновок. Посевные качества инфицированных семян значительно снижались ($r = 0.511–0.615$) [21]. Распространению и развитию фитопатогенов на колосьях яровой пшеницы способствовали высокие температуры в последней декаде июля и в августе, превышающие средние многолетние показатели на 3–5°C, а также обильные осадки августа. Коэффициенты корреляции степени инфицирования зерновок пшеницы грибами рода *Fusarium* и суммы осадков за август составили $r = 0.721–0.869$, тот же показатель для *H. sativum* – $r = 0.732–0.916$ [16, 21].

Инфицирование колоса часто носит комплексный характер, может быть вызвано несколькими видами фитопатогенов, вступающих в сложные отношения как с растением-хозяином, так и друг с другом [19, 21]. Кроме того, в фитопатологии хорошо известно явление замещения экологических ниш элиминированных фитопатогенов близкими видами, часто не менее агрессивными [3, 15, 16].

Поскольку стартовой площадкой гельминтоспориоза и фузариоза колоса является почва, откуда фитопатогены могут разными путями достигать колоса, для долгосрочного контроля микозов следует создавать условия для целенаправленной индукции и поддержания супрессивности почвы, т.е. подавления развития или элиминации из почвы наиболее опасных фитопатогенов [2, 16, 24]. В последние годы выявлена специфичность естественной и индуцированной супрессивности типов почвы, а также специфические индукторы супрессивности в отношении *H. sativum* и нескольких патогенных микромицетов из рода *Fusarium* [28].

Подземные и генеративные органы сортов яровой пшеницы инфицируются комплексом фитопатогенов, однако их биологическое разнообразие и взаимоотношения изучены недостаточно [29]. Цель работы – выявление биологического разнообразия фитопатогенных микромицетов в

Таблица 1. Видовое разнообразие почвенных микромицетов на первичных корнях сортов яровой пшеницы в зависимости от фаз развития и года вегетации, балл

Сорт	2020 г.			2021 г.		
	всходы	цветение	зрелость	всходы	цветение	зрелость
Quarna	3	5	6	4	5	5
Jin Chun 2	2	4	4	6	4	4
Зауралочка	3	4	4	4	5	4
NIL Thatcher Lr13	4	6	5	4	5	4
Manu	3	4	4	5	4	5
К-65834	3	4	4	4	5	4
Сибирская 17	3	4	5	3	5	4
Remus	4	7	4	4	6	4
ЛТ-3	4	3	4	6	4	6
Calingiri	4	3	6	6	4	3
Karee	4	5	6	4	5	4
Среднее	3.4	4.5	4.7	4.5	4.7	4.3

системе подземных и генеративных органов сортов яровой пшеницы. Задачи исследования: 1 – определить видовое разнообразие почвенных патогенных микромицетов в системе подземных органов сортов яровой пшеницы в фазах вегетации, 2 – выявить биологическое разнообразие фитопатогенных микромицетов в органах зерновок сортов яровой пшеницы, 3 – оценить общность видового состава фитопатогенов в подземных и генеративных органах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2020–2022 гг. в северной лесостепи Приобья. Были высеяны сорта из коллекции яровой пшеницы ФИЦ “Институт цитологии и генетики СО РАН” (лаборатория генофонда растений), изученные в рамках бюджетного проекта ИЦиГ СО РАН № 0259-2022-0018. Изучали сорта из различных регионов: Сибирская 17 (Новосибирская обл.), ЛТ-3 (Ленинградская обл.), Зауралочка (Курганская обл.), Jin Chun 2 (Китай), Remus (Германия), Manu (Финляндия), Quarna (Швейцария), Calingiri (Австралия), NIL Thatcher Lr35 (Канада), К-65834 (Таджикистан), Karee (ЮАР). Площадь под каждым сортом – 2 м² в трехкратной повторности. Предшественник – пар. Почва – выщелоченный чернозем.

Гидротермические условия вегетаций 2020 и 2021 гг. были довольно экстремальными и способствовали развитию фузариозно-гельминтоспориозной инфекции яровой пшеницы как на подземных, так и на генеративных органах. Растения периодически испытывали гидротермические стрессы, поскольку периоды повышенного увлажнения сменялись острозасушливыми усло-

виями. В 2020 г. особенно засушливым был июнь, в 2021 – май и июль. Увлажнение в конце вегетации способствовало воздушно-капельной передаче фитопатогенов на колосья [16].

Аналитические исследования проводили общепринятыми и авторскими методами, протоколы которых приведены в [30]. Для определения фитопатогенов использовали определители [31, 32]. Общность видового состава определяли по коэффициенту Жаккара [30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В период исследования таксономический состав патогенных микромицетов на подземных генеративных органах сортов в целом был типичным для зоны и был представлен *Bipolaris sorokiniana* Sacc. Shoem. и грибами родов *Fusarium* Link. и *Alternaria* Nees. В общей сложности в годы исследования на подземных органах сортов яровой пшеницы были выявлены 12 видов грибов из рода *Fusarium*: *F. poae* (Peck.) Wollenw., комплекс видов *F. oxysporum* Schltdl., *F. solani* Koord., *F. equiseti* (Corda) Sacc., *F. sambucinum* Fuckel, *F. graminearum* Schwabe, *F. sporotrichioides* Sherb., *F. culmorum* Sacc., *F. heterosporum* Nees., *F. acuminatum* Ellis & Verh., *F. semitectum* Berk. et Rav. и *F. sambucinum* Fuckel. Годы исследования характеризовались контрастными условиями, что сказалось на видовом разнообразии микромицетов в зависимости от сорта и органа растения. Число видов фитопатогенов в первичных корнях сортов яровой пшеницы по годам представлено в табл. 1.

Данные показали, что в 2020 г. биологическое разнообразие микромицетов на первичных корнях сортов в начале вегетации было небольшим в силу благоприятных условий для проявления

Таблица 2. Видовое разнообразие почвенных микромицетов на вторичных корнях сортов яровой пшеницы в зависимости от фаз развития и года вегетации, балл

Сорт	2020 г.		2021 г.	
	цветение	зрелость	цветение	зрелость
Quarna	6	6	4	5
Jin Chun 2	7	5	4	4
Зауралочка	4	4	4	4
NIL Thatcher Lr13	7	6	5	6
Manu	7	3	4	5
K-65834	5	4	4	5
Сибирская 17	5	4	4	5
Remus	7	5	5	4
LT-3	7	4	4	5
Calingiri	4	4	6	3
Karee	5	5	5	5
Среднее	5.7	4.5	4.5	4.6

устойчивости растений. Самое высокое разнообразие – 7 видов, было отмечено на первичных корнях немецкого сорта Remus в фазе цветения растений, самое низкое – 3 вида было выявлено на первичных корнях сорта Сибирская 17 в фазе цветения и у сортов LT-3 (Ленинградская обл.) и Calingiri (Австралия) в фазе цветения. В 2020 г. можно было отметить некоторую стабилизацию и рост среднего показателя биологического разнообразия микромицетов к концу вегетации в зависимости от сорта. В 2021 г. острая засуха в период формирования всходов увеличила биологическое разнообразие микромицетов на первичных корнях сортов, оно увеличилось по сравнению с 2020 г. на 25%. С наступлением более благоприятных условий биологическое разнообразие стабилизировалось, затем сократилось к концу вегетации под влиянием гидротермического стресса конца июля–начала августа. Можно заключить, что биологическое разнообразие фитопатогенов на первичных корнях сортов яровой пшеницы определялось сортом и условиями года. Сила влияния фактора “сорт” на биологическое разнообразие микромицетов патоконцентрации корневых гнилей первичных корней составила 12.6, фактора “год” – 33.1%.

Биологическое разнообразие микромицетов на вторичных корнях сортов яровой пшеницы показано в табл. 2. Биологическое разнообразие грибов рода *Fusarium* на вторичных корнях менялось в зависимости от сорта, фаз развития и года вегетации. Максимальное среднее биологическое разнообразие было отмечено на вторичных корнях в 2020 г. в фазе цветения, 5 сортов имели на

этих органах максимальное за вегетацию (7 видов) биологическое разнообразие микромицетов. К концу вегетации биологическое разнообразие фитопатогенов на вторичных корнях в среднем сократилось на 20%, причем для финского сорта Manu это сокращение достигло 2.3 раза. У 4-х сортов биологическое разнообразие фитопатогенов осталось неизменным по сравнению с фазой цветения. Можно предполагать, что засушливые условия июня повысили восприимчивость новых формирующихся органов яровой пшеницы к возбудителям корневых гнилей, обеспечив им максимальное биологическое разнообразие. Несколько иная ситуация сложилась в 2021 г., когда период формирования вторичных корней, напротив, был благоприятным для растений, что повысило их устойчивость к фитопатогенам. В среднем для сортов биологическое разнообразие фитопатогенов на вторичных корнях в фазе цветения в 2021 г. было меньше, чем в 2020 г., на 20%, отражая, по-видимому, их толерантность к гидротермическим стрессам. Исключением из общего правила был австралийский сорт Calingiri, у которого биологическое разнообразие в 2021 г. было даже выше, чем в 2020 г. К концу вегетации 2021 г. биологическое разнообразие патогенных микромицетов на вторичных корнях яровой пшеницы несколько увеличилось или осталось на прежнем уровне у большинства сортов. Исключение снова составил сорт Calingiri, на вторичных корнях которого число видов к фазе зрелости сократилось в 2 раза. Таким образом, сорта и условия года влияли на биологическое разнообразие патогенного микоценоза корневых гнилей. Дисперсионный анализ по схеме двухфакторного опыта показал, что сила влияния сорта на биологическое разнообразие фитопатогенов составила 14.7, года вегетации – 29.1% и была достоверна на 5%-ном уровне значимости.

Биологическое разнообразие микромицетов на основаниях стеблей показано в табл. 3. Показано, что на основаниях стеблей растений яровой пшеницы среднее в зависимости от сорта биологическое разнообразие патогенных микромицетов достигло максимума в фазе цветения в 2020 г. Благоприятные условия начала вегетации 2020 г. снизили биологическое разнообразие фитопатогенов, растения проявили устойчивость к возбудителям фузариозно-гельминтоспориозных корневых гнилей. Гидротермический стресс снизил устойчивость оснований стеблей к инфицированию фитопатогенами, в результате чего их среднее в зависимости от сорта биологическое разнообразие возросло в фазе цветения на 26%. К концу вегетации 2020 г. произошла стабилизация или снижение биологического разнообразия патогенных микромицетов на основаниях стеблей большинства сортов яровой пшеницы. В 2021 г. в фазе

Таблица 3. Видовое разнообразие почвенных микромицетов на основаниях стеблей сортов яровой пшеницы в зависимости от фаз развития и года вегетации, балл

Сорт	2020 г.			2021 г.		
	всходы	цветение	зрелость	всходы	цветение	зрелость
Quarna	3	7	6	5	5	3
Jin Chun 2	3	5	4	3	5	4
Зауралочка	5	4	4	6	4	4
NIL Thatcher Lr13	5	5	4	3	5	6
Manu	3	5	3	4	3	4
К-65834	2	6	4	4	5	4
Сибирская 17	4	4	4	3	3	4
Remus	5	4	5	4	5	4
LT-3	3	6	5	4	4	5
Calingiri	4	4	4	5	3	3
Karee	4	5	6	5	4	2
Среднее	3.7	5.0	4.5	4.2	4.2	3.9

всходов, в силу засушливых, стрессорных для растений условий, биологическое разнообразие было на 12% меньше по сравнению с 2020 г. В течение вегетации биологическое разнообразие грибов на основаниях стеблей было стабильным с некоторым средним снижением к концу вегетации. Наиболее значительное снижение разнообразия к фазе зрелости (до 2-х видов) отмечено на основаниях стеблей южноафриканского сорта Karee, в 2.5 раза по сравнению с фазой всходов, что отражало индивидуальную реакцию сорта на контрастное увлажнение в ходе вегетации. Исключение составил канадский сорт NIL Thatcher Lr13, на основаниях стеблей которого биологическое разнообразие фитопатогенов было минимальным в фазе всходов, а к концу вегетации оказалась больше в 2 раза. Сила влияния сорта на биологическое разнообразие микромицетов на основаниях стеблей составила 35.4, года вегетации – 12.6% и была достоверна на 5%-ном уровне значимости.

Таким образом, биологическое разнообразие фитопатогенов на подземных органах сортов яровой пшеницы определялось как сортом, так и условиями года, повышаясь после или в период гидротермических стрессов до 30%. Самое значительное биологическое разнообразие (до 7-ми видов) выявлено на вторичных корнях сортов яровой пшеницы в фазе цветения, особенно после гидротермического стресса. Сила влияния фактора “орган” составила 82.1% и была достоверна на 1%-ном уровне значимости, а сила влияния года на разнообразие микромицетов на органах растений составила при такой схеме анализа 17% и была достоверна на 5%-ном уровне значимости.

Поскольку грибы родов *Fusarium* и *Alternaria*, а также *B. sorokiniana* паразитируют не только на подземных, но и на генеративных органах яровой пшеницы, было определено их биологическое разнообразие на зерновках в зависимости от сорта (табл. 4). Видовое разнообразие микромицетов на зерновках сортов яровой пшеницы менялось в зависимости от сорта в 2020 г. от 5 до 3 баллов и в среднем было на 17.8–21.3% меньше, чем на подземных органах этих же сортов в фазе зрелости. Коэффициент общности видового состава на зерновках и подземных органах составил 0.6, на подземных органах общее биологическое разнообразие составило 12 видов, на зерновках – 6 видов. В 2021 г. биологическое разнообразие микромицетов на зерновках сортов было несколько больше и менялось от 3 до 6 видов, и в среднем в зависимости от сорта было на 17.8% больше, чем в 2020 г. Коэффициент общности видового состава микромицетов на подземных органах и на зерновках составил в 2021 г. 0.73. Сила влияния фактора “сорт” на биологическое разнообразие микромицетов составила 34.4, фактора “год” – 18.2%.

Исследование локализации микромицетов в частях зерновок показало, что видовое разнообразие микромицетов было на 10% больше в эндосперме, чем в зародыше в среднем для сортов. В зародышах биологическое разнообразие в зависимости от сорта менялось от 1-го до 5-ти, в эндосперме – от 1-го до 6-ти. Самое низкое биологическое разнообразие – 1 таксон (*Alternaria* spp.) было выявлено для южноафриканского сорта Karee. Общность видового состава микромицетов в частях зерновок была высокой – 0.83. Однако максимальная за период учетов представленность отдельных таксонов микромицетов в зависимо-

Таблица 4. Видовое разнообразие микромицетов на зерновках сортов яровой пшеницы в зависимости от частей зерновки и года вегетации, балл

Сорт	2020 г.		2021 г.	
	зерновки	зародыш	эндосперм	
Quarna	5	5	4	5
Jin Chun 2	3	3	3	2
Зауралочка	3	5	4	5
NIL Thatcher Lr13	4	5	5	5
Manu	3	3	3	2
К-65834	5	6	4	5
Сибирская 17	3	4	4	3
Remus	4	6	5	6
LT-3	3	5	3	4
Calingiri	4	6	4	6
Karee	4	2	1	1
Среднее	3.7	4.5	3.6	4.0

сти от органа растения существенно различалась (табл. 5). Показано, что доминантами микоценоза подземных органов были *B. sorokiniana*, *F. oxysporum* и *F. poae*, причем первые 2 вида доминировали и на генеративных органах сортов, тогда как *F. poae* на зерновках и их частях был субдоминантом. *F. equiseti* был дополнительным видом как на подземных, так и на генеративных органах, редко проникая в зародыши семян. *F. graminearum* на подземных органах относился к дополнительным видам, на генеративных – к редким. *F. sambucinum*

и *F. heterosporum* встречались только на подземных органах сортов, относясь к группам дополнительных и редких видов соответственно. *F. solani* относился к дополнительным видам на вторичных корнях, к редким на первичных корнях, основаниях стеблей растений, а также на зерновках сортов яровой пшеницы. Дифференцированный анализ локализации микромицетов в частях зерновок не выявил *F. solani*, он, по-видимому, локализовался в оболочках зерен. *F. culmorum* был редким видом на всех подземных и генеративных органах сортов яровой пшеницы. *F. acuminatum* и *F. semitectum* встречались редко и только на подземных органах сортов пшеницы. Грибы рода *Alternaria* были редким таксоном на подземных органах растений сортов яровой пшеницы, но, относясь к наземно-семенным микромицетам, были широко представлены в генеративных органах растений, входя в состав доминантов вместе с *B. sorokiniana*, *F. oxysporum* и *F. poae*.

ВЫВОДЫ

1. На подземных и генеративных органах 11 сортов яровой пшеницы разного географического происхождения в северной лесостепи Приобья доминировали *B. sorokiniana*, *F. oxysporum*, *F. poae*, причем первые 2 вида доминировали и в подземных и в генеративных органах сортов, тогда как *F. poae* на зерновках и их органах являлся субдоминантом. Грибы рода *Alternaria* входили в число доминантов только на генеративных органах растений сортов яровой пшеницы.

Таблица 5. Локализация видов микромицетов на органах яровой пшеницы (2020–2021 гг.)

Вид	Первичные корни	Вторичные корни	Основания стеблей	Зерновка	Зародыш	Эндосперм
<i>Bipolaris sorokiniana</i> Sacc. Shoem.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>F. poae</i> (Peck.) Wollenw.	+++	+++	+++	++	++	++
Комплекс видов <i>F. oxysporum</i> Schldtl.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>F. equiseti</i> (Corda) Sacc.	++	++	++	++	+	++
<i>F. solani</i> Koord.	+	++	+	+	–	–
<i>F. sambucinum</i> Fuckel	+++	++	++	–	–	–
<i>F. graminearum</i> Schwabe	+++	++	+++	+	+	+
<i>F. sporotrichioides</i> Sherb.	+	+	+	++	+	++
<i>F. culmorum</i> Sacc.	+	++	+	+	+	+
<i>F. heterosporum</i> Nees.	++	+	+	–	–	–
<i>F. acuminatum</i> Ellis & Verh.	–	+	+	–	–	–
<i>F. semitectum</i> Berk. et Rav.	–	–	+	–	–	–
<i>Alternaria</i> spp.	+	+	+	+++	++	+++

Примечание. Прочерк – отсутствие поражения, + – поражение до 20%, ++ – поражение 21–50%, +++ – поражение >50%.

2. На подземных органах общее биологическое разнообразие составило 12 таксонов, на зерновках – 6 таксонов. Факторы “сорт” и “условия года вегетации” статистически достоверно влияли на биологическое разнообразие микромицетов. Сила влияния фактора “сорт” составляла на подземных органах 14.7–35.4, фактора “год” – 12.6–33.1%. Биологическое разнообразие фитопатогенных микромицетов возрастало до 30% после гидротермических стрессов, снижавших устойчивость растений к корневым гнилям. Сила влияния фактора “сорт” на биологическое разнообразие микромицетов на зерновках сортов яровой пшеницы составила 34.4, фактора “год” – 18.2%. Общность видового состава микромицетов в частях зерновок была высокой – 0.83. Коэффициент общности видового состава на зерновках и подземных органах составил в среднем в зависимости от года вегетации 0.67.

3. Виды и таксоны микромицетов были в разной степени приурочены к отдельным подземным и генеративным органам сортов яровой пшеницы, что отражало дифференцированную реализацию ими потенциальных экологических ниш под действием растений-хозяев, условий среды и межвидовых отношений микромицетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dixon G.R., Tilston E.L. Soil-borne pathogens and their interactions with the soil environment // Soil Microbiol. Sust. Crop Product. 2010. P. 197–271.
2. Sokolov M.S., Semenov A.M., Spiridonov Yu.Ya., Toropova E.Yu., Glinushkin A.P. Healthy soil – condition for sustainability and development of the argo and socio spheres (Problem-analytical review) // Biol. Bul. 2020. V. 47. № 1. P. 18–26. <https://doi.org/10.1134/S1062359020010148>
3. Левитин М.М. Микроорганизмы в условиях глобального изменения климата // Сел.-хоз. биол. 2015. Т. 50. № 5. С. 641–647.
4. Figueroa M., Hammond-Kosack K.E., Solomon P.S. A review of wheat diseases—a field perspective // Mol. Plant Pathol. 2018. V. 19. № 6. P. 1523–1536.
5. Magan N., Medina A., Aldred D. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre and postharvest // Plant Pathol. 2011. V. 60 (1). P. 150–163.
6. Bernhoft A., Torp M., Clasen P.-E., Loes A.-K., Kristoffersen A.B. Influence of agronomic and climatic factors on *Fusarium* infestation and mycotoxin contamination of cereals in Norway // Food Addit. Contam. 2012. Part A. P. 1–12.
7. Гагкаева Т.Ю., Гаврилова О.П., Левитин М.М. Биоразнообразие и ареалы основных токсинопродуцирующих грибов рода *Fusarium* // Биосфера. 2014. Т. 6. № 1. С. 36–45.
8. Vorob'eva I., Toropova E. Fungi ecological niches of the genus *Fusarium* Link. // Inter. Conf. “Plant Diversity: Status, Trends, Conservation Concept” 2020 // BIO Web of Conferences 24. 00095 (2020). <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202400095>.
9. Doohan F.M., Brennan J., Cooke B.M. Influence of climatic factors on *Fusarium* species pathogenic to cereals // Europ. J. Plant Pathol. 2003. V. 109. № 7. P. 755–768.
10. Toropova E.Yu., Glinushkin A.P., Insebaeva M.K., Stetsov G.Ya. The conidia *Bipolaris sorokiniana* Sacc. Shoem. distribution in the soil of Altai and Kazakhstan arid regions // J. Phys.: Conf. Ser. 1942 (2021) 012078. 5p. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012078>
11. Киселева М.И., Жемчужина Н.С., Дубовой В.П., Лапина В.В. Видовой состав возбудителей корневой гнили на яровых зерновых в республике Мордовия // Сел.-хоз. биол. 2016. Т. 51. № 1. С. 119–127.
12. Гагкаева Т.Ю., Гаврилова О.П., Левитин М.М. Фузариоз зерновых культур // Прилож. к журн. “Защита и карантин растений”. 2011. № 5. С. 70–112.
13. Burlakoti R.R., Shrestha S.M., Sharma R.C. Effect of natural seed-borne inoculum of *Bipolaris sorokiniana* on the seedling emergence and vigour, and early establishment of foliar blight in spring wheat // Arch. Phytopathol. Plant Protect. 2014. V. 47. № 7. P. 812–820.
14. Билай В.И. Фузариоз. Киев: Наукова думка, 1977. 443 с.
15. Vorobyeva I.G., Toropova E.Yu. On the Issue of ecological niches of plant pathogens in Western Siberia // Contempor. Probl. Ecol. 2019. V. 12. № 6. P. 667–674. Pleiades Publishing, Ltd., 2019. <https://doi.org/10.1134/S1995425519060155>
16. Торопова Е.Ю., Стецов Г.Я., Чулкина В.А. Эпифитотология / Под ред. Соколова М.С., Чулкиной В.А. Новосибирск, 2011. 711 с.
17. Аблова И.Б., Беспалова Л.А., Колесников Ф.А., Набоков Г.Д., Ковтуненко В.Я., Филобок В.А., Давоян Р.О., Худокормова Ж.Н., Мохова Л.М., Левченко Ю.Г., Тархов А.С. Принципы и методы селекции пшеницы на устойчивость к болезням в КНИИСХ им. П.П. Лукьяненко // Зерн. хоз-во России. 2016. № 5. С. 32–36.
18. Манукян И.Р., Басиева М.А. Селекция озимой пшеницы на устойчивость к фузариозу колоса для условий предгорной зоны Северного Кавказа // Вестн. АПК Ставрополя. 2016. № 3 (23). С. 194–196.
19. Казакова О.А., Торопова Е.Ю., Воробьева И.Г. Взаимоотношения фитопатогенов семян ячменя в Западной Сибири // АПК России. 2016. Т. 23. № 5. С. 931–934.
20. Монастырский О.А. Микотоксины – глобальная проблема безопасности продуктов питания и кормов // Агрохимия. 2016. № 6. С. 67–71.
21. Торопова Е.Ю., Воробьева И.Г., Мустафина М.А., Селюк М.П. Мониторинг грибов рода *Fusarium* Link. и их микотоксинов на зерне пшеницы в Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 5. С. 76–82.

22. Hussein H.S., Brasel J.M. Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals // *Toxicology*. 2001. V. 167 (2). P. 101–134.
23. Мазыгула Е.Д., Харламова М.Д. Оценка токсичности и экологической опасности сырья и кормов, содержащих микотоксины // *Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2015. № 1. С. 50–56.
24. Торопова Е.Ю., Казакова О.А., Воробьева И.Г., Селюк М.П. Фузариозные корневые гнили зерновых культур в Западной Сибири и Зауралье // *Защита и карантин раст.* 2013. № 9. С. 23–26.
25. Торопова Е.Ю., Селюк М.П., Казакова О.А. Факторы доминирования грибов рода *Fusarium* в патоккомплексе корневых гнилей зерновых культур // *Агрохимия*. 2018. № 5. С. 73–82.
26. Duveiller E.M., Sharma R.C. Genetic improvement and crop management strategies to minimize yield losses in warm non-traditional wheat growing areas due to spot blotch pathogen *Cochliobolus sativus* // *J. Phytopathol.* 2009. V. 157. № 9. P. 521–534.
27. Eisa M., Chand R., Joshi A.K. Biochemical and histochemical traits: a promising way to screen resistance against spot blotch (*Bipolaris sorokiniana*) of wheat // *Europ. J. Plant Pathol.* 2013. V. 137. № 4. P. 805–820.
28. Торопова Е.Ю., Казакова О.А., Селюк М.П., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Факторы индукции супрессивности почвы // *Агрохимия*. 2017. № 4. С. 58–71.
29. Toropova E.Yu., Vorob'ova I.G., Kirichenko A.A., Trunov R.I. Parasitic activity of plant pathogens at the underground organs of spring wheat in the West Siberia // *J. Phys.: Conf. Ser.* 1942 0120791942 (2021) 012079 IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012079>
30. Чулкина В.А., Торопова Е.Ю., Стецов Г.Я., Кириченко А.А., Мармулева Е.Ю., Гришин В.М., Казакова О.А., Селюк М.П. Фитосанитарная диагностика агроэкосистем / Под ред. Е.Ю. Тороповой. Барнаул, 2017. 210 с.
31. Gerlach W., Nirenberg H. The genus *Fusarium* – a pictorial atlas // *Mitt. Biol. Bundesanst. Land-Forstw., Berlin – Dahlem*, 1982. 406 p.
32. Шупилова Н.П., Иващенко В.Г. Систематика и диагностика грибов рода *Fusarium* на зерновых культурах. СПб., 2008. 84 с.

Biological Diversity of Phytopathogenic Soil Micromycetes on Spring Wheat Varieties in West Siberia

E. Yu. Toropova^{a,b,#}, I. G. Vorob'ova^c, O. A. Kazakova^{a,b}, and R. I. Trunov^a

^a*Novosibirsk State Agrarian University*

ul. Dobrolyubova 160, Novosibirsk 630039, Russia

^b*Russian Federal Research Institute of Phytopathology*

ul. Institute, vlad. 5, Moscow region, Odintsovo district, p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia

^c*Central Siberian Botanical Garden SB RAS*

ul. Zolotodolinskaya 101, Novosibirsk 630090, Russia

[#]*E-mail: 89139148962@yandex.ru*

The biological diversity of micromycetes in the organ system of spring wheat is of theoretical and practical importance for the stability of agrocenoses functioning. The purpose of the research was to identify the biological diversity of phytopathogenic micromycetes in the system of underground and generative organs of spring wheat varieties. The tasks of the research also included a quantitative analysis of the varieties and year conditions influence on the diversity of the phytopathogen and an assessment of the commonality of the micromycetes species composition in underground and generative organs. The studies were carried out on 11 varieties of spring wheat in 2020–2022 in the northern forest-steppe of the Ob region according to generally accepted and author's methods. *B. sorokiniana*, *F. oxysporum*, *F. poae* dominated on the underground and generative organs of spring wheat varieties of different geographical origin in the northern forest-steppe of the Ob region, with the first two species dominating both in the underground and generative organs of varieties, while *F. poae* on grain and their organs was a subdominant. Fungi of the genus *Alternaria* were among the dominants only on the generative organs of spring wheat varieties. On underground organs, the total biological diversity was 12 taxa, and on caryopses, 6 taxa. Varieties and conditions of the year had a statistically significant effect on the biological diversity of micromycetes. Thus, the strength of the influence of the factor “variety” on underground organs was 14.7–35.4%, the factor “year” – 12.6–33.1%. The biological diversity of phytopathogenic micromycetes increased up to 30% after hydrothermal stresses, which reduced the resistance of plants to root rot. The influence of the “variety” factor on the biological diversity of micromycetes on spring wheat varieties seeds was 34.4, the “year” factor was 18.2%. The commonality of the micromycetes species composition in the seed organs was high – 0.83. The commonality coefficient of the species composition on seeds and underground organs averaged 0.67 over the years. Species and taxa of micromycetes were, to varying degrees, associated with individual underground and generative organs of spring wheat varieties, which reflected their differentiated realization of potential ecological niches under the influence of host plants, environmental conditions, and interspecific relationships of micromycetes.

Key words: spring wheat, variety, underground organ, seed, *B. sorokiniana*, *Fusarium*, biodiversity, power of influence, year conditions.

УДК 631.83:631.46

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ФОНДА ЙОДА В АГРОЦЕНОЗАХ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2022 г. Г. А. Конарбаева^{1,*}, В. С. Бойко², В. Н. Якименко¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

²Омский аграрный научный центр
644012 Омск, просп. Королева, 26, Россия

*E-mail: konarbaeva@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

После доработки 22.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В многолетних стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири показаны изменения почвенного фонда йода в условиях агроценозов. Определено содержание в почвах валового и водорастворимого йода, выявлена связь этих показателей с почвенным содержанием гумуса и гранулометрическим составом. В целинном состоянии более тяжелая и гумусированная лугово-черноземная почва содержала валового йода в 3–4 раза больше, чем целинная серая лесная почва; при этом уровень водорастворимого йода в обеих почвах практически не отличался и находился на оптимальном уровне – 0.05–0.06 мг/кг. При длительном интенсивном выращивании картофеля, овощных и зерновых культур почвенное содержание доступного растениям йода существенно снизилось, перейдя в класс низкой обеспеченности.

Ключевые слова: почва, агроценоз, удобрения, урожайность, валовой и водорастворимый йод.

DOI: 10.31857/S0002188122120080

ВВЕДЕНИЕ

Йод является одним из основных элементов в процессе формирования биогеохимического круговорота в системе почва–природные воды–растения–животные–человек. В связи с этим изучение его поведения в объектах природной среды, прежде всего в почвах и растениях, становится все более значимым [1–3].

Важная биологическая роль йода, которую он играет в живых организмах, связана с регулированием этим галогеном скорости обмена веществ в них. Йод входит в состав гормонов щитовидной железы – тироксина и трийодтиронина. Его физиологическая функция в этих гормонах незаменима. Атомы йода в гормонах щитовидной железы участвуют в процессе переноса электронов благодаря переходам их из состояния I^+ в I^- и обратно [4].

Дефицит йода, так же, как и его избыток, приводит к тяжелым заболеваниям, таким как гипотериоз, эндемический зоб, болезнь Хашимото и другим [2, 5, 6].

Получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур невозможно без использования

минеральных удобрений, на долю которых приходится не менее 1/3 прибавки урожая. Более того, применение минеральных удобрений – один из главных факторов эффективного функционирования агроценозов, обеспечивающий активный баланс химических элементов в системе почва–растение. Поэтому необходимо изучение содержания йода в почвах, используемых в полеводстве, на наш взгляд, т.к. регулярно вносимые в почву минеральные удобрения способны влиять на изменение содержания галогена в системе почва–растение.

При оценке значимости того или иного элемента в почвах ценную информацию представляет не только знание его валового содержания, но и концентрация подвижных форм, т.к. растения способны из них поглощать необходимые элементы питания. Тем более, что по величине валового содержания элементов, в том числе и йода, сложно судить об экологической ситуации в агроценозах. По мнению Ильина [7], учет только валового содержания следует признать малопригодным при агрохимической и тем более экологической оценке почв. Это связано с тем, что даже на загрязненных почвах в силу их буферных

свойств и защитных функций растений, можно получать чистую продукцию. В этом аспекте большую роль играет изучение водорастворимой формы йода. Согласно критериям, предложенным Покатиловым [8], содержание водорастворимого йода в почвах в диапазоне 0.01–0.03 – низкое, 0.03–0.05 – пониженное, 0.05–0.10 мг/кг – оптимальное. Содержание водорастворимой формы йода в пахотных почвах юга Западной Сибири, варьирующее в интервале от следовых количеств до 0.03 мг/кг, за исключением черноземов, где оно изменяется в диапазоне от 0.03–0.05 мг/кг, можно считать низким и пониженным.

Цель работы – в длительных стационарных полевых опытах оценить изменение почвенного фонда йода в агроценозах лесостепи Западной Сибири.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использованы почвы лесостепной зоны Западной Сибири: серая лесная – северная лесостепь и лугово-черноземная – южная лесостепь. В полевом опыте, заложенном на серой лесной почве в 1988 г. на стационаре ИПА СО РАН (Искитимский р-н Новосибирской обл.), до 2000 г. выращивали овощные культуры в севообороте, а затем картофель бессменно. В исследовании рассматривали контрастные варианты данного опыта: без удобрений, NP и NPK. Удобрения вносили в форме N_{aa} , P_{cd} и K_x ежегодно с учетом потребности выращиваемой культуры. Закладку и проведение опытов осуществляли по общепринятой методике. Повторность опытов четырехкратная.

Полевой опыт на лугово-черноземной почве был заложен более 40 лет назад (в 1978 г.) на стационаре СибНИИСХоза (Омский р-н Омской обл.). На одном из полей 8-польного севооборота в большинстве лет выращивали многолетние и однолетние травы и травосмеси, на другом – зерновые и однолетние кормовые культуры. Повторность опытов также трех–четырёхкратная. Рассматриваемые в данном исследовании варианты опыта: без удобрений и вариант NP. Калийные удобрения из-за высокого содержания калия в почве не использовали (содержание обменного калия >60 мг/100 г). Побочную продукцию – солому при уборке зерновых разбрасывали по полю.

Агрохимический анализ почв проведен по стандартным методикам. Определяли pH – потенциометрическим методом, гранулометрический состав – по Качинскому, гумус – по Тюрину, валовой йод – кинетическим роданидно-нитритным методом по Проскуряковой [9]. Для определения водо-

растворимой формы йода использовали водную вытяжку в соотношении почва : вода = 1 : 4 и временем взаимодействия 4 ч с последующим центрифугированием. Растительные образцы на содержание йода также проанализированы по известной методике [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая картина урожайности культур за годы исследования сложилась таким образом, что во всех вариантах без удобрений урожайность была заметно меньше, чем в вариантах с удобрениями (табл. 1), что было вполне ожидаемо. Очевидно, что в вариантах без удобрений сформировался глубокий отрицательный баланс всех питательных веществ, что негативно отразилось на эффективном плодородии почвы и урожайности культур. Например, в варианте NP на серой лесной почве урожайность была меньше, чем в варианте NPK на 35%, что указывало на то, что сбалансированное внесение минеральных удобрений существенно повышало урожайность культур.

Урожайность культур в кормовом и зернотравяном севооборотах в вариантах NP на лугово-черноземной почве за годы наблюдений превышала вариант без удобрений соответственно в 1.36 и 1.50 раза, что также подтверждало роль минеральных удобрений. При этом в кормовом севообороте было внесено больше фосфора в 1.4 раза, а в зернотравяном было внесено больше азота в 1.1 раза. Полученные данные урожайности культур свидетельствовали о том, что такое различие во внесенных дозах азота и фосфора не оказало заметного влияния на урожайность культур в удобренных вариантах. Продуктивность культур за длительный период проведения опытов в вариантах без удобрений как в кормовом, так и зернотравяном севооборотах составила 34–37 ц/га, а при внесении NP-удобрений – 53–55 ц к.е./га, что еще раз подчеркнуло их значимость.

Несмотря на малые количества по абсолютной величине выносимого урожаем йода, его многолетний отрицательный баланс также может привести к дефициту элемента в интенсивных агроценозах. По нашим данным, содержание йода в клубнях картофеля на серой лесной почве за годы наблюдений составило в варианте без удобрений 0.040–0.042, в варианте NP – 0.041–0.043, в варианте NPK – в 2 раза больше (0.089 мг/кг). Другими словами, в первых 2-х вариантах содержание йода в растениях соответствовало уровню содержания водорастворимого йода в почве. Полученные результаты в 3-м варианте свидетельствовали о том, что сбалансированное по удобрениям пи-

Таблица 1. Общая урожайность культур и поступление макроэлементов с минеральными удобрениями в длительных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири

Вариант	Суммарная урожайность, ц к.е./га	Внесено с удобрениями кг д.в./га		
		азот	фосфор	калий
Серая лесная почва				
Овощные культуры и картофель (1988–2021 гг.)				
Без удобрений	2030	–	–	–
NP	2370	4020	2300	–
NPK	3630	4020	2300	6300
Лугово-черноземная почва				
Кормовой севооборот (1978–2021 гг.)				
Без удобрений	1610	–	–	–
NP	2200	2830	3390	–
Зернотравяной севооборот (1978–2021 гг.)				
Без удобрений	1470	–	–	–
NP	2210	3230	2900	–

тание картофеля способствует увеличению содержания йода в клубнях в количестве, превышающем концентрацию водорастворимого йода в почве.

Содержание галогена в ботве (нетоварной части урожая) за годы наблюдений в вариантах без удобрений и NP находилось примерно на одном уровне с клубнями (соответственно 0.043 и 0.044 мг/кг). В варианте NPK его содержание резко возросло до 0.112 мг/кг. Полученные данные свидетельствовали о более активном поглощении йода зеленой массой растений в сравнении с клубнями. Можно предположить, что увеличение концентрации легкорастворимых солей (KCl) в варианте NPK усиливало доступность йода почвы. Кроме того, все приведенные данные указывали и на то, что в питании растений принимают участие и другие подвижные формы галогена, в частности солерастворимая.

Исходя из полученных данных, можно говорить о том, что в надземной части растений более высоким содержанием йода характеризуются листья. Согласно данным [10], в опытах с изотопом ¹²⁵I органы и части растений овса можно расположить в следующий убывающий ряд: стебли—листья—метелки. В другом опыте в обычных условиях, без применения йодистых соединений показано, что в распределении йода по органам овса наблюдали похожую закономерность: корни—листья—стебли—зерно [11]. По мнению Кашина [11], различия в содержании йода по органам растений обусловлены высокой избирательной способностью клеточных мембран, расположенных на границе раздела органов, к пропусканию раз-

личных ионов и молекул. А на границе корень—стебель существует наиболее сильный физиологический барьер. Считая данное предположение вполне допустимым и логичным, хотелось бы высказать еще одно предположение, связанное с плотностью среды, в которой перемещаются анионы йода. Чем большей плотностью обладает среда, тем в ней, по-видимому, активнее закрепляются и труднее перемещаются анионы йода. Поэтому в орошаемой лугово-черноземной почве, где плотность среды несколько меньше, следовательно, йод, вероятно, активнее поступает в листья, чем на серой лесной почве. Уменьшение доступности йода растениям может быть обусловлено фиксацией его почвой и снижением потребности растений в элементе в процессе их развития.

Длительное сельскохозяйственное использование серой лесной и лугово-черноземной почв в полевых опытах естественно оказало свое влияние на некоторые физико-химические свойства (табл. 2). Известно, что содержание йода в почвах контролируется в основном несколькими факторами: содержанием гумуса и илистой фракцией, реакцией почвенной среды и водным режимом. В нашем исследовании было выявлено, что наибольшей способностью к поглощению йода обладает гумусовый горизонт, а более слабой — нижние горизонты, что было вполне ожидаемым, т.к. йод связывается ими преимущественно по механизму сорбции [12]. Полученные в данном исследовании результаты наглядно подтвердили это как на примере лугово-черноземной, так серой лесной почв. Во всех вариантах содержание гумуса и валового йода было больше в слое 0–20 см,

Таблица 2. Изменение почвенных свойств и содержания йода при сельскохозяйственном использовании почв

Вариант	Слой почвы, см	Физическая глина	Ил	Гумус	рН _{Н₂О} , ед. рН	Валовой йод	Водорастворимый йод
		%				мг/кг	
Лугово-черноземная почва							
Целина (исходное)	0–20	43.8	12.8	6.5	6.8	4.56	0.06
	20–40	42.2	20.2	5.4	6.8	4.19	0.04
Многолетние травы (1978–2021 гг.)							
Без удобрений	0–20	42.5	12.9	6.2	7.1	4.27	0.04
	20–40	44.2	20.1	5.6	7.1	4.19	0.03
NP	0–20	46.3	13.1	6.6	7.0	5.06	0.05
	20–40	43.4	20.3	5.2	6.9	4.80	0.04
Зерновые культуры (1978–2021 гг.)							
Без удобрений	0–20	42.1	13.2	6.4	7.0	4.83	0.03
	20–40	43.2	20.3	5.5	6.8	4.74	0.03
NP	0–20	45.3	13.8	6.7	7.2	4.42	0.03
	20–40	44.1	20.8	5.6	7.0	4.10	0.02
HCP ₀₅		3.4	1.4	0.3	0.2	0.41	0.015
Серая лесная почва							
Целина (исходное)	0–20	30.8	17.4	4.9	7.3	1.19	0.04
	20–40	31.4	18.4	2.4	7.2	0.97	0.05
Овощные культуры и картофель (1988–2021 гг.)							
Без удобрений	0–20	32.5	18.4	3.0	7.1	1.20	0.02
	20–40	31.7	18.5	1.7	7.1	0.47	0.05
NP	0–20	33.6	18.3	3.1	6.7	1.54	0.03
	20–40	32.8	19.2	1.3	7.0	0.88	0.04
NPK	0–20	33.7	19.8	3.4	6.8	1.42	0.01
	20–40	32.7	19.3	1.6	6.9	1.12	0.03
HCP ₀₅		2.7	1.2	0.4	0.2	0.15	0.012

при этом диапазон изменения содержания гумуса был более значителен, чем содержание валового йода (табл. 2).

Гумусовое вещество содержит ≈15 различных видов функциональных групп [13], из которых наиболее важными для взаимодействия с йодом являются гидроксильные, карбоксильные, карбонильные, фенольные и аминогруппы. Гидроксильная группа карбоновых кислот легко замещается анионом йода с образованием галоидангидридов кислот, ненасыщенные карбоновые кислоты реагируют с йодом по двойной связи. Фенол и его производные взаимодействуют с йодом весьма активно, т.к. водород гидроксильной группы очень подвижен.

При взаимодействии ароматических соединений с галогенами они связываются наиболее прочно при внедрении в бензольное кольцо. Аро-

матическая составляющая фульвокислот заметно меньше (26%), чем у гуминовых кислот (39%) [14]. Кроме того, повышенное содержание кислорода в фульвокислотах (до 45–50%) в сравнении с гуминовыми кислотами (до 32–38%) [13] должно, по нашему мнению, препятствовать их взаимодействию с йодом из-за возможного электростатического отталкивания между отрицательно заряженными анионами кислорода и йода.

Минеральные компоненты почвы реагируют с йодом по механизмам сорбции, окклюзии, реакциям комплексообразования и обмена. Но по способности концентрировать йод они уступают органическому веществу, т.к. сорбции может сопутствовать десорбция, а химическому взаимодействию – различные параллельные реакции.

Содержание гумуса в изученной лугово-черноземной почве в результате многолетнего сель-

скохозышественного использования изменилось незначительно, что по-видимому, было связано с большой долей орошаемых многолетних трав и других кормовых культур в структуре посевов и как следствие – поступлением в нее большого количества корневых и пожнивных остатков. Что касается серой лесной почвы, то в этом случае ситуация складывалась иначе. В сравнении с вариантом целины в вариантах без удобрений, NP и NPK произошло заметное снижение содержания гумуса, что по нашему мнению, связано с длительной минерализацией органического вещества почвы при небольшом поступлении растительного материала.

Содержание физической глины и илистой фракции в профиле исследованных почв изменялось незначительно. В исходной серой лесной почве (вариант целины) содержание физической глины составляло 30.8%, а в остальных вариантах оно было несколько больше. Другими словами, отмечена некоторая слабая тенденция к утяжелению ее гранулометрического состава.

В лугово-черноземной почве в варианте целины содержание физической глины в слое 0–20 см было чуть больше, чем в вариантах современной почвы без удобрений. В вариантах NP ее содержание повысилось более заметно. Таким образом, в этой почве также произошло небольшое утяжеление гранулометрического состава.

Что касается содержания илистой фракции, то во всех вариантах в слое 0–20 см оно практически было одинаковым (12.8–13.8%), но в слое 20–40 см оно было значительно больше по абсолютной величине, а диапазон изменения был такой же незначительный – от 20.1 до 20.8%.

Некоторое утяжеление гранулометрического состава пахотного слоя почв происходило, как мы полагаем, за счет интенсификации процессов дробления мелкопесчаной фракции, кроме того, в лугово-черноземной почве этому возможно способствовало и многолетнее орошение. Необходимо также отметить, что активная сорбция йода была характерна для горизонтов, обогащенных тонкодисперсными частицами, а также оксидами и гидроксидами алюминия и железа и карбонатных горизонтов [15, 16].

Реакция почвенной среды серой лесной почвы в варианте без удобрений была примерно такой же, как в варианте целины: соответственно от 7.1 до 7.3. В вариантах NP и NPK величина pH была чуть ниже за счет систематического внесения удобрений (табл. 2).

Что касается лугово-черноземной почвы, то в исходном варианте целины pH был чуть более

кислым в сравнении с серой лесной почвой, в остальных вариантах величина pH была почти аналогичной pH серой лесной почвы.

Различия в водном режиме изученных почв было связано с периодическим промывным режимом в серой лесной почве и влиянием поливных и грунтовых вод в лугово-черноземной почве. Кроме того, во время дождей большая часть йода смывается именно дождевыми потоками.

В целом поведение йода в почве зависит от его химических форм и свойств почвы [17, 18], а мобильность галогена – от величины pH, типа почвы и ионного состояния [19]. Таким образом, наши исследования находятся в тренде с зарубежными работами.

Содержание валового йода в лугово-черноземной почве было изначально больше, чем в серой лесной почве, примерно в 4 раза, что обусловлено как повышенным содержанием гумуса в нем, так и физической глины. Давно экспериментально установлено, что гуминовые кислоты способны концентрировать до 88% йода, а фульвокислоты – только 12% [20].

Несмотря на большое число возможностей йода быть связанным различными компонентами почвы, в реальности его концентрация в почвах самая низкая среди галогенов. Это связано с устойчивостью аниона I_3^- , которая намного больше, чем у остальных галогенов, к тому же большинство реакций с участием йода являются эндотермическими [21]. Необходимо также отметить, что многочисленными экспериментами установлено, что органическое вещество активно и прочно связывает йод [22], вследствие чего поток элемента в растения может быть значительно ослаблен.

По нашему мнению, для объективной оценки складывающейся ситуации по действию различных химических элементов, содержащихся в почве, на выращиваемую продукцию, необходимо изучить концентрацию их подвижных форм. Ведь именно подвижные формы формируют геохимическую ситуацию и обеспечивают поток химических элементов в растения и далее в животных и человека. В то же время стоит отметить, что подвижные формы не могут быть полностью освоены растительностью. Существует ряд процессов, препятствующих этому, такие как реакции образования труднорастворимых и комплексных соединений с участием изученного элемента, защитные возможности самого растения и свойственная ему избирательность в поглощении химического элемента. Помимо защитных механизмов в растениях работает и механизм избирательного отношения к ионам, который обеспечи-

вает более интенсивное поглощение дефицитного элемента и активное задержание избыточных. За счет этих, параллельно идущих процессов в растениях поддерживается необходимый элементный химический состав. Вот почему очень важным является изучение подвижных форм галогена и, прежде всего, водорастворимой формы.

Несмотря на довольно значительное различие в содержании валового йода в лугово-черноземной почве и серой лесной, содержание водорастворимой формы йода в них следует отнести к низким и пониженным по градации Покатилова. Только в вариантах целины обеих почв отмечено оптимальное содержание водорастворимой формы йода — 0.05 мг/кг, при этом в лугово-черноземной почве — в слое 0–20 см, а в серой лесной — в слое 20–40 см. По-видимому, это было связано с особенностями водного режима почв. Еще в 2-х случаях отметили оптимальное содержание водорастворимого йода: в варианте NP в слое 0–20 см лугово-черноземной почвы и в варианте без удобрений в слое 20–40 см. Выявленное низкое содержание водорастворимого йода в почве могло свидетельствовать и о незначительном содержании галогена в выращиваемых сельскохозяйственных культурах.

Рассчитав коэффициенты корреляции и детерминации между содержанием гумуса и валового йода, получили следующие результаты: для серой лесной почвы $r = 0.57$ и 0.32 , для лугово-черноземной — $r = 0.37$ и 0.14 . Коэффициенты корреляции (r) и детерминации (d_{yx}) между следующими показателями гумус-водорастворимый йод оказались равными для серой лесной почвы — 0.29 и 0.08, для лугово-черноземной почвы — 0.36 и 0.13. Величины r и d_{yx} между содержанием физической глины и валового йода оказались равными для первой почвы — 0.54 и 0.29, для второй — 0.44 и 0.19. В целом корреляционная зависимость между признаками была средней. Это было ожидаемым, т.к. содержание галогена было достаточно низким, особенно водорастворимого йода, кроме того, имелось много факторов, влияющих на его содержание; доля тех изменений, которые зависели от изученного фактора, была более выражена в серой лесной почве.

В целом исследование показало, что снижение в почве уровня доступного для растений йода было прямо пропорционально продуктивности агроценозов, соответствующим образом нарастал и йодный дефицит. Известно, что основной источник поступления йода в почву — атмосфера, содержание галогена в которой определяется близостью к океану [3]. В этой связи масштабы и сама

вероятность поступления йода во внутриконтинентальные регионы достаточно неопределенны. Несмотря на малые абсолютные количества выносимого урожаем йода, его многолетний отрицательный баланс может привести к дефициту этого микроэлемента в интенсивных агроценозах, что обуславливает очевидную необходимость мониторинга его содержания как в почвах, так и в растительной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное в многолетних стационарных полевых опытах на серой лесной и лугово-черноземной почвах в лесостепной зоне Западной Сибири, показали, что длительное сельскохозяйственное использование почв может существенно влиять на почвенный фонд йода.

Полученные результаты демонстрировали отчетливую зависимость между содержанием валового йода в почве, с одной стороны, и ее гумусированностью и гранулометрическим составом, с другой. В целинном состоянии более тяжелая и гумусированная лугово-черноземная почва содержала валового йода в 3–4 раза больше, чем целинная серая лесная почва. В то же время уровень содержания водорастворимого йода в обеих целинных почвах практически не отличался и находился на оптимальном уровне — 0.05–0.06 мг/кг.

Многолетнее сельскохозяйственное использование почв, как экстенсивное, так и интенсивное, слабо отразилось на содержании валового йода в пахотном и подпахотном почвенном слоях. При этом в интенсивных агроценозах с повышенной урожайностью выращиваемых культур содержание водорастворимого йода в верхних почвенных слоях существенно снизилось (на 50% и более), свидетельствуя о переходе исследованных почв в класс низкообеспеченных этим микроэлементом. В этой связи в интенсивном земледелии дополнительный контроль уровня йода в почвах и растениях является целесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 438 с.
2. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 495 с.
3. Кашин В.К. Биогеохимия, физиология, агрохимия йода. Л.: Наука, ЛО, 1987. 260 с.
4. Мохнач В.О. Теоретические основы биологического действия галогидных соединений. Л.: Наука, ЛО, 1968. 297 с.

5. Ковальский В.В. Биологическая роль йода // Биологическая роль йода. Научн. тр. ВАХНИЛ. М.: Колос, 1972. С. 3–32.
6. Longombe A.O., Geelhoed G.W. Iodine deficiency and Intertility in Northeast Zaire // Nutrition. 1997. V. 13. P. 342–343.
7. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
8. Покатилов Ю.Г. Биогеохимия биосферы и медико-биологические проблемы. Новосибирск, 1993. 165 с.
9. Проскуракова Г.Ф., Никитина О.Н. Ускоренный вариант кинетического роданидно-нитритного метода определения микроколичеств йода в биологических объектах // Агрохимия. 1976. № 7. С. 140–143.
10. Пристер Б.С., Григорьева Т.А., Перевезенцев В.М. Поведение йода в системе почва–растение // Агрохимия. 1979. № 3. С. 93–99.
11. Кашин В.К. Влияние форм и доз йодистых соединений на продуктивность и накопление йода растениями овса // Агрохимия. 1984. № 8. С. 101–107.
12. Конарбаева Г.А., Якименко В.Н. Поглотительная способность серой лесной почвы по отношению к йоду // Агрохимия. 2019. № 2. С. 52–59.
13. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 360 с.
14. Конарбаева Г.А., Смоленцев Б.А. Пространственно-генетические особенности распределения йода в почвах Западной Сибири // Агрохимия. 2018. № 7. С. 85–96.
15. Duborska E., Martin U., Martin S. Iodine biofortification of vegetables could improve iodine supplementation status // Agronomy. 2020. V. 10. P. 1574–1585.
16. Schnitzer M. Recent findings of the characterization of substances extracted from soils from widely differing climatic zones // Soil Organic Matter Studies. Proc. Symp. of Braunschweig 6–10 September, 1976. Vienna, 1977. P. 117–132.
17. Muramatsu Y., Wedepohl K.H. The distribution of iodine in the Earth crust // Chem. Geol. 1998. V. 147. P. 201–216.
18. Hu Q., Moran J.E., Blackwood V. Geochemical cycling of iodine species in soils. Lawrence Livermore National Lab., Livermore, CA (United States), 2007. № UCRL-BOOK-234137.
19. Zhang S., Chen Xu, Danielle G. et al. Iodine–129 and iodine–127 in groundwater at the Hanford Site, U.S. IODATE Incorporation into Calcite // Environ. Sci. Technol. 2013. P. 7–14.
20. Дарер Р.С., Мазурова А.Л., Мун А.И. Некоторые данные о формах нахождения брома, йода и бора в озерных осадках и почвах // Изв. АН КазахССР. Сер. химия. 1966. № 4. С. 8–12.
21. Некрасов В.В. Основы общей химии. М.: Химия, 1973. Т. 1. 656 с.
22. Плотникова З.М., Комиссаров И.Д. Взаимодействие гуминовых кислот с йодом // Биол. науки. 1991. № 10. С. 62–65.

Changes in the Soil Fund of Iodine in the Agrocenosis of the Forest-Steppe of Western Siberia

G. A. Konarbaeva^{a,#}, V. S. Boyko^b, and V. N. Yakimenko^a

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry
Siberian Division, RAS, prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

^b*Omsk Agrarian Scientific Center
prosp. Koroleva 26, Omsk 644012, Russia*

[#]*E-mail: konarbaeva@issa-siberia.ru*

In long-term stationary field experiments in the forest-steppe of Western Siberia, changes in the soil fund of iodine in the conditions of agrocenoses are shown. The content of gross and water-soluble iodine in soils was determined, the relationship of these indicators with the soil humus content and granulometric composition was revealed. In the virgin state, the heavier and humusized meadow-chernozem soil contained 3–4 times more gross iodine than the virgin gray forest soil; at the same time, the level of water-soluble iodine in both soils was practically the same and was at the optimal level – 0.05–0.06 mg/kg. With prolonged intensive cultivation of potatoes, vegetables and cereals, the soil content of iodine available to plants has significantly decreased, moving into the class of low security.

Key words: soil, agrocenosis, fertilizers, yield, gross and water-soluble iodine.

УДК 546.47:581.1:631.524.84:633.844

ВЛИЯНИЕ ЦИНКА НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ ГОРЧИЦЫ САРЕПТСКОЙ¹

© 2022 г. Н. М. Казнина¹, Ю. В. Батова¹, Е. С. Холопцева^{1,*}

¹Институт биологии – обособленное подразделение
Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр РАН”
185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия

*E-mail: holoptseva@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 17.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В лабораторных условиях изучено влияние цинка в концентрациях 5 (контроль), 15, 30 и 45 мг/кг субстрата на рост, фотосинтетический аппарат и продуктивность растений *Brassica juncea* сорта Славянка. Обнаружено, что цинк в изученных концентрациях тормозил линейный рост корня и побега, а также накопление сырой и сухой биомассы подземных и надземных органов. При этом рост побега ингибировался в большей степени, чем корня. Помимо этого при использовании цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата значительно снижалась площадь семядольных и настоящих листьев, что приводило к уменьшению (по сравнению с контролем) общей листовой поверхности. При этом снижение содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилла *b* и каротиноидов) и устьичной проводимости, а также замедление скорости фотосинтеза наблюдали лишь при использовании наибольшей концентрации металла. Более низкие концентрации цинка или не влияли на изученные показатели фотосинтетического аппарата, или даже оказывали стимулирующий эффект на некоторые из них. На основании анализа данных литературы и проведенного исследования сделан вывод о том, что ответные реакции и продуктивность растений горчицы сарептской зависели не только от концентрации цинка в корнеобитаемой среде, но и во многом от условий проведения эксперимента.

Ключевые слова: горчица сарептская *Brassica juncea* L. (Czern.), цинк, рост, фотосинтетический аппарат, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188122120067

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых распространенных загрязнителей окружающей среды среди тяжелых металлов (ТМ) является цинк. Повышение его содержания в почве связано с выбросами промышленных предприятий, активной работой автомобильного и железнодорожного транспорта, а также с использованием в сельском хозяйстве большого числа минеральных удобрений и химических средств защиты от болезней и вредителей, которые находят все более широкое применение [1–3]. В результате в отдельных регионах содержание цинка в почве, в том числе на территориях, занятых под сельскохозяйственные культуры, может в десятки и даже сотни раз превышать его среднее содержание [3–5]. Поскольку доступность цинка для растений очень высока [6], повышение уровня его

содержания в окружающей среде приводит к накоплению металла в органах растений, что негативно отражается на их жизнедеятельности и продуктивности, а также является причиной ухудшения качества получаемой продукции [7]. Вследствие этого во многих регионах мира уделяется повышенное внимание разработке различных методов очистки и восстановления загрязненных цинком земель. Одной из перспективных и экономически выгодных технологий, направленных на очистку почвы от избытка цинка, считается фиторемедиация [8]. Однако для ее успешного использования требуется тщательный отбор видов растений, устойчивых к этому металлу и способных накапливать его в больших количествах в надземных органах. Горчица сарептская *Brassica juncea* (L.) Czern., по мнению ряда авторов, является перспективным для использования в фиторемедиации видом. Она обладает высокой металлоустойчивостью и способна произрастать на почвах с высоким содержанием цинка, накоп-

¹ Финансовое обеспечение исследования осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (№ FMEN-2022-0004).

ливая при этом металл в побегах в довольно больших количествах [9, 10]. Однако в исследованиях других авторов, наоборот, отмечена ее чувствительность к избытку цинка [11, 12], а также о более низком фиторемедиационном потенциале этого вида [13], в том числе в сравнении с другими представителями семейства Brassicaceae, такими, например, как *B. carinata*, *B. oleracea* [14] или *B. napus* [15].

Известно, что хорошими критериями устойчивости растений к высоким концентрациям ТМ в окружающей среде являются показатели, характеризующие активность физиологических процессов в них, однако такого рода данных в отношении влияния избытка цинка на растения *B. juncea* крайне мало. Исходя из этого, цель работы — изучение влияния повышенных концентраций цинка на рост, активность фотосинтетического аппарата и продуктивность растений горчицы сарептской.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Семена горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.) сорта Славянка были предоставлены Отделом генетических ресурсов масличных и прядильных культур Федерального исследовательского центра “Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова”. Опыты проводили в сосудах с песком (объем 800 мл). Сульфат цинка добавляли перед посевом, предварительно растворив в 100 мл дистиллированной воды, в концентрациях (по элементу) 5 (контроль), 15, 30 и 45 мг/кг субстрата. Семена горчицы, предварительно замоченные в дистиллированной воде на 1 сут, высевали в сосуды по 10 шт. в каждый. Растения выращивали под светоустановкой при температуре 22°C, относительной влажности воздуха 60–70%, ФАР 200 мкмоль/(м² с), 14-часовом фотопериоде. Полив осуществляли питательным раствором Хогланда–Арнона, не содержащим цинка.

Анализ растений проводили спустя 30 сут после посева. У контрольных и опытных растений измеряли длину корня и высоту побега. Воздействие цинка на фотосинтетический аппарат (ФСА) оценивали по изменению у опытных растений по сравнению с контрольными площади семядольных и настоящих листьев, общей листовой поверхности, содержания фотосинтетических пигментов, устьичной проводимости и скорости фотосинтеза. Помимо этого, определяли продуктивность растений на основании накопления сырой и сухой биомассы подземных и надземных органов.

Площадь листовых пластинок определяли с помощью программы AreaS 2.1. Фотосинтетические пигменты экстрагировали 96%-ным этанолом, содержание хлорофиллов и каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом (спектрофотометр СФ-2000, Россия) [16]. Интенсивность фотосинтеза и устьичную проводимость измеряли с помощью портативной системы для исследования CO₂-газообмена и водяных паров (НСМ-1000, Германия). Сухую биомассу определяли весовым методом, высушивая образцы в термостате при 105°C.

Каждый вариант опыта состоял из 4-х повторностей. При измерении показателей роста и продуктивности растений биологическая повторность в пределах одного варианта опыта составляла 10 растений, при определении показателей активности ФСА — 5 растений. Аналитическая повторность трехкратная. Опыт повторяли дважды. Результаты экспериментов обработаны с помощью методов вариационной статистики с использованием программы Excel. О достоверности различий судили с помощью *t*-критерия Стьюдента при $p < 0.05$.

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние цинка на линейный рост растений Brassica juncea. Показатели роста растений являются хорошими критериями оценки их металлоустойчивости. В ряде работ указывали на уменьшение ростовых параметров растений горчицы сарептской в присутствии избытка цинка в корнеобитаемой среде [17, 18]. В наших опытах цинк в изученных концентрациях также тормозил линейный рост корня и побега горчицы. Например, в присутствии металла в концентрациях 15 и 30 мг/кг субстрата длина корня была в 1.5 раза меньше, чем у растений контрольного варианта, а высота побега — почти в 2 раза. Дальнейшее повышение концентрации металла (до 45 мг/кг) приводило к еще более сильному снижению этих показателей, которые оказались в 4 раза меньше, чем у контрольных растений (табл. 1). Важно отметить, что при использовании металла в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата высота побега снижалась в большей степени, чем длина корня. Возможно, это было связано с более высоким содержанием цинка в надземных органах, что характерно для этого вида растений [10, 18]. Отрицательное воздействие цинка на линейный рост

Таблица 1. Влияние цинка на длину корня и высоту побега растений *Brassica juncea* сорта Славянка

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Длина корня, см	14.4 ± 0.8	10.2 ± 1.4*	9.9 ± 1.7*	3.2 ± 0.2*
Высота побега, см	23.2 ± 1.5	11.8 ± 1.8*	10.3 ± 5.2*	5.5 ± 0.2*

*Различия с контролем статистически значимы при $p < 0.05$. То же в табл. 2–4.

Таблица 2. Влияние цинка на площадь листьев (см²) и общую листовую поверхность *Brassica juncea* сорта Славянка

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Семядольный лист	2.83 ± 0.20	2.39 ± 0.18	1.36 ± 0.08*	0.99 ± 0.10*
1-й настоящий лист	15.6 ± 1.5	14.9 ± 0.2	4.01 ± 0.05*	1.09 ± 0.02*
2-й настоящий лист	14.1 ± 1.5	10.9 ± 1.4	2.55 ± 0.04*	0.83 ± 0.01*
3-й настоящий лист	9.57 ± 0.89	11.8 ± 0.4*	1.92 ± 0.02*	0.62 ± 0.01*
4-й настоящий лист	7.03 ± 0.61	4.57 ± 0.05*	1.14 ± 0.01*	–
Общая листовая поверхность	50.1 ± 7.3	48.9 ± 5.4	10.5 ± 1.6*	4.11 ± 0.49*

корня и побега можно объяснить его прямым воздействием на деление и растяжение клеток. В частности, обнаружено, что под действием металла снижалась жизнеспособность клеток меристемы корня [17], уменьшение их размеров, замедление интенсивности клеточных делений [19]. Воздействие цинка на растяжение клеток, как правило, связывают с нарушением проницаемости мембран и снижением эластичности клеточных стенок вследствие нарушения структуры микротрубочек [20]. Нельзя исключить и опосредованное действие высоких концентраций цинка на рост растений из-за замедления скорости фотосинтеза, нарушения водного обмена и/или минерального питания [21].

Влияние цинка на ФСА растений Brassica juncea. Важным показателем, определяющим фотосинтетический потенциал растений, является площадь листьев и общая листовая поверхность. В наших опытах цинк в концентрации 15 мг/кг субстрата не оказывал ярко выраженного отрицательного воздействия на размеры семядольных и настоящих листьев горчицы, тогда как при более высоких концентрациях металла размеры листьев опытных растений были меньше, чем контрольных. При этом ингибирование цинком размеров настоящих листьев было выражено в большей степени, чем семядольных. Например, площадь семядольных листьев при воздействии цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата оказалась меньше, чем в контроле в 2 и 3 раза соответственно, а площадь первой и второй пар настоящих листьев – в 4–10 раз (табл. 2). В результате общая

листовая поверхность растений в опытных вариантах с использованием цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг была значительно меньше (в 5 и 12 раз соответственно), чем в контрольном варианте.

Уменьшение размеров листьев горчицы сарептской было обнаружено ранее и другими авторами, в частности, при концентрации цинка 300 мкМ [17]. Среди возможных причин этого можно указать снижение количества и размеров паренхимных и эпидермальных клеток, уменьшение размера межклеточного пространства, что ранее было обнаружено и у горчицы сарептской [9]. Кроме того, к снижению площади листьев могло привести и отрицательное воздействие цинка на физиологические процессы, в том числе водный обмен, минеральное питание, фотосинтез.

Известно, что поддержание необходимой скорости фотосинтеза во многом зависит от содержания фотосинтетических пигментов, что особенно важно в стрессовых условиях. В наших опытах в присутствии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата общее содержание хлорофиллов и каротиноидов возрастало по сравнению с контролем (табл. 3). При этом соотношение хлорофиллов ($a : b$) сохранялось на уровне контроля. При использовании металла в концентрации 30 мг/кг содержание пигментов значимо не изменялось, хотя наблюдали некоторое увеличение соотношения хлорофиллов по сравнению с контролем. Дальнейшее повышение концентрации цинка до 45 мг/кг не влияло на содержание хлорофилла a , но вызывало значительное уменьше-

Таблица 3. Влияние цинка на содержание фотосинтетических пигментов в тканях 1-го настоящего листа растений *Brassica juncea* сорта Славянка

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сырой массы	0.287 ± 0.042	0.468 ± 0.029*	0.336 ± 0.011	0.327 ± 0.011
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сырой массы	0.134 ± 0.021	0.199 ± 0.026*	0.128 ± 0.006	0.078 ± 0.006*
Общее содержание хлорофиллов (<i>a</i> + <i>b</i>)	0.421 ± 0.062	0.667 ± 0.054*	0.464 ± 0.017	0.405 ± 0.016
Соотношение хлорофиллов (<i>a</i> : <i>b</i>)	2.16 ± 0.04	2.46 ± 0.17	2.64 ± 0.08*	4.30 ± 0.24*
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы	0.091 ± 0.004	0.135 ± 0.008*	0.091 ± 0.003	0.056 ± 0.004*

ние количества каротиноидов, а также хлорофилла *b*, что приводило к возрастанию отношения хлорофиллов *a* : *b*.

О преимущественном снижении у горчицы сарептской хлорофилла *b* при воздействии цинка в высоких концентрациях указывали ранее и другие авторы [22, 23]. С чем это связано, до конца не ясно, но в литературе имеются сведения о снижении под действием металла активности хлорофилла *a* оксигеназы – фермента, участвующего в биосинтезе хлорофилла *b* из хлорофилла *a* [23].

Важным показателем сбалансированности фотосинтетического процесса является соотношение хлорофиллов. Поскольку хлорофилл *a* связан с реакционными центрами фотосистем, а хлорофилл *b* – со светособирающими комплексами, увеличение соотношения *a* : *b* свидетельствует об уменьшении светопоглощения [24] и может являться причиной замедления скорости фотосинтеза. Подобный эффект в условиях загрязнения почв ТМ отмечен у многих видов растений, в том числе у горчицы сарептской [25]. Есть мнение, что такая реакция является адаптивной и характерна для более устойчивых к загрязнению видов растений, тогда как у менее устойчивых величина этого соотношения снижается [26].

Большое влияние на скорость фотосинтетических процессов оказывает и степень открытия устьиц. Проведенное нами исследование показало, что у горчицы сарептской при воздействии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата значимых изменений устьичной проводимости не наблюдали (рис. 1а). Более высокая концентрация металла (30 мг/кг субстрата) приводила к росту величины этого показателя по сравнению с контролем, что, очевидно, было связано с увеличением размеров устьичной щели и направлено на усиление поглощения углекислого газа для поддержания необходимой скорости фотосинтеза в этих условиях. Цинк в концентрации 45 мг/кг субстрата, наоборот, вызывал резкое снижение устьичной проводимости почти в 3 раза по сравнению с контролем, указывая на частичное закрытие устьиц. Подобный эффект цинка наблюдали и другие авторы [27, 28]. Предполагается, что это может быть вызвано возрастанием количества абсцизовой кислоты и/или изменением регуляции K^+ -каналов в замыкающих клетках [29, 30].

Обнаруженные нами изменения показателей ФСА у растений в зависимости от концентрации цинка в корнеобитаемой среде отразились и на скорости фотосинтеза. Например, при концен-

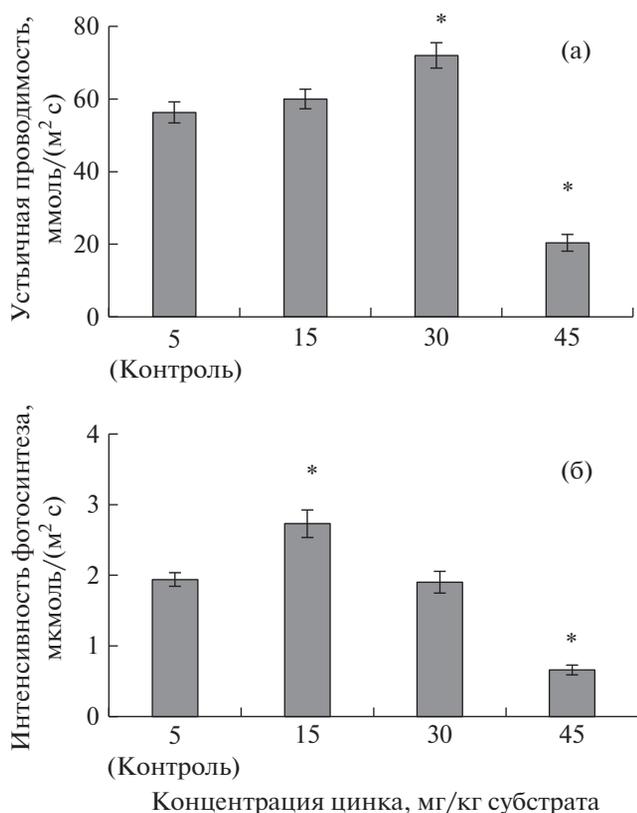


Рис. 1. Влияние цинка на устьичную проводимость (а) и скорость фотосинтеза (б) растений *Brassica juncea* сорта Славянка.

Таблица 4. Влияние цинка на накопление подземной и надземной биомассы растениями *Brassica juncea* сорта Славянка, г/растение

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Сырая биомасса корней	1.02 ± 0.21	0.75 ± 0.14	0.12 ± 0.02*	0.06 ± 0.02*
Сухая биомасса корней	0.055 ± 0.010	0.050 ± 0.005	0.009 ± 0.001*	0.007 ± 0.002*
Сырая биомасса побега	2.57 ± 1.28	1.66 ± 0.24	0.33 ± 0.04*	0.11 ± 0.01*
Сухая биомасса побега	0.237 ± 0.036	0.204 ± 0.026	0.029 ± 0.004*	0.014 ± 0.002*

трации металла 15 мг/кг субстрата скорость процесса возрастала (в 1.5 раза) по отношению к контролю, при 30 мг/кг – оставалась на уровне контроля, а при 45 мг/кг – оказалась почти в 3 раза меньше, чем в контроле (рис. 1б).

В литературе имеются данные как об увеличении скорости фотосинтеза у растений в присутствии цинка [31, 32], так и о его замедлении [31, 33–35]. Как и в нашем опыте это в большинстве случаев зависело от концентрации металла в корнеобитаемой среде и определялось целым рядом изменений активности ФСА, происходивших на разных уровнях организации. Обнаруженное нами увеличение скорости фотосинтеза в присутствии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата, вероятно, явилось следствием повышения содержания в листьях фотосинтетических пигментов. Поддержание необходимого уровня этого процесса в условиях действия металла в концентрации 30 мг/кг субстрата обеспечивалось необходимым уровнем хлорофилла *a* и каротиноидов и увеличением устьичной проводимости. Значительное замедление скорости фотосинтеза при наибольшей концентрации металла во многом было связано со снижением содержания хлорофилла *b* и каротиноидов, уменьшением размеров устьичной щели, что, вероятно, приводило к ухудшению светопоглощения и газообмена.

Влияние цинка на продуктивность растений Brassica juncea. Известно, что накопление биомассы растениями в условиях действия высоких концентраций ТМ является показателем их металлоустойчивости и одним из необходимых условий для использования конкретного вида в фиторемедиации загрязненных ТМ почв. В нашем опыте в присутствии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата достоверного снижения (по отношению к контролю) сырой и сухой биомассы корней и побегов не происходило, тогда как более высокие концентрации металла оказывали ингибирующее действие на эти показатели (табл. 4). Например, в присутствии цинка в концентрации 30 мг/кг субстрата сырая и сухая биомасса корня

были меньше, чем у контрольных растений в 7 и 6 раз соответственно, а при концентрации металла 45 мг/кг субстрата – в 17 и 8 раз. Накопление надземной биомассы ингибировалось цинком в еще большей степени, чем корней. В частности, сырая биомасса побега при воздействии металла в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата снижалась по сравнению с контролем в 8 и 23 раза, сухая – в 8 и 17 раз соответственно.

Имеющиеся в литературе данные о продуктивности горчицы сарептской в условиях высоких концентраций цинка в корнеобитаемой среде весьма противоречивы. В одних исследованиях уменьшение (более чем в 2 раза) биомассы побега наблюдали уже в присутствии цинка в концентрации 50 мг/л [17], тогда как в работе других авторов значимого изменения сырой и сухой надземной биомассы не наблюдали даже при концентрации металла 147 мг/кг субстрата [14]. Одной из причин таких различий является, на наш взгляд, разница в устойчивости к цинку разных сортов, а также в условиях постановки экспериментов. Например, в условиях водной культуры более низкие концентрации металла приводят к сильному отрицательному эффекту цинка на растения по сравнению с опытами с использованием почвы. В наших опытах снижение биомассы горчицы сарептской обнаруживалось при действии цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата, что во многом было связано с торможением роста корня и побега уже на ранних этапах роста растений, а также с уменьшением размеров листьев. Ярко выраженное негативное действие металла в использованных концентрациях, вероятно, объясняется внесением соли цинка в виде раствора, при котором растения горчицы, как гипераккумуляторы, легко поглощают цинк в растворимой форме и накапливают его в органах в относительно больших количествах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании анализа данных литературы и проведенного исследования можно

сделать вывод о том, что рост, активность ФСА и продуктивность *B. juncea* зависели от концентрации цинка в корнеобитаемой среде, а также от условий проведения эксперимента. При внесении соли цинка в виде раствора в песчаный субстрат металл в концентрации 15 мг/кг субстрата тормозил линейный рост растений, но не сказывался отрицательно на ФСА и продуктивности растений. При дальнейшем повышении концентрации металла до 30 мг/кг помимо замедления роста корня и побега уменьшалась площадь листьев и общая листовая поверхность, что отразилось на биомассе растений, однако скорость фотосинтеза в этих условиях сохранялась на уровне контроля. Цинк в концентрации 45 мг/кг оказывал сильное негативное влияние как на рост, так и на ФСА растений, что в итоге привело к значительному снижению их продуктивности. Сравнение полученных результатов с данными других исследователей показало, что для рекомендации использования сортов *B. juncea* в фиторемедиации загрязненных цинком почв необходимо проведение опытов в разных условиях, при этом важно учитывать доступную для растений концентрацию металла в почве конкретных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский В.В. Основные черты биохимии цинка и кадмия // Цинк и кадмий в окружающей среде. М.: Наука, 1992. С. 7–18.
2. McGrath S.P., Loveland P.J. Soil geochemical atlas of England and Wales. London: Blackie and Sons, 1992. 101 p.
3. Mertens J., Smolders E. Zinc // Heavy metals in soils: trace metals and metalliodes in soils and their bioavailability / Ed. V.J. Alloway. Dordrecht: Springer, 2013. P. 465–493.
4. Царева М.В., Персикова Т.Ф. Виды загрязняющих химических веществ // Нейтрализация загрязнения почв / Под. ред. Ю.А. Мажайского. Рязань, 2008. С. 37–59.
5. Tedoldi D., Charafeddine R., Branchu P., Thomas E., Gromaire M.-C. Intra- and inter-site variability of soil contamination in road shoulders – Implications for maintenance operations // Sci. Total Environ. (in press). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144862.hal-03097956>
6. Алексеева-Попова Н.В., Моченят К.И. Внутрипопуляционные различия реакции *Salvia stepposa* на избыток цинка в среде // Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов. Л.: Бот. Ин-т РАН, 1991. 215 с.
7. Тутов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 170 с.
8. Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 5. С. 768–780.
9. Maruthi Sridhar B.B., Diehl S.V., Han F.X., Monts D.L., Su Y. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea* (L.)) // Environ. Expt. Bot. 2005. V. 54. P. 131–141.
10. Chaudhry H., Nisar N., Mehmood S., Iqbal M., Nazir A., Yasir M. Indian Mustard *Brassica juncea* efficiency for the accumulation, tolerance and translocation of zinc from metal contaminated soil // Biocatalys. Agricult. Biotechnol. V. 23. P. 101489. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101489>
11. Marchiol L., Assolari S., Sacco P., Zerbi G. Phytoextraction of heavy metals by canoa (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus satives*) growth on multicontaminated soil // Environ. Pollut. 2004. V. 132. P. 21–27.
12. Adediran G.A., Ngwenya B.T., Mosselmans J.F.W., Heal K.V., Harve B.A. Mechanisms behind bacteria induced plant growth promotion and Zn accumulation in *Brassica juncea* // J. Hazard. Mater. 2015. V. 283. P. 490–499.
13. Cui E., Cui B., Fan X., Li S., Gao F. Ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) intercropping can improve the phytoremediation of antibiotics and antibiotic resistance genes but not heavy metal // Sci. Total Environ. 2021. V. 784. 147093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147093>
14. Gisbert C., Clemente R., Navarro-Avino J., Baixauli C., Giner A., Serrano R., Walker D.J., Bernal M.P. Tolerance and accumulation of heavy metals by Brassicaceae species grown in contaminated soils from Mediterranean regions of Spain // Environ. Exp. Bot. 2006. V. 56. P. 19–27.
15. Feigl G., Kumar D., Lehotai N., Tugyi N., Molnár Á., Ördög A., Szepesi Á., Gémes K., Laskay G., Erdei L., Kolbert Z. Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013. V. 94. P. 179–189.
16. Wintermans J.F.G.M., De Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their phenoxyphytins in ethanol // Biochimica et Biophysica Acta. 1965. V. 109. P. 448–453.
17. Feigl G., Kolbert Z., Lehotai N., Molnár A., Ördög A., Bordé A., Laskay G., Erdei L. Different zinc sensitivity of *Brassica* organs is accompanied by distinct responses in protein nitration level and pattern // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. V. 125. P. 141–152.
18. Chowardhara B., Borgohain P., Saha B., Awasthi J.P., Moulick D., Panda S.K. Assessment of phytotoxicity of zinc on Indian mustard (*Brassica juncea*) varieties during germination and early seedling growth // Ann. Plant Soil Res. 2019. V. 21(3). P. 239–244.
19. Довгалюк А.И., Калиняк Т.Б., Блюм Я.Б. Цитогенетические эффекты солей токсичных металлов в клетках апикальной меристемы корней проростков *Allium cepa* L. // Цитология и генетика. 2001. Т. 35. № 2. С. 3–10.
20. Иванов В.Б., Быстрова Е.И., Серегин И.В. Сравнение влияния тяжелых металлов на рост корня в

- связи с проблемой специфичности и избирательности их действия // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 3. С. 445–454.
21. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В. Влияние цинка на продуктивность ярового ячменя в вегетационном опыте // Агрохимия. 2010. № 8. С. 72–76.
 22. Ebbs S.D., Kochian L.V. Toxicity of zinc and copper to *Brassica* species: Implications for phytoremediation // J. Environ. Qual. 1997. V. 26. P. 776–781.
 23. Ebbs S., Uchil S. Cadmium and zinc induced chlorosis in Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern) involves preferential loss of chlorophyll *b* // Photosynthetica. 2008. V. 46. № 1. P. 49–55.
 24. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Фотосинтез // Физиология растений: учебник для студ. вузов / Под ред. И.П. Ермакова. М.: Изд. центр “Академия”, 2005. С. 108–211.
 25. Singh P.K., Tewari R.K. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants // J. Environ. Biol. 2003. V. 24. P. 107–112.
 26. Николаевский В.С. Биологические основы газостойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
 27. Sagardoy R., Morales F., López-Millán A.F., Abadía A., Abadía J. Effects of zinc toxicity in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics // Plant Biol. 2009. V. 11 (3). P. 339–350. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x>
 28. Shi G.R., Cai Q.S. Photosynthetic and anatomic responses of peanut leaves to zinc stress // Biol. Plantarum. 2009. V. 53. P. 391–394.
 29. Bishnoi N.R., Sheoran I., Singh R. Influence of cadmium and nickel on photosynthesis and water relations in wheat leaves of different insertion level // Photosynthetica. 1993. V. 28. № 3. P. 473–479.
 30. Perfus-Barbeoch L., Leonhardt N., Vavasseur A., Forestier C. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status // Plant J. 2002. V. 32. P. 539–548.
 31. Subba P.E., Mukhopadhyay M., Mahato S.K., Bhutia K.D., Mondal T.K., Ghosh S.K. Zinc stress induces physiological, ultra-structural and biochemical changes in mandarin orange (*Citrus reticulata* Blanco) seedlings // Physiol. Mol. Biol. Plant. 2014. V. 20. № 4. P. 461–473. <https://doi.org/10.1007/s12298-014-0254-2>
 32. Liu J.-P., Deng Q.-J., Shang Y.-J., Yao X.-W., Wang H.-K., Tang Y.-J., Peng F.-R., Tan P.-P. Effects of zinc application on the growth and photosynthetic characteristics of pecan at the seedling stage // Plant Biol. 2021. V. 23. P. 1149–1156. <https://doi.org/10.1111/plb.13307>
 33. Kaznina N.M., Titov A.F. Effect of zinc deficiency and excess on the growth and photosynthesis of winter wheat // J. Stress Physiol. Biochem. 2017. V. 13. № 4. P. 88–94.
 34. Khan H.R., McDonald G.K., Rengel Z. Zinc fertilization and water stress affects plant water relations, stomatal conductance and osmotic adjustment in chickpea (*Cicer arietinum* L.) // Plant and Soil. 2004. V. 267. P. 271–284.
 35. Szopinski M., Sitko K., Giero Z., Rusinowski S., Corso M., Hermans C., Verbruggen N., Małkowski E. Toxic effects of Cd and Zn on the photosynthetic apparatus of the *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis arenosa* pseudo-metallophytes // Front. Plant Sci. 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00748>

Effect of Zinc on the Physiological Parameters and Productivity of Sarepta Mustard Plants

N. M. Kaznina^a, Yu. V. Batova^a, and E. S. Kholoptseva^{a,#}

^a*Institute of Biology – a separate division of the Federal Research Center “Karelian Scientific Center of the RAS”
Pushkinskaya ul. 11, Petrozavodsk 185910, Russia*

[#]*E-mail: kholoptseva@krc.karelia.ru*

The effect of zinc in concentrations of 5 (control), 15, 30 and 45 mg/kg of substrate on the growth, photosynthetic apparatus and productivity of *Brassica juncea* plants of the Slavyanka variety was studied in laboratory conditions. It was found that zinc in the studied concentrations inhibited the linear growth of root and shoot, as well as the accumulation of raw and dry biomass of underground and aboveground organs. At the same time, the growth of the shoot was inhibited to a greater extent than the root. In addition, when zinc was used at concentrations of 30 and 45 mg/kg of the substrate, the area of cotyledon and true leaves was significantly reduced, which led to a decrease (compared with the control) of the total leaf surface. At the same time, a decrease in the content of photosynthetic pigments (chlorophyll *b* and carotenoids) and stomatal conductivity, as well as a slowdown in the rate of photosynthesis were observed only when using the highest concentration of metal. Lower zinc concentrations either did not affect the studied parameters of the photosynthetic apparatus, or even had a stimulating effect on some of them. Based on the analysis of literature data and the conducted research, it was concluded that the responses and productivity of Sarepta mustard plants depended not only on the concentration of zinc in the root environment, but also largely on the conditions of the experiment.

Key words: Sarepta mustard *Brassica juncea* L. (Czern.), zinc, growth, photosynthetic apparatus, productivity.

УДК 631.452:631.445.25:519.257

ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛОДОРОДИЯ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

© 2022 г. Р. Н. Ушаков^{1,*}, Т. Ю. Ушакова¹, А. В. Ручкина¹,
К. В. Абдулаязнова¹, Ф. Ю. Бобраков¹

¹Рязанский государственный агротехнологический университет
390044 Рязань, ул. Костычева, 1, Россия

*E-mail: r.ushakov1971@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2022 г.

После доработки 11.07.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Оценили плодородие почв и его оптимизацию с помощью кластерного анализа (КА), дискриминантного анализа (ДА) и метода главных компонент (МГК). Работа выполнена по материалам агрохимического обследования агросерой почвы в ЗАО “Макеево” Зарайского р-на Московской обл., выполненного Агрохимической службой “Московский”. Определены солевая (pH_{KCl}) и гидролитическая кислотность (H^+), подвижные формы фосфора (P_2O_5) и обменного калия (K_2O), гумус, обменные кальций (Ca^{2+}) и магний (Mg^{2+}), степень насыщенности основаниями (I) в соответствии с бонитетом. Объем выборки равен 224. По медиане массив данных был разделен по бонитету на группу 1 – бонитет <90 ед., группу 2 – >90 ед. В этом случае показатели H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} не объясняли достоверность различий между бонитетами. При использовании кластерного анализа выпадали показатели pH_{KCl} и содержание гумуса. Причина – отсутствие оптимальности соотношений между показателями. Провели корректировку кластеров и исключили показатель содержания $P_2O_5 > 290$ мг/кг и сменили группу 1 на группу 2 при содержании гумуса >3%. Все показатели оказали достоверное влияние на различия между группой (кластер) 1 (43 ед.) и группой 2 (53 ед.). Показатель МГК позволил определить вклад каждого почвенного показателя в разделении на группы. В первой компоненте (37% всей дисперсии), наибольший вклад в формирование различий бонитетов оказали показатели I , H^+ (вклад 37%). Во второй главной компоненте (26%) различия обусловили элементы питания (вклад 35–44%). Вклад гумуса (90%) отражен в третьей компоненте (17% всей дисперсии). Указанные методы анализа позволили выявить условия, при которых участие почвенных показателей было достоверным и равным по величине вклада. Только в этом случае достигалась комплексная оценка плодородия. Оптимальные параметры плодородия в данном случае при высоком показателе бонитета достигались при pH_{KCl} 5.5–5.6 ед., H^+ – 1.7–1.9 мгэкв/100 г, P_2O_5 – 225–240 мг/кг, K_2O – 158–192 мг/кг, содержании гумуса – 3.0–3.4%, Mg^{2+} – 4.4–6.0 мгэкв/100 г, V – 90–91%.

Ключевые слова: оценка плодородия, агросерая почва, бонитет, кластерный анализ, дискриминантный анализ, метод главных компонент.

DOI: 10.31857/S0002188122120134

ВВЕДЕНИЕ

Потенциал плодородия зависит главным образом не от количественной размерности каждого из его показателей в отдельности, а от степени приближения к оптимальности соотношений между ними в едином, целостном проявлении. Важна комплексная оценка почвенного плодородия [1–3], и на этой основе – организация комплексного окультуривания почв в хозяйстве.

Представить комплексную оценку позволяет расчет сводного показателя качества почвы (СПКП или бонитет) – интегральный показатель комплексной оценки для информационного управле-

ния плодородия почв [4]. Справедливо утверждение, сделанное в работе [5], что для бонитировки почв целесообразно использовать взаимосвязь между их свойствами. Теоретической основой оценки плодородия почв является представление о плодородии как о сложной системе, характеризующейся большим числом взаимосвязанных параметров [6, 7].

Оперирование агрономической службой хозяйства только одними картограммами, в которых отражены усредненные показатели содержания элементов питания и гумуса, а также кислотности, не дает основу для анализа состояния почвенного плодородия в хозяйстве. Анализ дол-

жен базироваться на развернутой информации о всех почвенных образцах, отобранных в хозяйстве, и проводится не только с позиции оценки через продуктивность пашни, но и понимания комплексности почвенного плодородия. Даже в пределах одного хозяйства в силу пространственной вариации плодородия представлено широкими комбинациями отражающих его параметров. Поиск оптимального, приемлемого варианта комбинации должен входить в обязанность агронома. На практике нередко возникают ситуации, когда интенсивное применение минеральных удобрений приводит к увеличению содержания элементов питания до высших классов обеспеченности, повышению урожайности, и как следствие – к росту бонитета. На деле результат его оценки может вызывать сомнения, вследствие опасности искаженного представления об истинном состоянии плодородия почв, например, по причине неочевидности проявления вклада в плодородие других, менее динамичных почвенных свойств. Примерами могут быть высокая обеспеченность почвы фосфором и калием на фоне высокой кислотности, низкого содержания гумуса. Если подобные соотношения, выраженные в несовпадении оптимальных условий при максимальном наборе почвенных свойств, проявляются часто, то для разреза всего почвенного покрова бонитет не может быть высоким. Поэтому требуется оптимизация плодородия. Под оптимизацией плодородия мы понимаем проявление комплексности, наличие оптимальных соотношений между почвенными показателями, их структурное единство.

Формализация знаний о бонитете и роли (месте) почвенных свойств в его формировании, представленная в форме структурных связей, имеет существенное значение для научного понимания вопросов почвенного плодородия, решения практических задач оценки качества земли. Одним из методов решения указанных вопросов является применение некоторых методов многомерного статистического анализа (ММСА). Они находят свое применение для обработки информации о свойствах почв [8–10]. Например, имеются работы, в которых метод главных компонент (МГК) используют для ряда научных задач в земледелии и почвоведении [11–14]. ММСА позволяют максимально приблизиться к решению сложных вопросов, связанных с пониманием плодородия почвы. На наш взгляд, ММСА позволяют выявить и обработать недоучтенную информацию о почвенных свойствах. Это позволит агрономической службе хозяйства найти оптимальные варианты комплексного окультурива-

ния почвы. Поиск в базах данных систем science-direct.com, springer.com и elibrary.ru не выявил научных источников, в которых кластерный анализ (КА), дискриминантный анализ (ДА), МГК применяли бы к результатам оценки почвенного плодородия по материалам агрохимических обследований почв в хозяйстве для принятия агрономической службой правильных решений по комплексному улучшению почвенного плодородия.

По-видимому, оптимизация плодородия подразумевает в том числе создание условий для проявления комплексности. Под комплексностью плодородия мы понимаем, с точки зрения рассмотрения его как свойства, не просто охватывание почвенных показателей, но, с позиции явления, как уникальную сущность по формированию (организации) между почвенными показателями структурного единства однонаправленных связей, сочетаний.

Результаты агрохимического мониторинга почвенных показателей, проводимого в рамках обследования элементарных участков производственных полей, представляют не только практический, но и научный интерес в силу получения обширного и в большинстве случаев варибельного в зависимости от объекта и признаков массива данных. В большинстве случаев выборка формируется не на однородном фоне. В выборке одномоментно можно обнаружить самые разнообразные сочетания между почвенными показателями: удачные, если величины всех показателей меняются в пределах рекомендуемых нормативов [15], моделей плодородия [16] и плохие, если даже один из показателей выпадает по причине неудовлетворительности. В пределах поля встречаются фоновые показатели, характеризующие разные уровни плодородия. Для хозяйств агрохимические станции готовят картограммы отдельно для почвенных показателей. Содержание элементов питания может быть высоким, гумуса – низким. В итоге, доля удачных комбинаций может быть не высокой. Можно предположить, что оценка плодородия включает, в том числе, и выявление плохих сочетаний.

Результаты агрохимического обследования полей – это ценный информационный материал, который можно использовать для понимания вопросов формирования тех структурных внутренних связей (соотношений), которые являются основой проявления комплексности плодородия. Применение ММСА для изучения комплексности плодородия является одним из эффективных подходов.

Для оценки плодородия почвы, опираясь на результаты выборки агрохимического обследования полей, анализ, по-видимому, необходимо начинать с КА, который представляет собой процедуру упорядочивания объектов в сравнительно однородные группы по показателям почвенных свойств в силу их неизбежной пространственной изменчивости. Если пространственный фон неоднородный, то кластеризация (метод k -средних) сформирует достоверно различающиеся (при $p < 0.05$) группы почвенных свойств в зависимости от уровня плодородия. Если по какому-то показателю межгрупповые различия недостоверные, то необходимо корректировать исходный массив данных — выбраковывать самые плохие комбинации в сочетании почвенных свойств, например, при очень высоком содержании элементов питания и низком однородном в пространстве содержании гумуса (ниже нормативного, [15]) или другим причинам.

В большинстве случаев варьирование в пространстве почвенных показателей широкое. Если это так, то КА позволяет пространственную неоднородность классифицировать по величине показателя почвенных свойств или даже по уровню плодородия, если величины показателей между группами соответствуют разным нормативным условиям. Результаты КА позволят выявить в пространстве и зафиксировать на картограмме элементарные участки, в пределах которых величины почвенных показателей группы наименьшие. Далее разработать мероприятия для улучшения показателей, как вариант, до уровня наилучшей группы, которая отражает уровень плодородия почвы, сложившийся на протяжении большого интервала времени, а поэтому его можно считать результатом стабильной тенденции землепользования.

Далее при помощи ДА можно по показателю лямбда Уилкса определить доли влияния факторов, например, удобрений, фунгицидов на урожайность культуры [17]. По-видимому, аналогичным образом можно определить вклады почвенных параметров в формирование почвенного плодородия по МГК, и их вклады, как мы полагаем, рассматривая проблему в контексте оптимизации почвенного плодородия, должны не сильно различаться между собой. В этом случае может возникнуть справедливый вопрос: зачем добиваться схожего (однородного) вклада почвенных параметров в групповую дискриминацию? Ведь отсутствие групповых различий указывает на однородный по плодородию почвенный покров в хозяйстве и применение ДА теряет всякий смысл вслед за КА. Можно предположить, что более высокие вклады (веса) в дискриминацию одних поч-

венных параметров в сравнении с другими обусловлены относительно высокими коэффициентами варьирования первых. На этом фоне вклады других показателей могут снизиться до критических величин, при которых показатели не проходят тест на достоверное участие в дискриминации. Но в случае, если они также характеризуются широким варьированием, важно их учитывать и, если это возможно, выяснять причины их исключения программой. Возможно, это связано с отсутствием распределения, близкого к нормальному. Вот почему относительно однородный вклад всех показателей косвенно указывает на их схожее пространственное варьирование, в смысле наличия максимального количества удачных комбинаций между почвенными показателями, когда, например, среднему или высокому уровню плодородия соответствуют все почвенные свойства. Антропогенная деятельность должна сводиться к улучшению всех почвенных свойств. При повышении запаса фосфора в почве должно увеличиваться содержание гумуса и т.д. В математическом смысле антропогенная деятельность как бы устанавливает (организует) линейные связи между почвенными параметрами и во многом не случайные. В МГК заложены только линейные комбинации показателей. Поэтому чем теснее связи, тем больше вероятность участия всех изучаемых почвенных показателей в извлечении главных компонент с условием проверки на остаточную корреляцию (она должна приближаться к нулю). Это можно интерпретировать как обеспечение структурного единства почвенных свойств, а это важный критерий оптимизации почвенного плодородия.

Итак, ММСА позволяют оценить и оптимизировать плодородие, выбрать ту модель, которая вполне реалистична, логически с агрономической точки зрения обоснована для практического понимания.

Поэтому цель работы — оценка плодородия и ее оптимизация с помощью кластерного, дискриминантного анализа и метода главных компонент. Задачи: оценка плодородия агросерой почвы, определение условий достоверного участия почвенных свойств в группировке информации по бонитету, установление вклада почвенных свойств и их оптимального сочетания для агросерой тяжелосуглинистой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена на основе данных агрохимического обследования и лабораторных анализов агросерой тяжелосуглинистой почвы, прове-

денных ГЦАС “Московский” в ЗАО “Макеево” Зарайского р-на Московской обл. в 2015 г. Согласно пояснительным запискам к агрохимическому обследованию почв, отдельно-обрабатываемые участки делили на элементарные участки площадью 5–8 га (на пашне).

Использовали метод бонитировки почв, разработанный Почвенным институтом им. В.В. Докучаева [18]. В этом методе составляют бонитировочные шкалы на основе почвенных свойств. Использовали подвижную форму фосфора (P_2O_5), обменную форму калия (K_2O), содержание гумуса, кислотность в солевой вытяжке (pH_{KCl}), гидролитическую кислотность (H_T), обменные формы кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}). Далее в эту шкалу вносили поправки с учетом средней урожайности культур.

С каждого элементарного участка отбирали один смешанный почвенный образец, который состоял из 20–45 индивидуальных проб. В смешанных почвенных образцах определяли: содержание подвижного фосфора (P_2O_5) и обменного калия (K_2O) по Кирсанову (ГОСТ 26204-91), кислотность в солевой вытяжке (pH_{KCl}) (ГОСТ 26483-85), гидролитическую кислотность (H_T) – по Каппену, содержание органического вещества (гумус) – по Тюрину (ГОСТ 26213-91). Обменные формы кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}) определяли атомно-адсорбционным методом (ГОСТ 26487-85). Степень насыщенности почвы основаниями (V , %) определяли расчетным путем. Объем проанализированной выборки составил 224 образца.

Статистические анализы выполнены с помощью программного продукта STATISTICA 10. Кластерный анализ (метод k -средних) позволяет решать как минимум 2 задачи: выделить группы с разными величинами показателей плодородия и оценить его степень пространственной дифференциации. Для проверки эффективности результатов кластеризации–выявления и по возможности устранения неправильных классификаций, определения вклада почвенных свойств использовали ДА. Принималось условие, что только участие всех почвенных показателей в дискриминации может служить признаком качественной классификации. Дискриминантный анализ позволил скорректировать исходный массив данных таким образом, чтобы найти максимальное число удачных соотношений между ними. Проверяли их при помощи МГК. Условием для проявления структурного единства почвенных свойств является выделение первых 2-х главных компонент с максимальной информацией о

почвенных свойствах и их равносильном вкладе. Эффективность модели определяли по остаточным корреляциям. Полагаем, что условиями комплексности плодородия являются: сохранение всех почвенных переменных, даже если программа указывает на целесообразность проведения редукции данных, в максимальной степени одинаковый вклад (вес) всех почвенных показателей в дискриминацию и извлечение главных компонент с высокими факторными нагрузками (не менее 0.7 ед. по модулю) и максимальной долей дисперсии, величины остаточных корреляций после извлечения факторов, приближающиеся к нулю.

Полагаем, что предложенный подход подходит только для случаев, когда выборка почвенных показателей характеризуется широким пространственным разбросом данных. Это является плохим признаком плодородия почвы в хозяйстве. Судя по данным табл. 1, подобная ситуация сложилась в ЗАО “Макеево”. Не исключено, что схожие условия имеют место и в других хозяйствах. Это распространенное явление в агрохолдингах. Возникает вопрос оптимизации почвенного плодородия. Полагаем, что МГК, наряду с другими [17], может служить оценочным критерием комплексности плодородия и самой процедуры его оптимизации. Следует признать, что МГК не изучает взаимосвязи как таковые. Для этого существуют другие известные методы статистического анализа. Здесь мы следовали следующей идее: можно представить почвенные параметры в структурном единстве, т.е. как единое целое – фактор. Насколько они представлены в этом факторе – само участие и вклады можно изучить с помощью МГК. Структурное единство почвенных свойств выполняется при условии, что все без исключения почвенные параметры должны сосредотачиваться в первых 2-х компонентах, т.к. они наиболее информативны (наибольшая информация о плодородии). Это возможно при условии, что параметры взаимосвязаны между собой в разрезе не меньше средних уровней каждого из них, согласно [15]. Сами по себе эти взаимосвязи, линейные корреляции (МГК основан на них) не случайны, а являются логичными, т.к. их проявление связано с организующей ролью антропогенного фактора, если он направлен на улучшение всего комплекса почвенного плодородия, а не отдельных показателей. В противном случае корреляционную матрицу необходимо изучать на предмет проявления случайных эффектов. Необходимо было получить эти взаимосвязи, установить причины, чтобы затем вывести оптимальные ориентировочные параметры для агросерой тя-

Таблица 1. Описательная статистика исходного массива данных

Параметр	X_{cp}	Me	X_{min}	X_{max}	S	$K_v, \%$	$S_{x_{cp}}$
pH _{KCl}	5.3	5.3	4.3	6.1	0.37	7.0	0.02
H_T , мгэкв/100 г	2.1	2.0	0.5	5.8	0.75	36.2	0.05
P_2O_5 , мг/кг	240	209	77.0	1097	135	56.2	9.02
K_2O , мг/кг	145	135	65.0	440	58.2	40.2	3.89
Гумус, %	2.7	2.7	1.2	6.5	0.82	30.2	0.05
Ca^{2+} , мгэкв/100 г	12.3	12.4	8.9	18.0	1.60	13.0	0.11
Mg^{2+} , мгэкв/100 г	4.2	2.9	1.9	13.0	3.06	73.3	0.20
$V, \%$	88.6	88.9	73.3	97.7	4.11	4.6	0.27
Бонитет, ед.	87.9	90.0	54.7	99.8	—	—	—

Примечание. X_{cp} – среднее, Me – медиана, X_{min} и X_{max} – минимальная и максимальная величина, S – стандартное отклонение, K_v – коэффициент вариации, $S_{x_{cp}}$ – стандартная ошибка среднего. То же в табл. 5.

желосуглинистой почвы. Отсюда и интерпретация оценки оптимизации плодородия для конкретного случая – результата агрохимического обследования агросерой почвы в конкретном хозяйстве, когда необходимо было исполнить несколько этапов корректировки исходного массива данных. Для начала проверить выборку на нормальное распределение методом Шапиро–Уилкса. Далее с помощью графиков распределения с нормальной подгонкой (зависимость ожидаемой нормальной величины от эмпирической) установить “хвосты”, связанные с очень высоким содержанием фосфора и калия, чтобы они не маскировали вклады других параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены данные описательной статистики, с которыми достоверно коррелирует бонитет. Обращает внимание сильное различие между минимальными (X_{min}) и максимальными величинами (X_{max}) содержания P_2O_5 и K_2O с коэффициентами вариации (K_v) 56 и 40% соответственно. Отмечали существенное превышение среднего (X_{cp}) содержания P_2O_5 своей медианы (Me) на 31 мг/кг, для содержания калия разница составила 11 мг/кг. В 55% случаев для P_2O_5 и в 34% случаев для содержания K_2O обеспеченность агросерой почвы была высокой и очень высокой, что обусловлено интенсивным применением минеральных удобрений в агрохолдинге. Это частный случай, хотя, например, в юго-западной части Центрально-Черноземного района России средний уровень внесения минеральных удобрений превысил 100 кг/га, установлены максимальные за всю историю наблюдений величины сред-

невзвешенного содержания подвижных форм фосфора и калия [19].

Величины остальных показателей вписывались в типичный для данной почвы интервал. Таким образом, статистическая обработка проведена для конкретного случая, для условия интенсивного применения фосфорных и калийных удобрений. Например, содержание P_2O_5 в 15% случаев превышало 290 мг/кг, в большинстве случаев (90%) содержание K_2O было сопряжено с ним (в тех же самых образцах) и в 10% случаев содержание K_2O превышало 200 мг/кг. По этой причине расчетные величины бонитета оказались необоснованно завышенными: в 49% случаях они находились в диапазоне от 90 до 100 ед. Это не отражало объективную оценку плодородия. При таких высоких показателях бонитета содержание гумуса в 69% случаев было меньше 3%. Согласно разработанным моделям плодородия для агросерой тяжелосуглинистой почвы [15, 20], содержание гумуса <3% не соответствует среднему уровню плодородия. При разделении массива данных по варианту 1 средний показатель бонитета для первой группы составил 80 ед., второй – 95 ед. (табл. 2). В этом случае достоверные различия между группами установлены по величине pH_{KCl}, содержанию P_2O_5 , K_2O и гумуса. С агрохимической, экологической и экономической точки зрения поддерживать в почве высокие показатели содержания P_2O_5 и K_2O нецелесообразно. Со статистической точки зрения их можно отнести к “хвостам”. Из-за них проверка показала отсутствие нормального распределения данных. Поэтому возникла необходимость исключить из статистической обработки высокие показатели содержания P_2O_5 и K_2O – более 290 и 200 мг/кг

Таблица 2. Средние величины почвенных показателей по группам и кластерам

Группа/ кластер	pH _{KCl}	H _T	P ₂ O ₅	K ₂ O	Гумус	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V	Бонитет
Вариант 1									
1	5.1	2.1	185	115	2.6	12.3	4.1	88.4	80
2	5.4	2.1	286	170	2.9	12.4	4.2	88.8	95
Вариант 2									
1	5.1	2.2	146	114	2.7	12.2	4.2	88.0	81
2	5.3	1.9	230	148	2.7	12.1	4.8	89.6	91
Вариант 3									
1	5.1	2.3	210	129	2.4	12.5	3.7	87.6	83
2	5.4	1.7	278	164	3.2	12.1	4.7	89.8	93
Вариант 4									
1	5.0	2.4	160	113	2.4	12.1	4.1	86.7	73
2	5.2	2.2	230	137	2.5	12.5	3.7	88.0	86
3	5.4	1.9	278	165	3.1	12.1	4.8	89.9	95
Вариант 5									
1	4.8	3.4	122	119	2.4	12.1	2.8	81.7	73
2	5.2	2.1	191	130	2.5	12.3	3.7	88.2	86
3	5.5	1.8	233	174	3.3	12.3	5.2	90.5	95

Примечание. Единицы измерения почвенных показателей соответствуют табл. 1.

соответственно и провести КА – разделение бонитетов по варианту 2. В этом случае достоверность различий между группами отмечена и для остальных показателей, за исключением содержания гумуса. При высокой величине K_y (30.2%) это указывает на то, что для нашего случая не сложилась такая комбинация между почвенными свойствами, при которой вклад гумуса в разделение бонитетов мог бы проявиться.

Проверка на достоверность различий между группами (F -критерий) для каждого показателя показала, что если за основу взять данные бонитета, то роль показателей, характеризующих состояние почвенно-поглощающего комплекса (H_T , Mg^{2+} , V), оказалась не установленной (недостоверные различия). Если за основу принять группировку на основе кластеров, то нивелируется значение гумуса. Поэтому далее была проведена корректировка кластеров: кластер 1 (бонитет <90 ед.) менялся на кластер 2 (бонитет >90 ед.), если содержание гумуса превышало 3% (вариант 3). В этом случае за исключением содержания Ca^{2+} ($p = 0.08$) различия между почвенными показателями были достоверными. При величине бонитета 83 ед. (корректированный кластер 1) и 93 ед. (корректированный кластер 2) достоверные различия по величинам pH_{KCl} и H_T составили 3 мг-экв/100 г и 0.6 ед. соответственно,

по содержаниям P₂O₅ – 68 мг/кг, K₂O – 35 мг/кг, гумуса – 0.8%, Mg^{2+} – 1 мгэкв/100 г, V – 2.2%.

Можно принять другой вариант (вариант 4) – выделить дополнительно 3-ю группу на основе варианта 3. В этом случае достоверное различие бонитета между 1-й и 3-й группой становится еще более существенной – 22 ед., что обусловлено увеличением разницы содержания P₂O₅ (118 мг/кг) и K₂O (52 мг/кг) (табл. 2).

МГК направлен не только на редукцию данных без потери ценной информации, но и на изучение взаимосвязей между величинами переменных (в нашем случае почвенных свойств). В отношении почвенных свойств это особенно важно, т.к. все они являются структурными элементами плодородия, поэтому исключение какого-либо из них неприемлемо. При рассмотрении первой главной компоненты, на долю которой приходится 37% всей дисперсии, оказалось, что наиболее различающимися группами в варианте 4 были первая (бонитет = 73) с коэффициентом собственного вектора (КСВ) 0.75 и третья (бонитет = 95), = -0.43 (табл. 3). Наибольший вклад в формирование различий в зависимости от этой компоненты вносят V и H_T (КСВ = 0.91, вклад по 37%), далее pH_{KCl} (КСВ = -0.63, вклад – 17%) и P₂O₅ (КСВ = -0.37, вклад – 6%) (табл. 4). Вторая главная компонента описывает ≈26% информа-

Таблица 3. Коэффициенты собственного вектора (КСВ) при разделении на группы

При группировке по варианту 4	Компонент 1	Компонент 2	Компонент 3	Компонент 4
1	0.75	-0.88	0.28	0.18
2	0.16	-0.14	0.32	0.03
3	-0.43	0.45	-0.42	-0.10

Таблица 4. Характеристика компонент после оптимизации

Компонента	Собственное число	% общей вариации	Коэффициент собственного вектора для почвенных свойств/вклад, %					
			pH _{KCl}	H _г , мгЭКВ/100 г	K ₂ O, мг/кг	Гумус, %	P ₂ O ₅ , мг/кг	V, %
Вариант 4								
1	2.22	37	-0.63/17	0.91/37	0.08/0	0.08/0	-0.37/6	-0.91/37
2	1.58	26	0.42/11	0.27/5	0.83/44	0.15/1	0.74/35	-0.24/4
3	1.03	17	0.16/2	0.08/1	-0.12/1	-0.96/90	0.15/2	-0.18/3
4	0.60	10	-0.61/62	-0.19/6	0.33/18	-0.17/5	0.13/3	0.18/5
Вариант 5								
1	4.32	72	-0.93/20	0.85/20	-0.75/10	-0.85/20	-0.84/20	0.87/20
2	0.81	13	0.4/0	-0.40/20	-0.60/40	-0.37/20	0.05/0	0.40/20
3	0.46	8	-0.18/10	-0.28/20	0.03/0	0.29/20	-0.51/60	0.11/0
4	0.21	4	-0.26/30	-0.07/0	0.27/30	-0.23/20	0.05/0	0.15/10

ции для группировки. По ней максимальные различия между 1-й и 3-й группами обусловлены содержанием элементов питания (КСВ = 0.74–0.83), вклад 35–44%. Роль гумуса отражена в 3-й компоненте, объясняющей 17% всей дисперсии. При КСВ = 0.96, вклад органического вещества составляет 90%. Наибольший вклад (62%) величины pH_{KCl} установлен для 4-й компоненты с долей дисперсий всего 10%. Таким образом, можно предположить, что некоторые показатели оказались недоучтенными.

Итак, если бы все почвенные параметры достоверно разделяли бонитет на 3 группы с показателями 73, 86 и 95 ед., то на первые 2 компоненты приходилось всего 63% дисперсии. Это мало. При этом отмечен разброс данных по компонентам с невысокой дисперсией. Например, высокий вклад гумуса 90% отражается в компоненте с общей вариацией всего 17%. По-видимому, роль гумуса недооценена. Аналогичную закономерность выявили и для показателей pH_{KCl} и содержания K₂O. Возникла необходимость в сжатии информации (вариант 5 оптимизации). Для этого были рассчитаны прогнозные величины почвенных

параметров на основе их зависимости от КСВ 3-х факторов – F₁, F₂, F₃ (компонент). Уравнения регрессии имеют следующий вид (p < 0.01):

$$\text{pH}_{\text{KCl}} \quad Y = 5 + 0.3F_1 - 0.01F_2 + 0.14F_3,$$

$$H_{\text{г}} \quad Y = 2 - 0.4F_1 + 0.2F_2 + 0.4F_3,$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 \quad Y = 176 + 15F_1 + 13F_2 - 9F_3,$$

$$\text{K}_2\text{O} \quad Y = 135 + 15F_1 + 21F_2 - 1.6F_3,$$

$$\text{Гумус} \quad Y = 2.9 + 0.5F_1 + 0.01F_2 + 0.5F_3,$$

$$V \quad Y = 90 + 3F_1 - 1.3F_2 - 0.8F_3.$$

Описательная статистика прогнозных величин почвенных показателей приведена в табл. 5. По сравнению с исходными данными (табл. 1), скорректированный массив почвенных показателей стал более выровненным, т.к. величины K_y снизились для всех показателей. Качество классификации почвенных свойств определяли с помощью дискриминантного анализа (ДА).

По отмеченным в табл. 6 параметрам корректировка групп на основе регрессионных зависимостей (вариант 5) еще в некоторой степени улучшила результат классификации почвенных

Таблица 5. Описательная статистика после окончательной оптимизации плодородия почвы (вариант 5)

Параметр	X_{cp}	Me	X_{min}	X_{max}	S	$K_v, \%$	$S_{x_{\text{cp}}}$
pH _{KCl}	5.5	5.6	4.6	6.7	0.4	6.7	0.03
H_T , мгэкв/100 г	2.0	1.9	0.7	5.5	0.6	29.1	0.04
P ₂ O ₅ , мг/кг	176	174	124	252	22	12.0	1.5
K ₂ O, мг/кг	135	131	93	229	26	19.0	1.8
Гумус, %	2.9	2.8	1.6	5.7	0.7	23.6	0.05
$V, \%$	90.4	91.4	72.3	96.7	3.4	3.8	0.24

Таблица 6. Некоторые параметры дискриминантного анализа при группировке

Группировка	Общая лямбда Уилкса	F -критерий	R^*	Доля случаев верной классификации, %
По варианту 4	0.48	19	0.7/0.2	72
По варианту 5	0.20	44	0.9/0.4	95

Примечание. Над чертой – по первой компоненте, под чертой – по второй компоненте.

свойств – 95% против 72% (вариант 4). Это видно по величине общей лямбды Уилкса (чем ближе она к нулю, тем больше вклад почвенных свойств в разделение на группы), F -критерию (отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой), поэтому чем больше F , тем лучше, а также по каноническому коэффициенту корреляции – R . При этом в варианте 4 для 2-й компоненты величина R была незначительной.

Вариант 5 оптимизации основывается на предположении, что если между почвенными параметрами имеются скрытые (но не случайные) линейные комбинации, то уже явно они проявятся в первых двух компонентах после повторного использования МГК. Как видно из табл. 5, в варианте 5 оптимизации в первой главной компоненте величины КСВ (или нагрузки) стали для всех показателей более равными (0.75–0.87 ед. по модулю), факторные нагрузки оказались сильными, т.к. превышали 0.7 ед. На этом фоне по сравнению с вариантом 4 оптимизации вклад первой компоненты в общую дисперсию увеличился в 2 раза и составил 72%, а в сумме со второй – 85%. Результаты классификации можно интерпретировать следующим образом: при тех прогнозных параметрах описательной статистики, которые показаны в табл. 5, почвенные показатели стали более структурированы, представляли единое целое, с общим вкладом в формирование плодородия 90% (табл. 4).

Итак, группировка варианта 1 была сделана на основе исходной информации агрохимического обследования почв. Она не может объективно оценить комплексность плодородия почвы, т.к.

некоторые показатели (например, содержание гумуса) при относительно высоких величинах K_v оказались исключенными из ДА вследствие незначительного участия по уровню значимости. При использовании МГК показатели с высокими факторными нагрузками оказались в наименее информативных компонентах. При допущении, что компоненты извлекают почвенные свойства, значит, все они с точки зрения оценки комплексности плодородия должны одновременно сосредоточиться в тех компонентах, которые несут максимальную информацию – информацию о плодородии.

Оптимизация состояния почвенного плодородия установила необходимость снижения показателя H_T на 0.2–0.3 мгэкв/100 г до 1.7–1.9 мгэкв/100 г, увеличения содержания гумуса на 0.3–0.4% до 3.0–3.4%. Для других показателей данные приведены в табл. 7.

Следует признать правоту научных подходов к оценке плодородия, которые предлагают учитывать не только агрохимические показатели, но и агрофизические, биологические и т.п. [7]. Тем не менее, данный вопрос, по-видимому, необходимо начинать решать в агрономической службе хозяйства с агрохимического блока информации о почве и на его основе постепенно вводить в модели другие сведения, в том числе о биоклиматическом потенциале территории и т.п. Это сделает более упрощенной понимание процедуры статистической обработки и интерпретацию полученных результатов.

Таблица 7. Доверительные интервалы почвенных показателей

Группа	pH _{KCl}	H _T	P ₂ O ₅	K ₂ O	Гумус	Mg ²⁺	V	Бонитет
Вариант 1								
1	5.1–5.2	1.9–2.3	169–201	108–122	2.4–2.7	3.5–4.7	87–89	78–81
2	5.3–5.4	1.9–2.2	259–313	159–181	2.7–3.0	3.7–4.8	88–89	94–95
Вариант 5								
1	4.6–4.9	2.7–4.0	108–136	96–141	2.0–2.8	2.6–3.1	79–85	68–77
2	5.1–5.1	2.0–2.2	182–199	124–137	2.3–2.6	3.3–4.2	88–89	84–87
3	5.5–5.6	1.7–1.9	220–240	158–192	3.0–3.4	4.4–6.0	90–91	93–96

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для более детальной и качественной комплексной оценки состояния почвенного плодородия в хозяйстве недостаточно агрономической службой оперировать только описательной статистикой. Информация о ней может выдать неточное представление о плодородии. Данное предположение исходит из результатов анализа методами многомерной статистики, когда показано, что не все почвенные показатели достоверно классифицируются или их вклады контрастируют между собой по весу. Поэтому задачи комплексной оценки плодородия не выполняются. Так случилось в нашем случае после статистической обработки результатов агрохимического обследования в хозяйстве. Предложена поэтапная корректировка группировки бонитета, сначала выполненная на основе медианы, затем методами многомерного статистического анализа, при которых были достигнуты достоверная классификация вовлеченных в оценку агрохимических почвенных свойств и одинаковый по весу их вклад в дискриминацию. После этого предложено оптимальное сочетание величин показателей при интенсивном применении минеральных удобрений и бонитете не меньше 93 ед.: солевая кислотность должна лежать в пределах 5.5–5.6 ед., гидролитическая кислотность – 1.7–1.9 мгэкв/100 г, содержание подвижного фосфора – 220–240 мг/кг, обменного калия – 158–192 мг/кг, гумуса – 3.0–3.4%, степень насыщенности почв основаниями – 90–91%.

Следует признать, что некоторые результаты наших исследований, являются дискуссионными. Смысл предложенного подхода состоит в том, чтобы не только провести оценку почвенного плодородия в соответствии с классическими представлениями о многомерной статистике, но и использовать ее в качестве инструмента поиска варианта почвенного плодородия, в котором его показатели представляли бы структурную, единую общность с близкими вкладами в его формирование.

Авторы выражают признательность директору ЗАО “Макеево” Сенченкову Евгению Викторовичу за предоставление развернутых данных агрохимического обследования полей в хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Державин Л.М., Фрид А.С. Научно-методические принципы комплексного мониторинга плодородия земель сельскохозяйственного назначения // Агрохимия. 2012. № 2. С. 3–11.
2. Державин Л.М., Фрид А.С. Модели комплексной оценки плодородия пахотных земель // Агрохимия. 2002. № 8. С. 5–13.
3. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13.
4. Савич К.В., Мельник Н.Н., Карауш П.Ю., Саидов А.К. Оценка земель // Плодородие. 2010. № 1 (52). С. 38–39.
5. Седых В.А., Байбеков Р.Ф., Савич К.В., Доронкина Т.В. Интегральная оценка бонитета почв сельскохозяйственных угодий // Земледелие. 2018. № 6. С. 18–20.
6. Апарин Б.Ф. Эволюционные модели плодородия почв. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 292 с.
7. Державин Л.М., Фрид А.С. О комплексной оценке плодородия пахотных земель // Агрохимия. 2001. № 9. С. 5–12.
8. Федоров Б.А. Построение многофакторных регрессионных моделей для оценки свойств торфяной залежи и торфа методом главных компонент // Вестн. Твер. ГТУ. 2007. № 12. С. 148–150.
9. Mandal U.K., Warrington D.N., Bhardwaj A.K., Bar-Tal A., Kautsky L., Minz D., Levy G.J. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis // Geoderma. 2008. V. 144. P. 189–197.
10. Гиниятуллин К.Г., Валева А.А., Смирнова Е.В. Использование кластерного и дискриминантного анализов для диагностики литологической неоднородности почвообразующей породы по гранулометрическому составу // Почвоведение. 2017. № 8. С. 946–953.
11. Sena M.M., Frighetto R.T.S., Valarini P.J., Tokeshi H., Poppi R.J. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis:

- a multivariate analysis case study // Soil Till. Res. 2002. V. 2. P. 171–181.
12. Рожков В.А. Классификация почв — не место для дискуссий // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. Вып. 72. С. 47–64.
 13. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С. Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1093–1100.
 14. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В., Аврора А.Ф. Формализованный анализ гумусного состояния горных торфяных почв на уровне высотных поясов // Почвоведение. 2019. № 8. С. 923–934.
 15. Фрид А.С., Кузнецова И.В., Королева И.Е. Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 174 с.
 16. Фрид А.С. Обеспеченность территории России региональными информационными моделями плодородия // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2007. № 60. С. 56–70.
 17. Фрид А.С. Обоснование методических подходов к анализу данных многолетних полевых опытов // Агрохимия. 2013. № 10. С. 75–96.
 18. Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н., Карманов И.И., Ефремов В.В. Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв. М.: Агропромиздат, 1991. 304 с.
 19. Лукин С.В. Мониторинг плодородия пахотных почв юго-западной части центрально-черноземного района России // Агрохимия. 2021. № 3. С. 3–14.
 20. Ильина Л.В. Комплексное воспроизводство плодородия серых лесных почв и его эффективность. Рязань: Узоречье, 1997. 231 с.

Assessment and Optimization of Agricultural Gray Soil Fertility by Methods of Multidimensional Statistical Analysis

R. N. Ushakov^{a,#}, T. Y. Ushakov^a, A.V. Ruchkin^a,
K. V. Abdulazyanov^a, and F. Y. Bobrakov^b

^aRyazan State Agrotechnological University
ul. Kostycheva 1, Ryazan 390044, Russia

^bS.A. Yesenin Ryazan State University
ul. Svobody 46, Ryazan 390000, Russia

[#]E-mail: r.ushakov1971@mail.ru

Soil fertility and its optimization were evaluated using cluster analysis (CA), discriminant analysis (DA) and the principal component method (PCM). The work was carried out based on the materials of the agrochemical survey of the agro-gray soil in CJSC “Makeevo” of the Zaraisk district of the Moscow region, carried out by the Agrochemical Service “Moskovsky”. The salt (pH_{KCl}) and hydrolytic acidity (N_a), mobile forms of phosphorus (P_2O_5) and exchangeable potassium (K_2O), humus, exchangeable calcium (Ca^{2+}) and magnesium (Mg^{2+}), the degree of saturation with bases (V) in accordance with the bonitet were determined. The sample size is 224. According to the median, the data array was divided by bonus into group 1 — bonus <90 units, group 2 — >90 units. In this case, the indicators of Ng , Ca^{2+} , Mg^{2+} did not explain the reliability of the differences between the bonuses. When using cluster analysis, pH_{KCl} and humus content dropped out. The reason is the lack of optimal ratios between indicators. The clusters were adjusted and the indicator of P_2O_5 content >290 mg/kg was excluded and group 1 was replaced by group 2 with humus content >3%. All indicators had a significant impact on the differences between group (cluster) 1 (43 units) and group 2 (53 units). The PCM indicator made it possible to determine the contribution of each soil indicator in the division into groups. In the first component (37% of the total variance), the greatest contribution to the formation of differences in bonuses was made by indicators V , N_a (contribution 37%). In the second main component (26%), the differences were caused by batteries (35–44% contribution). The contribution of humus (90%) is reflected in the third component (17% of the total dispersion). These methods of analysis allowed us to identify conditions under which the participation of soil indicators was reliable and even in terms of contribution. Only in this case a comprehensive assessment of fertility was achieved. Optimal fertility parameters in this case with a high bonus index were achieved at pH_{KCl} 5.5–5.6 units, N_a — 1.7–1.9 mgcev/100 g, P_2O_5 — 225–240 mg/kg, K_2O — 158–192 mg/kg, humus content — 3.0–3.4%, Mg^{2+} — 4.4–6.0 mgcev/100 g, V — 90–91%.

Key words: fertility assessment, agro-gray soil, bonus, cluster analysis, discriminant analysis, principal component method.

УДК 631.81:631.58:631.417.1

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ И СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА СЕКВЕСТРАЦИЮ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ¹

© 2022 г. В. Н. Кудеяров^{1,2,*}

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

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии РАН
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, 5, Россия

*E-mail: vnikolaevich2001@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2022 г.

После доработки 05.09.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

С позиций оценки круговорота и баланса углерода принципиальное значение имеет соотношение стоков и эмиссии CO₂, поскольку именно соотношение этих двух главных составляющих баланса определяет уровень секвестрации углерода почвами. Накопление остаточного органического углерода в почве в результате приемов, связанных с внесением различных органических (навоза, компостов) и минеральных удобрений, мелиоративных материалов (известки, биоугля и др.), а также выращивания покровных культур, сидератов и минимальной обработки почв имеют свои особенности и при строгом рассмотрении не всегда подходят под определение “секвестрация”. Для оценки уровня секвестрации углерода в почвах необходимо определение баланса между гетеротрофным дыханием (R_h) и величиной нового почвенного стока органического углерода (C_{org}) в устойчивой к минерализации форме. Сток углерода в чистую экосистемную продукцию (NEP) определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода, а переход органического углерода из NEP в пул чистой биомной продукции (NBP) сопровождается потерей углерода в результате R_h и эмиссии CO₂ в атмосферу.

Ключевые слова: круговорот и баланс углерода, почвенный органический углерод, “секвестрация”, гетеротрофное дыхание, чистая экосистемная и биомная продукция.

DOI: 10.31857/S0002188122120092

ВВЕДЕНИЕ

С позиций оценки круговорота и баланса углерода принципиальное значение имеет соотношение стоков и эмиссии CO₂, поскольку именно соотношение этих двух главных составляющих баланса определяет изменение атмосферной концентрации CO₂, которая неуклонно возрастает и усиливает парниковый эффект, приводящий к изменению глобального климата. Международное сообщество стремится ограничить темпы роста эмиссии парниковых газов, чтобы не допустить потепление климата к концу 21-го века не более чем на 2°C (Парижское соглашение). Сельскохозяйственное производство так же, как и промышленность, вносит свой вклад в повышение концентрации парниковых газов в атмосфере. Вид землепользования может как увеличивать эмиссию CO₂ в атмосферу, так и дополнительно абсорби-

ровать из нее углерод (секвестрация) и переводить его в почвенный гумус с длительными временами пребывания углерода.

Для разрешения проблемы секвестрации CO₂ взоры обращаются прежде всего на возможность увеличения абсорбции углекислоты почвенно-растительными экосистемами, поскольку почва является основным хранилищем углерода, и ей принадлежит главная роль в секвестрации CO₂ атмосферы.

Уровень секвестрации углерода в почвах может быть оценен по отношению гетеротрофного дыхания почв к общему количеству чистой продукции фотосинтеза. Другими словами, секвестрация углерода определяется минерализационным потенциалом почв, который в свою очередь зависит от уровня чистой первичной продукции (NPP), чистой экосистемной продукции (NEP) и определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода, а переход органического угле-

¹ Работа выполнена в соответствии с госзаданием 122040500037-6.

рода из NEP в пул чистой биомной продукции (NBP) зависит от почвенно-экологических, климатических, временных и других факторов. Пополнение пула органического углерода в почве происходит за счет NPP и NEP , которые представляют собой наземные растительные остатки и корни, а также органические удобрения.

Уровень секвестрации углерода в почвах может быть оценен по отношению гетеротрофного дыхания почв к общему количеству чистой продукции фотосинтеза. Другими словами, секвестрация углерода определяется минерализационным потенциалом почв, который в свою очередь зависит от уровня NPP , NEP , почвенно-экологических, климатических, временных и других факторов. В работе Ханкина с соавторами [1] проанализировано 10 моделей, описывающих вековое изменение (1901–2010 гг.) соотношений запасов почвенного органического вещества, NPP и величины гетеротрофного дыхания (R_h). За 100-летний период среднее отношение величин $R_h : NPP$ составило ≈ 0.9 . Тесную связь между NPP и R_h отмечали и другие исследователи [2, 3].

Несмотря на рост концентрации CO_2 в атмосфере и выпадений азотосодержащих соединений, способствующих улучшению азотного питания растений, все модели согласованно показали, что изменение климата и землепользования оказывали отрицательное влияние на запасы C_{org} в почвах. Этот факт свидетельствует в целом о возросшем минерализационном потенциале почв в мировом масштабе. Весь ансамбль моделей показал, что среднее время пребывания углерода (MRT) в пулах почвенного органического вещества за прошлое столетие уменьшилось на 4.4 года.

Приведенные выше данные свидетельствуют, что современная ситуация в мире, очевидно, не способствует перелому тренда изменения накопления C_{org} в почвах, поскольку с потеплением климата усиливаются азото- и углеродо-минерализационные процессы в почвах, дефляция, обезлесивание и опустынивание, что приводит к потерям гумуса и повышению эмиссии парниковых газов.

Взаимосвязь процессов превращения азот- и углеродсодержащих веществ в почвах неразрывно связаны между собой, но судьба конечных продуктов минерализации (CO_2 и минерального азота в виде NH_4^+ и NO_3^-) различается: CO_2 в основном улетучивается в атмосферу, а минеральный азот рециклирует, включается в новые процессы ассимиляции растениями и микроорганизмами.

Значительная часть азотосодержащего органического вещества подвергается гумификации. Для органического вещества подавляющего числа почв отношение $C : N$ довольно стабильно и находится в пределах 10.0–11.0 и мало изменяется в зависимости от основных физико-химических свойств (рис. 1) [4–11]. Эти показатели действительны для гумусовых горизонтов почв (0–25, 0–40 см). В более нижних горизонтах соотношение $C : N$ сужается за счет увеличения пропорции минерального азота в его общем пуле (в основном NH_4^+ , фиксированного глинистыми трехслойными минералами) [12–17]. Стабильная величина $C : N$ в почвах лишь подтверждает принципиально идентичные условия формирования природных гумусовых веществ (гуминовых и фульвокислот). В работах М.М. Кононовой [18] и Л.Н. Александровой [19] показано, что содержание азота в гуминовых и фульвокислотах мало различается между типами почв, но состав гумуса, в первую очередь, отношение гуминовых кислот к фульвокислотам зависит от типа почв и условий почвообразования. Устойчивость показателя $C : N$ гумуса для различных почв свидетельствует о механизме стехиометрии в почвенном органическом веществе, что подтверждается синхронностью высвобождения CO_2 и NH_4^+ при минерализации гумусовых веществ почв. Соотношение $C : N$ в гумусе можно рассматривать как матрицу устойчивости органического вещества в почве.

Органические материалы, поступающие в почвы, например растительные остатки, органические удобрения (навоз, компосты, сидераты) всегда имеют более широкое соотношение $C : N$, чем почвенный гумус. При разложении в почве вновь поступившего органического материала активизируется дыхательный процесс и возрастает эмиссия CO_2 в атмосферу, а образующиеся минеральные азотные соединения под воздействием микроорганизмов вступают в новый цикл с органическим углеродом, образуя соединения с более узким $C : N$, обычно свойственного данной почве. Насыщение почвы органическими материалами в целом ведет к повышению содержания органического вещества в почвах, но и его минерализация также ускоряется, а $C : N$ в гумусе почвы стремится к уровню, близкому до внесения удобрений. Об этом свидетельствуют данные многолетних полевых опытов с применением органических и минеральных удобрений [20–27].

Специфика биогеохимического круговорота углерода такова, что поступающее в почву органическое вещество растительного и животного происхождения быстро подвергается атаке поч-

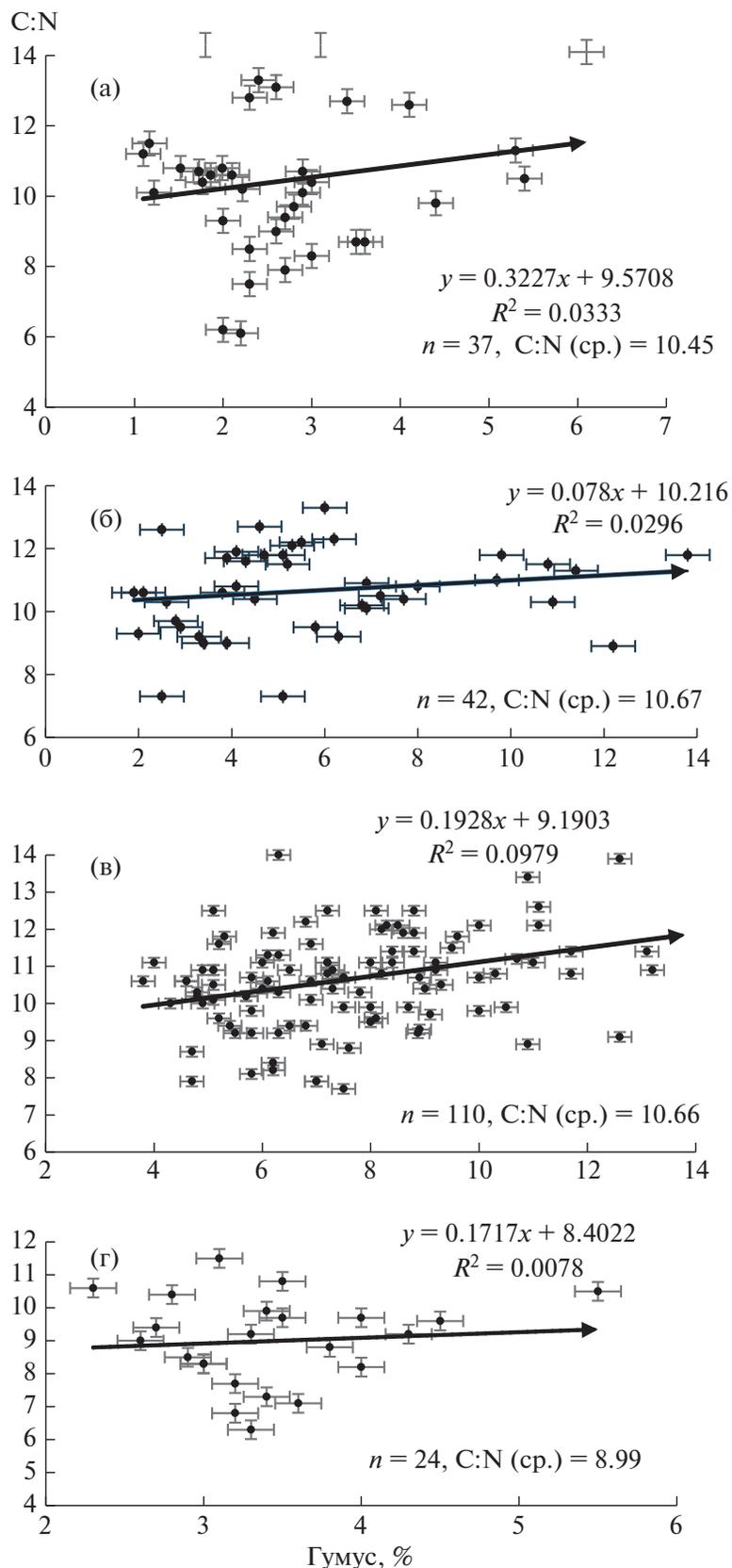


Рис. 1. Содержание в почвах гумуса и величина соотношения С : N в нем: (а) – дерново-подзолистые почвы, (б) – серые лесные почвы, (в) – черноземы, (г) – каштановые почвы. Выборка данных из монографии “Агрохимическая характеристика почв СССР”, тт. 1–4, 6, 9. Статистическая обработка автора.

венной биоты и включается в новые минерализационно-иммобилизационные циклы, которые могут повторяться в почве до 8–9 раз за сезон [28]. Процесс гумификации органических остатков в почве происходит с участием биоты, и потери CO_2 в результате дыхательного процесса продолжают непрерывно, даже в том случае, когда в почву не поступают свежие порции растительного материала. Например, в погребенных под курганами почвах микробиологическая активность продолжается, хотя и очень медленно [29, 30].

Устойчивый к разложению органический углерод является суммой гумусовых веществ или другими словами *NBP*, который с позиций секвестрации атмосферной CO_2 обладает наибольшей значимостью. Углерод *NBP*-пула отчуждается из биогеохимического цикла на сотни и даже тысячи лет. Поэтому сохранение и накопление в почвах углерода именно этого пула способствует секвестрации CO_2 и, как следствие, снижению потенциала глобального потепления (*ППП*) [31].

По массе пулы углерода в экосистемах распределяются в отношении *NPP* : *NEP* : *NBP* \approx 100 : 10 : 1. В результате в почве на длительное время (>100 лет) могут закрепиться устойчивые к разложению гумусовые вещества (примерно \approx 1%) от количества *NPP*-углерода, поступившего в почву с наземной и внутрипочвенной биомассой. Об этом свидетельствуют скорости роста мощности гумусового горизонта в процессе почвообразовательного процесса. Например, Иванов и Табанакова [30], используя метод археологического почвоведения, показали, что в черноземах Восточной Европы прирост гумусового горизонта за последние 4–5 тысяч лет оценивается в 1.0–3.5 см в столетие. Это эквивалентно образованию в почве устойчивого к разложению *NBP*, порядка 60–180 кг $\text{C}_{\text{орг}}$ /га/год. А текущее гетеротрофное дыхание (R_h) пахотных черноземных почв в среднем составляет 2–3 т $\text{C}-\text{CO}_2$ /га/год [32–35]. Для образования биомной продукции в размере 60–180 кг C /га/год требуется поступление в почву углерода биомассы (*NPP*) порядка 6–8 т/га/год. Анализ биопродуктивности современных степных экосистем показал, что *NBP* черноземов может составлять \approx 80 кг C /га/год [36].

Основная цель усиления секвестрации CO_2 состоит в том, чтобы максимально увеличить накопление в почвах устойчивого к минерализации пула органического углерода. В литературе широко освещаются приемы секвестрации CO_2 , заключающиеся в обогащении почв $\text{C}_{\text{орг}}$ при использовании различных удобрений и материалов (навоза, компостов, биоуголя и др.) и приемов

земледелия, способствующих большему поступлению в почвы растительных остатков и созданию условий замедления их минерализации [37–47]. Выращивание покровных культур, сидератов или смена вида землепользования (залесение, залужение и др.) также способствуют секвестрации CO_2 . Перечисленные мероприятия имеют свои особенности и не всегда при строгом рассмотрении подходят под определение “секвестрация”.

Как было отмечено выше, оценка секвестрации углерода в почвах может быть установлена по соотношению гетеротрофного дыхания почв к *NPP* [48]. Показатели увеличения содержания органического углерода в почве без учета затрат углерода *NPP*-пула на это повышение и потерь углерода за счет эмиссии CO_2 нельзя считать секвестрацией. В большинстве случаев баланс углерода в земледелии складывается отрицательно, поскольку основная часть получаемой *NPP* утилизируется и эмитирует в виде CO_2 в атмосферу. (рис. 2).

ВИДЫ СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

В данном разделе приведены примеры различных путей секвестрации углерода в почвах.

Применение навоза. Применение навоза в земледелии известно издревле, как способ пополнения в почвах запасов питательных веществ. Преимущество навоза перед другими видами удобрений состоит в том, что он является медленно действующим и не создает в почве единовременно высоких концентраций легкоподвижных соединений, прежде всего нитрат- и аммоний-содержащих солей. Отсюда положительное последствие навоза растягивается на годы.

На первый взгляд внесение в почву навоза должно приводить к секвестрации органического углерода. Действительно, систематическое применение навоза приводит к накоплению в почвах органического углерода, о чем свидетельствуют данные многолетних полевых опытов на различных почвах [20–27].

В настоящее время, когда остро ставится вопрос о “низкоуглеродном” развитии мирового сельскохозяйственного производства, накопленные в прошлом многолетние данные по изучению эффективности применения органических и минеральных удобрений приобретают новую актуальность. Изначальной целью этих опытов было сравнение эффективности органических и минеральных удобрений, а также воздействие этих удобрений на агрохимические свойства почв,



Рис. 2. Судьба углерода первичной продукции фотосинтеза в земледелии.

включая содержание гумуса, азота, фосфора, калия, кальция и др. Данные многолетних опытов также позволяют оценить конечные результаты с точки зрения секвестрации CO_2 атмосферы и ее размеры при удобрении навозом.

В книге А.Д. Хлыстовского [26] представлены материалы полевых опытов Долгопрудной агрохимической опытной станции (ДАОС НИУИФ) по сравнительному действию навоза и эквивалентной смеси минеральных удобрений. Опыты были заложены по инициативе академика Д.Н. Прянишникова на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в нескольких севооборотах с набором культур: озимая рожь (пшеница), картофель, овес, пар клеверный на фоне известкования и без него. Ротация севооборота состояла из 4-х полей. В течение 44 лет было проведено 11 ротаций. За каждую ротацию вносили навоз 36 т/га или в среднем 9 т навоза/га/год.

Прежде всего необходимо отметить, что в опытах происходило достоверное снижение содержания органического углерода и азота в почве в продолжении всего времени опыта не только в контроле, но и при внесении удобрений. Содержание органического вещества в почве в вариантах с внесением навоза тоже уменьшилось, но в меньшей степени, чем в контроле и при внесении минеральных удобрений. Отношение $\text{C} : \text{N}$ в гумусе почвы оставалось практически неизменным, и длительное внесение удобрений не сказалось на этом показателе (рис. 3). Это свидетельствовало о синхронном высвобождении CO_2 и минерального азота при минерализации гумуса. В табл. 1 приведен примерный баланс органического углерода за 44 года, составленный нами на основе данных

4-х полевых опытов [26], позволивший судить о возможной секвестрации углерода среднесрочного типа. Потери органического углерода из почвы — ничто иное как гетеротрофное дыхание и эмиссия CO_2 в атмосферу (рис. 4а). При внесении навоза по сравнению с контролем через 44 года потери $\text{C}_{\text{орг}}$ оказались равными 63.2 т/га (табл. 1), что значительно превышало количество $\text{C}_{\text{орг}}$, внесенного с навозом. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве навозного варианта за все годы эксперимента оставалось примерно на одном уровне. Данные показывают, что со временем при внесении каждой новой порции навоза минерализация и суммарные потери $\text{C}_{\text{орг}}$ увеличивались. Этот факт свидетельствует о продолжавшемся процессе гумификации, минерализации и потерях ранее внесенного с навозом $\text{C}_{\text{орг}}$ (рис. 4б). Кроме того, вновь поступающий в почву легко минерализуемый $\text{C}_{\text{орг}}$ мог вызвать затравочный эффект и усилить минерализацию $\text{C}_{\text{орг}}$ [45, 48]. Таким образом, за весь период проведения опыта внесение навоза не только не способствовало секвестрации углерода, но, возможно усиливало мобилизацию почвенного $\text{C}_{\text{орг}}$ и его потери.

Присутствующие в работе Хлыстовского данные продуктивности всех сельскохозяйственных культур в опытах за все годы, выраженные в зерновых единицах (з.е.), позволили рассчитать “углеродный след” полученной земледельческой продукции. Продуктивность в з.е. за 44-летний период составила в среднем (ц/га/год): контроль (без удобрений) — 14.2, применение навоза — 24.5. Деление потерь органического углерода почвы (т С/га) на зерновые единицы, выраженные также в т/га, дает величину затрат $\text{C}_{\text{орг}}$ на единицу

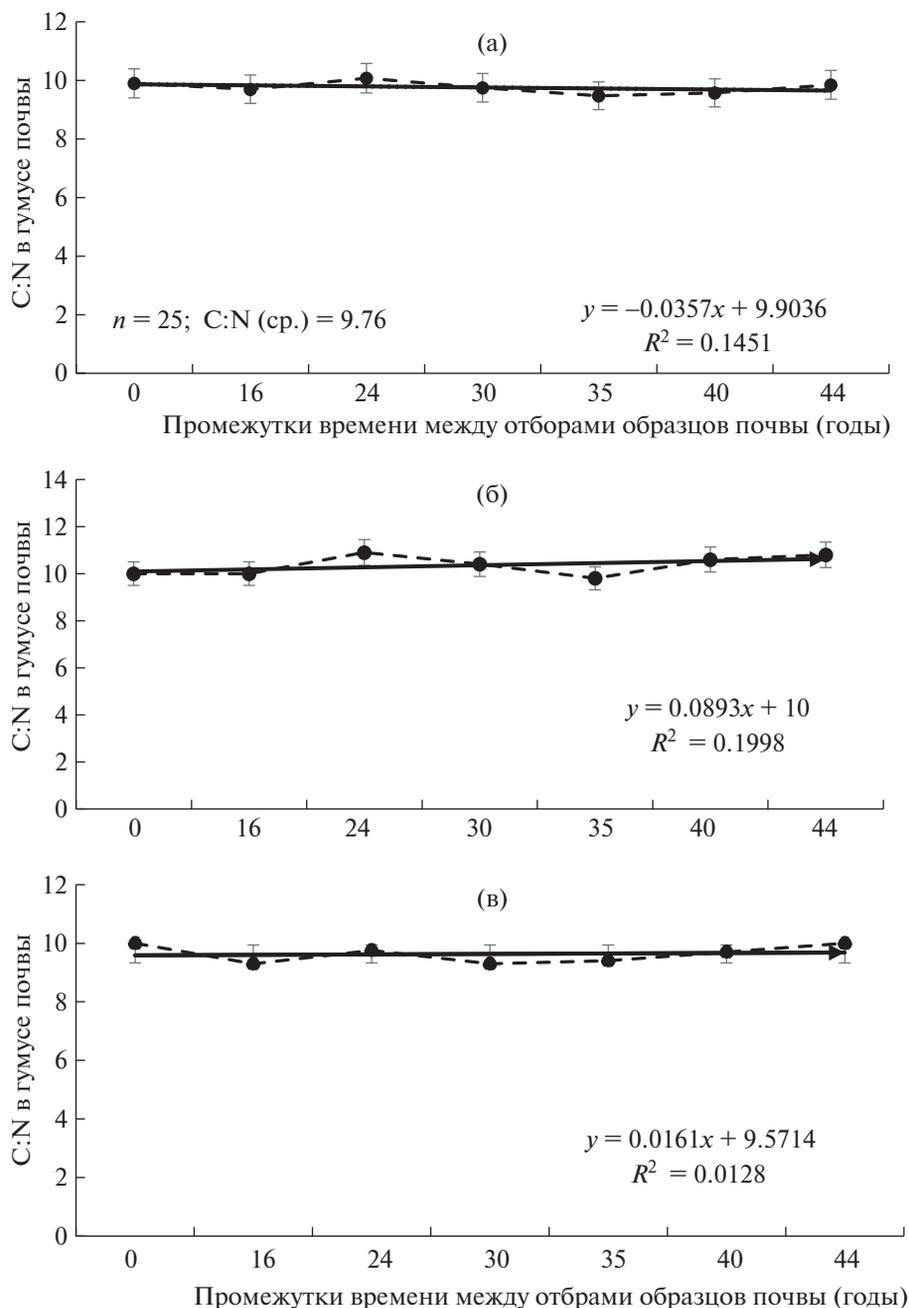


Рис. 3. Влияние органических (навоз) и минеральных удобрений на величину соотношения C : N в гумусе дерново-подзолистой почвы многолетних опытов ДАОС: (а) – контроль без удобрений, (б) – внесение навоза, (в) – смесь минеральных удобрений (NPK + Ca).

полученной продукции. С позиций современного языка это можно назвать “углеродным следом”, который оказался в контроле равен 0.9, в варианте применения навоза – 1.1 т $C_{орг}$ /т зерна.

Однако показанные выше затраты углерода на полученные урожаи далеко не полные. Не учтены энергетические затраты в углеродных единицах на обработку почвы, посев и уборку урожая. Должны быть учтены и затраты углерода кормов

(*NPP* и *NEP*), участвующих в формировании экскрементов животных и связанную с этим процессом эмиссию парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O), а также углерод использованной подстилки. Следует полагать, что затраты углерода на получение зерновой единицы основной продукции при удобрении навозом с учетом всех составляющих баланса будут значительно выше, чем те, что приведены выше.

Таблица 1. Примерный баланс* $C_{орг}$ в почве в слое 0–20 см за 44 года в опытах ДАОС

Вариант	Исходное содержание в почве	Внесено с удобрениями	Поступление*** с наземными и корневыми остатками	Всего: исходное + поступление	Содержание в почве через 44 года	Потери $C_{орг}$ за 44 года	
						всего	т/га/год
$C_{орг}$, т/га							
Контроль	31.8	0	46.2	78.0	21.3	56.7	1.29
Навоз	31.8	40.5**	74.6	146.9	27.0	119.9	2.73
Разность	0	40.5	28.4	68.9	5.7	63.2	1.44

*Представленные данные в таблице рассчитаны по данным 6-ти полевых опытов из монографии А.Д. Хлыстовского [26]. В баланс не были включены данные по утилизируемой продукции (зерно, клубни, корнеплоды свеклы, зеленая масса клевера, а также солома, которые вывозили с поля). Утилизируемая продукция представляла собой лишь часть *NPP*.

**Навоз содержал 20% сухого органического вещества. При переводе в $C_{орг}$ использовали коэффициент 0.45.

***О судьбе части *NPP*, представляющей собой наземные растительные остатки и корни, сведений в монографии нет. Восполнили этот пробел расчетными данными, выполненными на основе соответствующих коэффициентов продукции (методика Почвенного института, цит. из работы [49]).

В работе Л.К. Шевцовой и др. [37], в которой оценили структуры баланса углерода в длительных полевых опытах (27–35 лет) на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве, было показано, что суммарный приход в почву $C_{орг}$ (навоз, растительные наземные и корневые остатки) в вариантах навоз + *NPK* на фоне извести и без нее составлял в среднем 73.9 т С/га, а прирост $C_{орг}$ в почве составил 3.2 т/га. Расчетная эмиссия CO_2 из почвы оказалась равна 70.4 т С/га. Следовательно, на каждую тонну депонированного $C_{орг}$ из органических удобрений и растительных остатков эмитировало в атмосферу 23.1 т С- CO_2 /га.

Результаты опыта на темно-серой слабоподзоленной легкосуглинистой почве в Сумской обл., проводившемся в 1931–1957 гг. Н.Г. Городним [20], позволили рассчитать депонирование углерода навоза при его внесении в количествах 380, 640 и 1280 т/га за 27 лет. Потери углерода навоза на аккумуляцию 1 т $C_{орг}$ /га в почве в зависимости от доз удобрения оказались в пределах 3.36–7.27 т С/га. Чем больше была доза внесенной в почву органики, тем “дороже” становилась единица депонированного $C_{орг}$. Как и в Прянишниковском опыте повышение количества вносимого навоза увеличивало и относительный уровень потерь углерода за счет эмиссии CO_2 .

На слабовыщелоченном черноземе данные многолетнего опыта [23] позволили рассчитать величину депонированного углерода навоза, вносимого в 4-польном севообороте. По прошествии 12 лет в почву было внесено навоза 120 т/га в 4 приема, что соответствовало 11.9 т $C_{орг}$ /га/год. В почве (гор. 0–20 см) прирост содержания гумуса за 12 лет оказался равным 3.3 т $C_{орг}$ /га. Потери составили 8.6 т $C_{орг}$ /га или 72% от количества, внесенного с навозом.

Потери $C_{орг}$ на 1 т/га прироста содержания в почве углерода составили 3.6 т С/га.

В другом опыте, проведенном тоже на слабовыщелоченном легкосуглинистом черноземе [21], по результатам 20-летнего внесения органики (37.1 т $C_{орг}$ /га) потери органического углерода из почвы оцениваются в 28.8 т/га. Затраты углерода навоза на 1 т прироста $C_{орг}$ в почве оказались почти такими же (3.5 т/га), как и в опыте, упомянутом выше.

В опыте на высокогумусном черноземе бывшей Шатиловской опытной станции [22] за 45-летний период потери углерода навоза на 1 т $C_{орг}$ в почве менялись в пределах 17.8–1.6 т/га. Максимальная величина соответствовала внесению дозы навоза 36.0 т/га за 9 лет, минимальная – 36 т/га за 3 года. Этот факт свидетельствует о постоянно продолжавшейся и увеличивавшейся суммарной минерализации $C_{орг}$ навоза во времени.

Весьма интересны результаты полевого опыта с самым длительным применением навоза. Это классический опыт, проводимый в Англии на Ротамстедтской опытной станции “Broadbalk winter wheat experiment”. Опыт заложен в 1843 г. на тяжелосуглинистой карбонатной почве. Смесь минеральных удобрений (N, P, K, Na, Mg) сравнивали с навозом, который вносили в дозе 35 т/га/год. В цитируемой работе [27] приведены данные опыта до 2000 г. Все годы урожаи зерна озимой пшеницы в навозном варианте и в варианте применения смеси N, P, K, Na, Mg, включавшей дозу азота 144 кг/га, были практически одинаковыми и синхронно повышались при нововведениях в качестве общего фона новых сортов, парования, применения гербицидов, известкования, использования фунгицидов. В первые

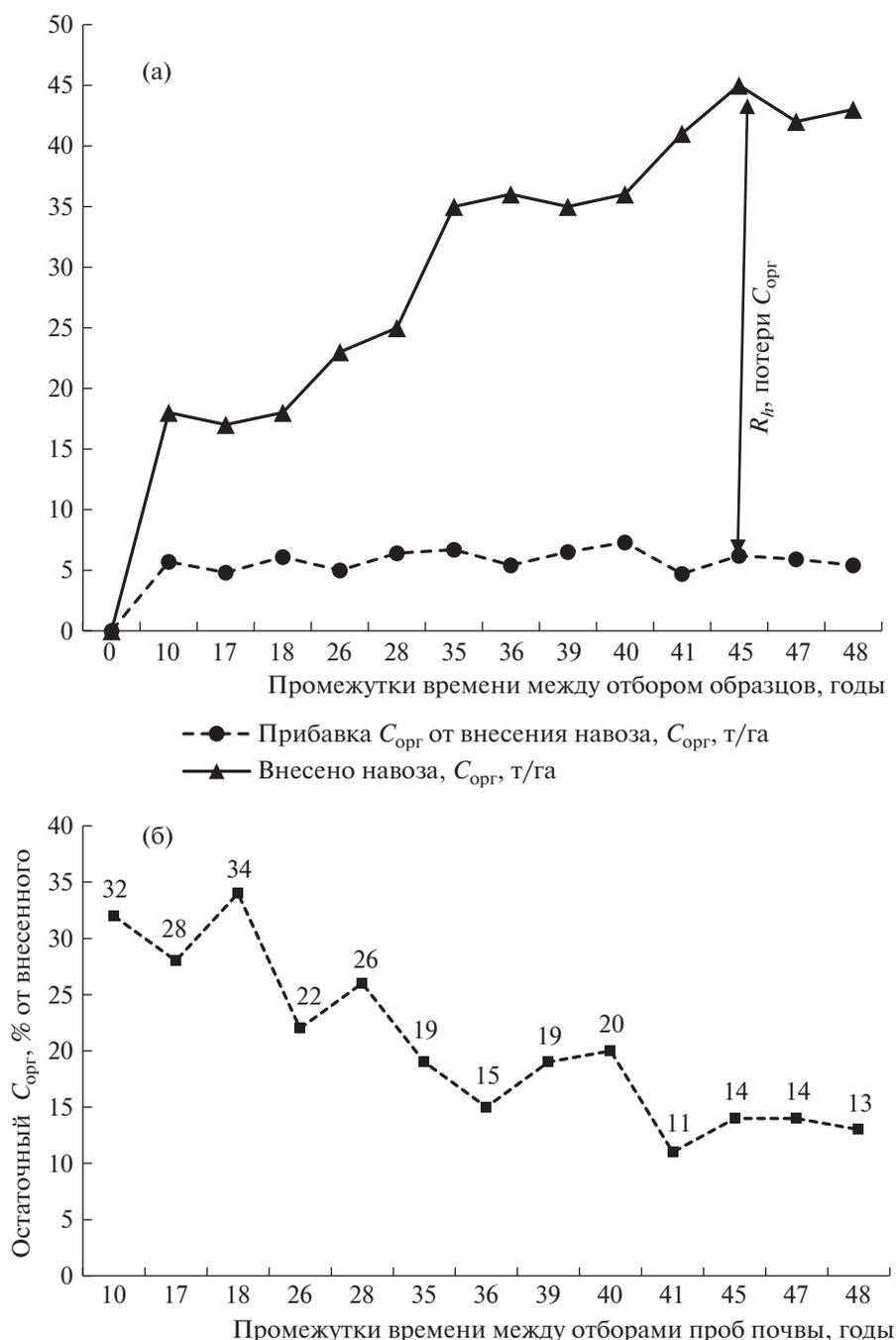


Рис. 4. Влияние длительного внесения навоза на содержание остаточного $C_{орг}$ в почве в полевых опытах ДАОС: (а) – внесенное количество навоза нарастающим итогом и прибавка $C_{орг}$ в почве, т/га (R_h – потери $C_{орг}$ или гетеротрофное дыхание), (б) – динамика содержания остаточного $C_{орг}$ в почве, % от внесенного (гумификация).

80 лет урожаи зерна в навозном и минеральном вариантах оставались в пределах 2.5–3.0 т/га, а в контроле (без удобрений) были ≈ 1 т/га. Заметный рост урожаев начался с момента известкования и применения гербицидов (1960-е гг. прошлого века), а с середины 1960-х гг. при внедрении интенсивных сортов пшеницы и фунгицидов рост урожаев приобрел экспоненциальный характер и до-

стиг 10 т/га. В контроле без удобрений при тех же нововведениях урожай оставался на уровне 1.0–1.5 т/га.

На основе данных, содержащихся в работе [27], был составлен приблизительный баланс органического углерода за время проведения эксперимента до 2000 г. (табл. 2). Почти полтора века-

Таблица 2. Примерный* баланс органического углерода в почве классического опыта с бессменной озимой пшеницей за 156** лет (Ротамстед, Бродболк)

Вариант	Исходное содержание в почве (1)	Внесено с навозом*** (2)	$C_{орг}$, всего: (1) + (2) или (3)	Содержание в почве $C_{орг}$ в 2000 г. (4)	Прибавка $C_{орг}$ в почве от внесения навоза (секвестрация) (4) (Нав – К)	Потери $C_{орг}$ всего (3)–(4)	Секвестрация от внесенного в почву $C_{орг}$, %
$C_{орг}$, т/га							
Контроль (К)	35	0	35	34.5	нет	н/опр.	н/опр.
Навоз (Нав)	35	470	505	96.6	62.1	408	13.2

*В расчеты баланса углерода не вошли данные количества углерода в наземных и подземных (корнях) растительных остатках. $C_{орг}$ вычисляли косвенно по содержанию общего азота и отношению C : N = 10 [27].

**В 1920–1930 гг. прошлого века навоз не вносили (≈ 20 лет).

***Принято, что сухое вещество навоза составляло 20%. Для пересчета в $C_{орг}$ использовали коэффициент 0.45. В 35 т/га навоза $C_{орг}$ составлял 3.15 т/га.

вое внесение навоза способствовало накоплению $C_{орг}$ в почве по сравнению с контролем в 2.8 раза. Однако потери органического углерода из почвы в варианте с навозом составляли почти 90% от количества $C_{орг}$, внесенного с навозом. Потери $C_{орг}$ – это ничто иное как гетеротрофное дыхание с последующей эмиссией CO_2 в атмосферу.

Доля прироста $C_{орг}$ в почве от внесенного количества навоза, вычисленная по результатам опыта за 156 лет, составила 13.2%. Эта величина характерна и для других почвенно-климатических условий и органических удобрительных материалов и, по-видимому, представляет собой ничто иное как коэффициент гумификации.

По данным других европейских многолетних опытов с навозом (опыт в Гале, Германия), описанных Любарской [24], за 72-летний период внесения навоза на депонирование в почве 1 т $C_{орг}$ /га потери $C_{орг}$ навоза составили 13.4 т/га, то есть почти столько же, сколько в опыте Ротамстеда.

В приведенных опытах показаны неполные затраты углерода. Не учтены величины углерода в *NPP* (в виде кормов для животных), затраченных при формировании экскрементов животных, и количество углерода, эмитированного при этом в виде CO_2 и CH_4 , N_2O .

Таким образом, результаты экспериментов с многолетним применением навоза свидетельствуют о значительных потерях $C_{орг}$ навоза из почвы во всех без исключения опытах. При этом потери углерода делают баланс углерода в системе “растение–навоз–почва–атмосфера” отрицательным, что означает значительное превышение эмиссии CO_2 над накоплением в почве углерода *NBP*-пула.

Однако приведенные выше данные об отрицательном влиянии навоза на уровень секвестрации углерода в почве не должны восприниматься как факты, обосновывающие ограничение применения органических удобрений. Почва, образно выражаясь, является “живым организмом” и ей свойственен дыхательный процесс, а дыхательным субстратом для почвенной микрофлоры являются легкоминерализуемые органические вещества. Внесение в почву органических удобрений значительно повышают ее энергетический статус, который способствует усилению соокисления и детоксикации множества загрязняющих почву веществ. Очень важно, что внесение навоза способствует возврату в почвы питательных веществ, отчуждаемых с урожаями сельскохозяйственных культур.

Минеральные удобрения. Проанализированный нами выше материал многолетних полевых опытов по эффективности внесения навоза содержит также данные о сравнительном воздействии минеральных удобрений (NPK + Ca) на урожай сельскохозяйственных культур и агрохимические свойства почв, включая содержание гумуса [20–27]. Это дало возможность оценить действие внесения минеральных удобрений в сравнении с навозом на секвестрацию CO_2 атмосферы. Во всех многолетних опытах отмечено положительное действие удобрений на урожай сельскохозяйственных культур, что естественно отражается и на более высоком поступлении в почвы углерода наземных поуборочных остатков и корневой массы.

В Прянишниковских опытах на ДАОС на дерново-подзолистой почве [26] длительное внесение NPK и NPK + Ca (известь), так же, как и в контроле, баланс углерода оказался отрицатель-

ным, т.е. с течением времени произошло снижение содержания $C_{\text{орг}}$ в почве. Потери $C_{\text{орг}}$ из почвы в варианте без удобрений (контроль) за 40 лет составляли (среднее из 7 опытов) 8.3 т С/га, а при внесении $\text{NPK} + \text{Ca} - 6.3$ т С/га.

В стационарных опытах ВНИИА на дерново-подзолистой почве после многолетнего (27–34 года) применения NPK и $\text{NPK} + \text{известь}$ содержание $C_{\text{орг}}$ в почве выросло в среднем на 0.5 т С/га, в то время как дополнительная эмиссия CO_2 составила 17.1 т С/га [37]. Экстра-поступление углерода растительных остатков (наземная масса + корни) за счет NPK и извести составило в среднем во всех опытах 21.3 т С/га. Эмиссия CO_2 при депонировании 1 т $C_{\text{орг}}$ в почве была равна 34.2 т С/га.

В упоминавшихся опытах на темно-серой лесной и черноземных почвах при многолетнем (17–30 лет) применении минеральных удобрений прирост содержания $C_{\text{орг}}$ в почвах по сравнению с контрольными вариантами составлял 0.0–1.6 т С/га. Это свидетельствует о положительном влиянии минеральных удобрений на депонирование $C_{\text{орг}}$ за счет более высоких величин NPP пожнивных остатков и корневых систем растений.

В отличие от органических удобрений, на получение которых расходуется значительное количество углерода NPP - и NEP -продукции, промышленные минеральные удобрения включают в себя затраты техногенной энергии и, следовательно, связаны с эквивалентным количеством эмиссии CO_2 , которое необходимо учитывать при расчетах баланса углерода в системе растение–удобрение–почва–атмосфера. Априори можно сказать, что дополнительный источник энергии, доставляемый в почву с растительными остатками, в какой-то степени компенсирует энергетические затраты на применение минеральных удобрений.

Компосты. Применение компостов широко используется в качестве органических удобрений, а с другой стороны – это способ утилизации различных бытовых, сельскохозяйственных и промышленных отходов. При этом компосты часто рассматриваются и в качестве секвестра органического углерода. В большинстве работ показано, что под секвестрацией понимается лишь накопление в почвах $C_{\text{орг}}$, независимо от продолжительности его пребывания в почве, а главное без учета складывающегося баланса между поступившим в почву $C_{\text{орг}}$ и эмиссией в атмосферу парниковых газов. В работе [42] показано, что 18-летнее применение компоста не только увеличило содержание органического углерода в почве, но и повышало эмиссию N_2O на 106%. Принимая во внимание, что

ППП закиси азота в 298 раз больше CO_2 , оказывается, что эффект от секвестрации углерода с целью снижения ППП почти полностью нивелируется дополнительными выбросами из почвы N_2O . Таким образом, обогащение почвы компостами не всегда благоприятствует целям сокращения выбросов парниковых газов в земледелии.

Солома и корневые остатки. Повышающиеся урожаи сельскохозяйственных культур при внедрении современных технологий способствуют увеличению поступления в почву пожнивных остатков и корневой массы, что приводит к увеличению секвестрации органического углерода в почвах [50]. Размеры секвестрации $C_{\text{орг}}$ в почве при многократном возврате соломы зависят от ряда сопутствующих факторов и, прежде всего, одновременного внесения в почву минеральных удобрений, непременно включающих в себя азотные [43]. Это связано с тем, что внесение в почву органических материалов с широким отношением $\text{C} : \text{N}$ вызывает активизацию гетеротрофной микрофлоры с острой потребностью в усвояемом азоте. Дефицит усвояемого азота в почве вызывает интенсивное разложение соломы с потерей CO_2 . В работе [43] было показано, что применение NPK , $\text{NPK} + \text{солома}$ и NP и $\text{NP} + \text{солома}$ оказались неравнозначными в накоплении в почве $C_{\text{орг}}$. Запасы $C_{\text{орг}}$ в почве при внесении NPK и $\text{NPK} + \text{солома}$ увеличивались в продолжении более чем 20-летнего периода, в то время как для достижения максимальных запасов $C_{\text{орг}}$ в вариантах NP и $\text{NP} + \text{солома}$ было ограничено периодом от 11 до 20 лет. В работе показано, что в опытах, проведенных с многократным возвратом в почву соломы, накопление органического углерода было больше в почвах в том случае, когда к соломе добавляли минеральные удобрения с участием азота и фосфора. Добавление калия не имело преимуществ, поскольку солома сама значительно обогащена калием.

Покровные культуры. Включение покровных культур в сельскохозяйственные севообороты может значительно увеличить содержание почвенного $C_{\text{орг}}$. Однако получаемые результаты часто бывают противоречивыми. В исследовании [51] были собраны данные, в которых сравнивалась система земледелия с покровными культурами и без них. Было проведено сравнение 1195 пар (покровная культура и безпокровная) в 131 эксперименте. Покровными культурами были рожь (*Secale cereale*) и однолетний райграсс (*Lolium multiflorum*). Использовали также и бобовые культуры. Больше половины (60%) данных было представлено из США. Результаты были сгруппирова-

ны по почвам с разным гранулометрическим составом. Например, на легких почвах включение покровных культур в севообороты значительно повышало содержание $C_{\text{орг}}$, с общим средним увеличением по сравнению с вариантами без покровной культуры на 15.5% (13.8–17.3%).

Наибольшее депонирование $C_{\text{орг}}$ было отмечено для покровных культур в севообороте кукуруза–пшеница–соя. На среднесуглинистой почве накопление $C_{\text{орг}}$ в “покровном” варианте был на 2 т С/га больше, чем в контроле. Тяжелые почвы показали наибольший прирост $C_{\text{орг}}$ после включения покровных культур в севооборот.

Смеси покровных культур приводили к большему увеличению $C_{\text{орг}}$ в почве по сравнению с моновидовыми покровными культурами, а использование бобовых вызвало большее увеличение $C_{\text{орг}}$, чем небобовых.

Покровное земледелие значительно увеличивает содержание $C_{\text{орг}}$ в неглубоких почвах (≤ 30 см) по сравнению с подповерхностными горизонтами (> 30 см). Регрессионный анализ показал, что изменения $C_{\text{орг}}$ в результате покровного земледелия коррелируют с улучшением качества почвы, в частности с уменьшением эрозии и увеличением содержания минерализуемого органического вещества. На изменение запасов органического углерода в почве также влияли годовая температура, количество лет после начала введения в севооборот покровных культур, географическая широта и первоначальное содержание $C_{\text{орг}}$. Наконец, полученная средняя величина секвестрации углерода покровными культурами во всех исследованиях составила 0.56 т С/га/год. Авторы работы [51] делают вывод, если бы на 15% нынешних мировых пахотных землях внедрили покровные культуры, это привело бы к увеличению $C_{\text{орг}}$ на 0.16 ± 0.06 млрд т С/год, что аналогично 1–2% текущих выбросов от сжигания ископаемого топлива.

Луга и пастбища. Почвы под лугами обладают значительным потенциалом поглощения атмосферной CO_2 , поскольку луговая растительность формирует значительную корневую биомассу. Однако этот потенциал в не малой степени зависит от управления лугово-пастбищными угодьями. Улучшение практики использования лугов и пастбищ может способствовать увеличению секвестрации углерода. По оценке [52], мировой потенциал секвестрации углерода за счет улучшения использования лугов и пастбищ составляет 0.3–1.6 млрд т CO_2 /год.

Круговорот и баланс углерода на лугах и пастбищах имеют свои особенности. Травоядные жи-

вотные влияют на секвестрацию углерода в почвах посредством 2-х разных процессов, но взаимосвязанных между собой. Во-первых, вкусовые предпочтения животных воздействуют на состав растительных сообществ, а также на количество и качество растительной биомассы [46]. Умеренное стравливание луговой растительности может стимулировать рост корней и таким образом увеличивать корневую биомассу. Во-вторых, вытапывание, экскременты и моча пасущихся животных воздействуют на свойства почвы, которые в свою очередь меняют микробное разнообразие, их дыхательную активность и эмиссию парниковых газов.

Практика пастбы скота отражается на секвестировании углерода почвами. В работе [53] показаны результаты крупномасштабного исследования на пастбищных угодьях, в которых сравнивали адаптивный выпас в загонах, представляющий собой кратковременный ротационный выпас при высокой плотности поголовья (*AB*) и традиционное использование пастбищных угодий (*TP*) на юго-востоке США. Были отобраны 5 пар со сравнительными характеристиками пастбищ, по количеству голов скота на 1 га угодья, времени существования пастбища (годы). В исследовании проводили количественные определения запасов в почве углерода и азота, их изотопный состав, а также их распределение во фракциях органического вещества почвы. Результаты показали, что на пастбищах *AB* содержание $C_{\text{орг}}$ в 1-метровом горизонте почвы в среднем оказалось 74, в варианте *TP* – 65 т С/га. Кроме того, разница в запасах $C_{\text{орг}}$ заключалась в основном во фракции органо-минеральных соединений, что свидетельствует о формировании более устойчивого к минерализации пула почвенного углерода на пастбищах с загонным содержанием скота по сравнению с традиционным выпасом. Сделано заключение, что загонный выпас скота способствовал большей секвестрации $C_{\text{орг}}$ в почвах под пастбищами. Перевыпас же скота однозначно приводит к деградации земель и обеднению почв органическим углеродом.

Биоуголь (биочар). Биоуголь, полученный из различных материалов, включая сельскохозяйственные отходы, используется в качестве мелиоративной добавки в почву. Рядом исследователей показано, что внесение в почву биоугля улучшает питательный и физический режимы почв, а также снижает эмиссию парниковых газов (CO_2 , N_2O) [38–40, 54].

Некоторые авторы рекомендуют применение биоугля в целях секвестрации углерода в почвах [55–59]. В работе Кларка и др. [60] рассматрива-

ются результаты экспериментов с биоуглем, приготовленным из птичьего помета. Нетто-минерализация N в почве при краткосрочной инкубации была небольшая или даже отрицательная (1.8 и –24.7 мг N/кг почвы) для песчаной и суглинистой почв соответственно, что указывает на незначительную или нулевую новую минерализацию азота и углерода. Эти результаты свидетельствуют о возможном сохранении в почве углерода и азота биоугля в течение длительного времени.

В работе Янга [55] исследовали нетто экосистемный обмен CO₂ (*NEE*) при добавлении биоугля (20 т и 40 т/га) в условиях рисового поля. Было обнаружено, что средний *NEE* рисового поля при внесении биоугля был соответственно на 2.4 и 30.6% больше, чем в контроле. Добавление биоугля также увеличило C_{орг} за счет того, что растворенный органический углерод из отмершей микробной биомассы сорбировался биоуглем.

Али и др. [57] провели 2-летний эксперимент с жемчужным просом на содово-засоленной почве. В этих исследованиях биоуголь добавляли в почву в 5-ти дозах: 0, 5, 10, 15 и 20 т/га. Биоуголь повысил содержание органического углерода в почве и улучшил доступность и поглощение N, P и K по сравнению с контрольной почвой.

Однако в некоторых случаях внесение биоугля в почву может вызвать негативные последствия для почвы и окружающей среды в целом. Например, биоуголь может подавлять доступность питательных веществ в почве и снижать продуктивность сельскохозяйственных культур из-за сокращения поглощения питательных веществ растениями или уменьшения минерализации почвенного C_{орг}. Применение биоугля может также негативно повлиять на качество окружающей среды и здоровье человека из-за вредных соединений, таких как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны (ПХДД) (59). Большие затраты энергии на получение биоугля также являются отрицательным фактором с позиции *ППП*. В то же время приготовление биоугля из зараженных патогенами различных органических удобрений (птичий помет, свиной жидкий навоз, навоз КРС и др.) может служить альтернативой мероприятиям, связанным с обеззараживанием животноводческих отходов.

Минимальная обработка почв. В литературе широко обсуждаются результаты внедрения минимальной обработки (*NT*) в земледелие, в частности, данные относительно секвестрации углерода в почвах [61–67]. *NT* часто рекомендуется для уменьшения минерализации органического

вещества как поверхностных растительных остатков, так и почвенного C_{орг}. Считается, что такая обработка почвы способствует секвестрации атмосферной углекислоты.

Эксперименты с использованием естественного обогащения ¹³C показывают почти двукратное увеличение *MRT* органического углерода почвы при *NT* по сравнению с интенсивной пашенной системой обработки почв [68].

Темпы накопления и минерализации C_{орг} в почве значительно зависят от времени, прошедшего с момента введения *NT* [61]. Авторы попытались установить основные ведущие факторы накопления стабильных фракций C_{орг} (*СФС_{орг}*) в почве в 11-летнем полевом опыте. Полевой эксперимент показал, что по сравнению с плужной обработкой почвы (*ПО*), в *NT* почве доля более стабильных фракций почвенного C_{орг} оказалась более высокой. Увеличение концентрации *СФС_{орг}* повысилось на 12.6% на 5-й год полевого эксперимента, а на 11-й год – уже на 52.2%. Авторы объясняют такие результаты изменением агрегатного состава почв тем, что увеличивается фракция макроагрегатов размером 2 мм, в которых органическое вещество физически защищено и способствует меньшей его минерализации.

В работе [62] механизмы стабилизации почвенного органического углерода изучены в связи с их актуальностью в глобальном углеродном цикле. Однако высказываются сомнения [61], будет ли секвестрированное C_{орг} стабилизировано в долгосрочной перспективе. Авторы рассмотрели механизмы, влияющие на стабильность C_{орг} в системах *NT*, включая “прайминг эффект” (*PE*) [45, 48], молекулярную структуру C_{орг}, защиту агрегатов, связь с почвенными минералами, микробные свойства и воздействие на окружающую среду. Хотя в *NT* наблюдается более устойчивая молекулярная структура C_{орг} по сравнению с традиционной обработкой почвы (*ТО*), стабильность C_{орг} может в более продолжительном времени зависеть от физической и химической защиты. В среднем *NT* улучшает макроагрегацию на 32.7% и снижает минерализацию C_{орг} в макроагрегатах по сравнению с *ТО*. Более высокая микробная активность в *NT* может также производить связывающие агенты, способствующие агрегации и образованию металлоорганических комплексов. Сделан вывод о том, что C_{орг}, изолированное в системах *NT*, вероятно будет стабилизировано в долгосрочной перспективе.

Джия с соавторами [63] показали также преимущество *NT* в секвестрации углерода в почвах,

которое связано с более благоприятным водно-температурным режимом по сравнению с пашенной почвой. *NT* способствует изменению почвенного профиля в результате накопления в верхних горизонтах большого количества растительных остатков и формирования горизонта *A0*. Это в свою очередь уменьшает поверхностное испарение и увеличивает запасы влаги в почвенном профиле, а также снижает температуру почвы.

Показано, что минимальная обработка почвы вызывает увеличение численности денитрифицирующих микроорганизмов [69]. Комбинация минимальной обработки почвы и применения азотных удобрений приводит к усилению потерь газообразного азота. Пальма с соавт. [70] обнаружили в 2 раза большие потери азота удобрений за счет денитрификации при минимальной обработке почвы по сравнению с нормальной пахотой за 90-суточный период. При этом была установлена весьма тесная положительная связь между количеством денитрифицирующих микроорганизмов и газообразными потерями азота.

И наконец, в статье Купера и др. [65] “Пахать или не пахать” (*To till or not to till in a temperate ecosystem?*) в условиях умеренного климата Великобритании оценено влияние нулевой обработки почвы в течение 15 лет на секвестрацию углерода и выбросы парниковых газов. Было показано, что рассчитанный *ППП* оказался на 30% меньше в системах с нулевой обработкой почвы за счет более низкой эмиссии CO_2 и соответствующей секвестрацией углерода в почве. Было сделано заключение, что *NT* играет важнейшую роль, с одной стороны, как способ снижения эмиссии *ПГ*, а с другой, увеличивает секвестрацию углерода и тем самым способствует сохранению климата.

Однако в определенных условиях *NT* почвы может увеличить потоки закиси азота из почвы, что может свести на нет любые климатические выгоды потенциального хранения *С* в почве [71]. Чтобы исследовать, как долгосрочное внесение различных органических удобрений взаимодействует с обработкой почвы на потоки N_2O в севообороте, были проведены долгосрочные испытания с 2009 г. в Восточной Канаде. Применяли 2 обработки почвы – инверсионную (*IT*) и минимальную и 3 типа удобрения (свиной и коровий жидкий навоз и контроль без удобрений). Эксперимент был заложен на 2-х контрастных по текстуре почвах (тяжелый и песчаный суглинки). Оценивали потоки N_2O с каждого участка посевов (апрель–ноябрь): в течение 2016 г. – под пшеницей, в 2017 г. – под кукурузой и в 2018 г. – под соей. При *NT*-обработке средние кумулятивные

потоки за вегетационный период варьировали для тяжело-суглинистой почвы от 0.8 кг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}/\text{га}$ в контроле (кукуруза) до 7.6 кг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}/\text{га}$ для пшеницы (коровья навозная жижа), для песчаного суглинка – от 0.4 кг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}/\text{га}$ для кукурузы (контроль, *IT*) до 3.0 кг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}/\text{га}$ для кукурузы при внесении свиного навоза после *NT*-обработки. В целом данные показали, что величина эмиссии N_2O при *NT* совместно с жидким навозом значительно превосходила эмиссию N_2O при обычной пахоте. При этом следует иметь в виду, что *ППП* закиси азота в 298 раз больше углекислого газа. При пересчете на CO_2 максимальная эмиссия при *NT*-обработке составляла 2265 кг/га. В данном случае на тяжелосуглинистой почве *NT*-обработку с применением органических удобрений нельзя рекомендовать как способ борьбы с повышенной эмиссией парниковых газов.

Смена вида землепользования. Пахотные угодья России за период 1992–2016 гг. представляли собой чистый источник $\text{C}-\text{CO}_2$ в размере 21–27 (в среднем 24.5) млн т $\text{C}-\text{CO}_2/\text{год}$ [72], что подтверждено отрицательным балансом органического углерода и снижением содержания гумуса в пахотных почвах. Примером могут служить данные агрохимического обследования почв Белгородской обл. за последние несколько десятилетий, черноземы которой составляют $\approx 80\%$ [73–75].

Перестройка производственных отношений в сельскохозяйственном секторе России привела к серьезным структурным изменениям аграрного землепользования. Из состава пахотных угодий за 25-летний период в залежное состояние перешло до 40 млн га. Выведенные из сельскохозяйственного оборота десятки миллионов гектаров пахотных угодий перешли в разряд залежных земель, подвергшихся зарастанию луговой и древесной растительностью. Это в свою очередь изменило характер формирования биологической продуктивности и баланс углерода на сельскохозяйственных угодьях в целом. Исследование углеродного баланса залежей показало, что этот вид земель превратился из источника CO_2 в его абсолютный сток, т.е. происходила секвестрация атмосферной CO_2 . Например, средняя скорость депонирования углерода в бывших пахотных почвах РФ оценивается ≈ 45 млн т *С* в год, в целом за 1995–2016 гг. аккумулировалось ≈ 1 млрд т углерода в органическом веществе почв и растительной биомассе выросшей за это время древесной и кустарниковой растительности [35, 76, 77].

Оценивая в целом изменение баланса углерода на землях сельскохозяйственного назначения за период 1992–2016 гг. можно констатировать, что

в земледелии России за счет сокращения пахотных угодий и перевод их в залежное состояние существенно изменился баланс углерода. Земледелие в целом из чистого источника C-CO₂ в начале девяностых годов превратилось в чистый накопитель (секвестор) C-CO₂. С позиций “низкоуглеродного” развития Российской Федерации можно рекомендовать сохранение залежи в составе сельскохозяйственных угодий РФ, как мощного накопителя углерода в сформировавшихся экосистемах.

В случае распашки лугов и залежей накопленный в почвах органический углерод быстро может быть потерян. Накопление C_{орг} в почвах при залужении и облесении гораздо медленнее, чем его минерализация при распашке [78].

Инициатива “4-промилле”. Увеличение запасов почвенного органического углерода в сельскохозяйственных почвах не только оказывает положительное влияние на качество почвы и ее устойчивость, но также может способствовать смягчению последствий изменения климата. Инициатива “4 на 1000” (4р1000), запущенная на конференции ООН по изменению климата 2015 г. в Париже, направлена на увеличение глобальных запасов C_{орг} в почве на глубине 0–40 см ежегодно на 4 части на тысячу, чтобы компенсировать увеличение антропогенных выбросов CO₂. Проанализирована осуществимость этой цели для сельскохозяйственных почв в Баварии (Юго-Восточная Германия) [78]. Предполагая, что общее количество органического углерода составляет 276 Тг, которое в настоящее время хранится в верхних 40 см сельскохозяйственных почв в Баварии (пахотные и лугопастбищные угодья), 4-промилле соответствует ежегодному связыванию углерода в размере 1.1 Тг. Основываясь на анализе текущего управления почвой для конкретных участков, были разработаны пространственные сценарии связывания C, включая 5 перспективных методов управления (покровное земледелие, улучшение севооборота, органическое земледелие, агролесоводство и преобразование пахотных земель в луга). Результаты показали, что цель 4р/1000 не выполняется для Баварии. Общий потенциал 5-ти методов секвестра C привел к увеличению на 0.3–0.4 Тг C_{орг}/год, что соответствует примерно 1 части на тысячу частей нынешних запасов C_{орг}. Расширение площади покровных культур и агролесоводства было определено в качестве наиболее перспективных вариантов увеличения C_{орг} в сельскохозяйственных почвах. В этой ситуации в Баварии будут компенсированы только ≈1.5% ежегодных выбросов парниковых газов. Но и этот результат

можно считать важным вкладом в смягчение последствий изменения климата.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В большинстве процитированных работ под термином “секвестрация углерода” в почве понимается накопление остаточного органического углерода в почве в результате приемов, связанных с внесением различных органических (навоз, компосты) и минеральных удобрений, мелиоративных материалов (известь, биоуголь и др.), а также выращивания покровных культур, сидератов и минимальной обработки почв. Все перечисленные приемы имеют свои особенности и при строгом рассмотрении не всегда подходят под определение “секвестрация”.

Для оценки уровня секвестрации углерода в почвах необходимо определение баланса между эмиссией CO₂ из почвы (гетеротрофное дыхание) и величиной нового почвенного стока органического углерода в форме *NBP* продукции, т.е. устойчивого к минерализации органического углерода. Сток углерода в *NEP*-продукцию (легко минерализуемые формы углерода) определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода. Переход органического углерода из *NEP*-пула в *NBP*-пул (иными словами процесс гумификации) – длительный процесс и сопровождается потерей углерода в результате гетеротрофного дыхания и эмиссии CO₂ в атмосферу.

Применение органических удобрений (прежде всего навоза) и различных компостов, являющихся чистой экосистемной продукцией, можно отнести к приемам, способствующим увеличению содержания в почвах C_{орг}. Затраты углерода *NPP* на депонирование 1 т C/га в *NBP*-пуле могут меняться от нескольких до десятков т C/га в зависимости от продолжительности и доз внесения органического удобрения в почву. Затраты *NPP* и *NEP* на образование *NBP* представляют собой потери углерода в результате дыхания почвенной биоты и эмиссию CO₂ в атмосферу. Следовательно, применение органических удобрений не обеспечивает секвестрацию CO₂ атмосферы и не служит снижению *ППП*.

Однако применение навоза и компостов являются важнейшими и необходимыми агроприемами, поскольку они выполняют биогеохимическую функцию возврата в почвы питательных элементов, отчуждаемых урожаями сельскохозяйственных культур. Кроме того, внесение органических материалов пополняет в почве запасы дыхательного субстрата для огромного разнообра-

разия микроорганизмов, выполняющих очистительную функцию.

Весьма перспективным приемом секвестрации атмосферной CO_2 является введение севооборотов с посевом покровных культур. По результатам мета-исследований [51], на большом количестве экспериментов сравнения (≈ 2000) показано, что, если бы на 15% нынешних мировых пахотных земель внедрили покровные культуры, это привело бы к увеличению $C_{\text{орг}}$ в почвах на 0.16 ± 0.06 млрд т С/год, что аналогично 1–2% текущих выбросов от сжигания ископаемого топлива.

Перспективным приемом секвестрации органического углерода в почвах может служить минимальная обработка почвы. *NT* способствует изменению почвенного профиля в результате накопления в верхних горизонтах большего количества растительных остатков и формирования горизонта A_0 . Это в свою очередь уменьшает поверхностное испарение и увеличивает запасы влаги в почвенном профиле, а также снижает температуру почвы. Однако в определенных условиях *NT* увеличивает потоки закиси азота из почвы, что может свести на нет любые климатические выгоды потенциального хранения $C_{\text{орг}}$ в почве [71]. Комбинация минимальной обработки почвы и применения азотных удобрений может приводить к усилению эмиссии N_2O , поскольку в гумусовом горизонте из-за слабой аэрации создаются благоприятные условия для процесса денитрификации [70].

Биоуголь, полученный из различных материалов, включая сельскохозяйственные отходы, можно использовать в качестве мелиоративной добавки в почву, улучшающей питательный и физический режимы почв. Однако, пока не сложилось однозначное мнение относительно использования биоугля в качестве секвестра углерода, поскольку значительные энергетические затраты на получение биоугля делают его применение проблематичным в целях секвестрации CO_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hanqin T., Lu C., Yang J., Banger K. et al. Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: current status and future directions // *Global Biogeochem. Cycles*. 2015. V. 29. № 6. P. 775–792. <https://doi.org/10.1002/2014GB005021>
2. Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? // *Global Change Biol.* 2004. V. 10. P. 1756–1766. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486>
3. Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., McCallum I., Kraxner F. Soil contribution to carbon budget of Russian forests // *Agricult. Forest Meteorol.* 2015. V. 200. P. 97–108.
4. Агрохимическая характеристика почв СССР. Северные районы европейской части РСФСР. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 1. 280 с.
5. Агрохимическая характеристика почв СССР. М. Районы Центрально-Черноземной полосы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. Т. 2. 262 с.
6. Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Северного Кавказа. М.: Наука, 1964. Т. 3. 365 с.
7. Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Урала. М.: Наука, 1964. Т. 4. 328 с.
8. Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Поволжья. М.: Наука, 1966. Т. 6. 360 с.
9. Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Западной Сибири. М.: Наука, 1968. Т. 9. 384 с.
10. Агрохимическая характеристика почв СССР (центральные области Нечерноземной зоны РСФСР). М.: Наука, 1972. 360 с.
11. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Верс. 1.0: Коллективная монография. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2014. 768 с.
12. Могилевкина И.А. Изучение доступности растениям природного фиксированного аммония почвы // *Агрохимия*. 1970. № 5. С. 34–41.
13. Kowalenko G.G., Cameron D.R. Nitrogen transformation in soil plant system in three years of field experiments using tracer and nontracer methods on an ammonium fixing soil // *Canad. J. Soil. Sci.* V. 58. № 2. P. 195–208.
14. Kudryarov V.N. Mobility of fixed ammonium in soils // *Terrestrial Nitrogen Cycles. Ecol. Bul.* 1981. № 33. P. 281–290.
15. Soon Y.K. Nitrogen cycling involving non-exchangeable ammonium in gray luvisol // *Biol. Fertil. Soils*. 1998. V. 27. P. 425–429.
16. Morford S.L., Houlton B.Z., Dahlgren R.A. Direct quantification of long-term rock nitrogen inputs to temperate forest ecosystems // *Ecology*. 2016. V. 97 (1). P. 54–64.
17. Houlton B.Z., Morford S.L., Dahlgren R.A. Convergent evidence for widespread rock nitrogen sources in earth's surface environment // *Science*. 2018. V. 360. P. 58–62.
18. Кононова М.М. Органическое вещество почвы его природа, свойства и методы изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 315 с.
19. Александрова Л.Н. Органическое вещество почв и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
20. Городний Н.Г. Действие различных доз и сочетаний навоза и минеральных удобрений в свекловичном севообороте // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов. М.: Изд-во МСХ СССР, 1960. С. 86–125.
21. Соболев Ф.С., Чернецкий А.И. Действие различных доз и сочетаний навоза и минеральных удобрений в свекловичном севообороте // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы

- и продуктивность севооборотов. М.: Изд-во МСХ СССР, 1960. С. 126–143.
22. *Шевелев М.П.* Обогащение почвы навозом и фосфатами в зерновом севообороте на выщелоченном черноземе. // Там же. С. 144–168.
 23. *Гориков П.А.* Результаты опытов по изучению системы удобрения свекловичного севооборота на слабо выщелоченном черноземе // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов. М.: Изд-во МСХ СССР, 1960. С. 262–321.
 24. *Любарская Л.С.* Влияние навоза и минеральных удобрений при длительном систематическом применении на урожай культур и плодородие почвы // Там же. С. 430–470.
 25. *Шевцова Л.К.* Гумусное состояние и азотный фонд основных типов почв при длительном применении удобрений: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1988. 50 с.
 26. *Хлыстовский А.Д.* Плодородие почвы при длительном применении удобрений и известии. М.: Наука, 1992. 192 с.
 27. Rothamsted. Long-terms experiments. Guide to the classical long-term experiments: Datasets and sample archive. Harpenden Herts, UK, 2006 (reprinted 2012). 52 p.
 28. *Yevdokimov I.V., Blagodatsky S.A* Nitrogen immobilization and remineralization by microorganisms and nitrogen uptake by plants: Interactions and rate calculations // *Geomicrobiol. J.* 1993. V. 11. № 3–4. P. 185–193.
<https://doi.org/10.1080/01490459309377950>
 29. *Демкин В.А.* Палеопочвоведение и археология: Интеграция в изучении истории природы и общества. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1997. 213 с.
 30. *Иванов И.В., Табанакова Е.Г.* Изменение мощности гумусового горизонта и эволюция черноземов Восточной Европы в голоцене (механизмы, причины, закономерности) // *Почвоведение.* 2003. № 9. С. 1029–1042.
 31. WMO Greenhouse Gas Bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2018 (№. 15–25 November 2019). WMO Greenhouse Gas Bulletin. № 15–25.
 32. *Курганова И.Н., Кудеяров В.Н.* Оценка потоков диоксида углерода из почв таежной зоны России // *Почвоведение.* 1998. № 9. С. 1058–1071.
 33. *Kudeyarov V.N., Kurganova I.N.* Carbon dioxide emission and net primary production of Russian terrestrial ecosystems // *Biol. Fertil. Soils.* 1998. V. 27. P. 246–250.
 34. *Kurganova I.N.* Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems: Interim Report, IR-02–070. Laxenburg, Austria: IIASA, 2003. P. 02–070.
 35. *Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus B: Chem. Physic. Meteorol.* 2010. V. 62. № 5. P. 497–505.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x>
 36. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
 37. *Шевцова Л.К., Романенков В.А., Блоговецкий Г.В., Хайдуков Г.В., Канзываа С.О.* Структура баланса углерода и биоэнергетическая оценка его компонентов в агроценозах длительных полевых опытов // *Агрохимия.* 2015. № 12. С. 67–75.
 38. *Кирюшин В.И., Кирюшин С.В.* Агротехнологии. СПб.: Изд-во Лань, 2015. 480 с.
 39. *Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М.* Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // *Почвоведение.* 2015. № 2. С. 211–220.
 40. *Дубровина И.А.* Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии // *Почвоведение.* 2021. № 12. С. 1523–1534.
 41. *Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Pavlik S.V., Balashov E.V.* Soil physical properties and nitrous oxide emission from agricultural soils // *Advances in Agrophysical Research.* London: IntechOpen, 2013. P. 193–220.
 42. *Ding W., Luo J., Li J., Yu H. et al.* Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N₂O and fertilizer-induced N₂O emissions from an intensively cultivated soil // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 465. P. 115–124.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.020>
 43. *Berhane M., Xu M., Liang Z.Y., Shi J.* Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis // *Glob Change Biol.* 2020. V. 26. № 4. P. 2686–2701.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15018>
 44. *Xu M., Wan Y., Qin, X.B.* When does nutrient management sequester more carbon in soils and produce high and stable grain yields in China? // *Land Degrad.* 2020. V. 31. P. 1926–1941.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3567>
 45. *Wang Y.M., Li M., Jiang C.Y., Liu M.* Soil microbiome-induced changes in the priming effects of ¹³C-labelled substrates from rice residues // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 726. Art. № 138562.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138562>
 46. *Li J., Chai H., Ding S., Wang J., Li X.* Species-specific herbivore grazing of type-specific grassland can assist with promotion of shallow layer of soil carbon sequestration // *Environ. Res. Lett.* 2021. V. 16. № 11. Art. № 114033.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac302f>
 47. *Mustafa A., Hu X., Shah S.A.* Long-term fertilization alters chemical composition and stability of aggregate-associated organic carbon in a Chinese red soil: evidence from aggregate fractionation, C mineralization, C-13 NMR analyses // *J. Soils Sediments.* 2021. V. 21. № 7. P. 2483–2496.
<https://doi.org/10.1007/s11368-021-02944-9>
 48. *Tian J., Pausch J., Yu G., Blagodatskaya E., Gao Y., Kuzyakov Y.* Aggregate size and their disruption affect ¹⁴C-labeled glucose mineralization and priming effect // *Appl. Soil Ecol.* 2015. V. 90. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.014>
 49. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.

50. *Fan J.L., McConkey B.G., Liang B.C.* Increasing crop yields and root input make Canadian farmland a large carbon sink // *Geoderma*. 2019. V. 336. P. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.004>
51. *Jian J.S., Du X., Reiter M.S.* A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping // *Soil Biol. Biochem.* 2020. V. 143. Art. № 107735. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107735>
52. *Paustian K., Lehmann J., Ogle S.* Climate – smart soils // *Nature*. 2016. V. 532. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
53. *Mosier S., Apfelbaum S., Byck P.* Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in south-eastern U.S. grazing lands // *J. Environ. Manag.* 2021. V. 288. Art. № 112409. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112409>
54. *Мухина И.М., Ружая Е.Я., Бучкина Н.П.* Влияние биоугля на индикаторы качества дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Перспективы и технологии развития естественных и математических наук*. Н. Новгород, 2019. Вып. IV. С. 24–25.
55. *Yang S., Sun X., Ding J.* Effects of biochar addition on the NEE and soil organic carbon content of paddy fields under water-saving irrigation // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. V. 26. № 8. P. 8303–8311. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04326-8>
56. *Majumder S., Neogi S., Dutta T.* The impact of biochar on soil carbon sequestration: The impact of biochar on soil carbon sequestration: Meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages // *J. Environ. Manag.* 2019. V. 250. Art. № 109466. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109466>
57. *Ali E.F., Al-Yasi H.M., Kheir A.M.S., Eissa M.A.* Effect of biochar on CO₂ sequestration and productivity of pearl millet plants grown in saline sodic soils // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2021. V. 21. № 2. P. 897–907. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00409-z>
58. *Oladele S.O., Adetunji A.T.* Agro-residue biochar and N fertilizer addition mitigates C–CO₂ emission and stabilized soil organic carbon pools in a rain-fed agricultural cropland // *Inter. Soil Water Conserv. Res.* 2021. V. 9. № 1. P. 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.09.002>
59. *El-Naggar A., El-Naggar A.H., Shah S.M.* Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, potential environmental risk: A review // *J. Environ. Manag.* 2019. V. 241. P. 458–467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.044>
60. *Clark M., Hastings M.G., Ryals R.* Soil carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils amended with manure-derived biochar // *J. Environ. Qual.* 2019. V. 48. № 3. P. 727–734. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.10.0384>
61. *Kan Z.R., Liu Q.Y., Virk A.L.* Effects of experiment duration on carbon mineralization and accumulation under no-till // *Soil Till. Res.* 2021. V. 209. Art. № 104939. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104939>
62. *Kan Z.R., Liu W.X., Liu W.S.* Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective // *Glob. Change Biol.* 2022. V. 28. № 3. P. 693–710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15968>
63. *Jia S.X., Liang A.Z., Zhang S.X.* Effect of tillage system on soil CO₂ flux, soil microbial community and maize (*Zea mays* yield) // *Geoderma*. 2021. V. 384. Art. 114813. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114813>
64. *Sperow M.* Marginal cost to increase soil organic carbon using no-till on U.S. cropland // *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*. 2019. V. 24. № 1. P. 93–112. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9799-7>
65. *Cooper H.V., Sjogersten S., Lark R.M.* To till or not to till in a temperate ecosystem? Implications for climate change mitigation // *Environ. Res. Lett.* 2021. V. 16. № 5. Art. № 054022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe74e>
66. *Dewi R.K., Fukuda M., Takashima N.* Soil carbon sequestration and soil quality change between no-tillage and conventional till soil management after 3 and 11 years of organic farming // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2022. V. 68. № 1. P. 133–148. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1997552>
67. *Reinsch T., Struck I.J.A., Loges R., Kluss C.* Soil carbon dynamics of no-till silage maize in ley systems // *Soil Till. Res.* 2021. V. 209. Art. № 104957. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104957>
68. *Paustian K., Six J., Elliot E.T., Hunt H.W.* Management options for reducing CO₂ // *Biogeochemistry*. 2000. V. 48. P. 147–163.
69. *Doran J.W.* Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1980. V. 44. P. 765–771. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400040022x>
70. *Palma R.M., Rímolo M., Saubidet M.I., Conti M.E.* Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils // *Biol. Fertil. Soils*. 1997. V. 25. № 2. P. 142–146. <https://doi.org/10.1007/s003740050294>
71. *Pelster D.E., Chantigny M.H., Royer I., Angers D.A.* Reduced tillage increased growing season N₂O emissions from a fine but not a coarse textured soil under the cool, humid climate of eastern Canada // *Soil Till. Res.* 2021. V. 206. Art. № 104833. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104833>
72. *Кудяров В.Н.* Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121.
73. *Чендев Ю.Г., Авраменко П.М., Лищуков С.Д.* Изменение гумусного состояния пахотных почв Белгородской области // *Агрохимия*. 1998. № 6. С. 12–20.
74. *Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации*. М.: ВНИИА, 2013. 208 с.
75. *Лукин С.В.* Агроэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области. Белгород: КОНСТАНТА, 2016. 344 с.
76. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena*. 2015. V. 133. P. 461–466.

77. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лонес де Гереню В.О. Содержание углерода в залежных почвах различных природно-климатических зон европейской части России // Ноосфера. 2017. № 1. С. 128–142.
78. Wiesmeier M., Mayer S., Burmeister J., Hubner R. Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios // *Geoderma*. 2020. V. 369. Art. № 114333. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114333>
79. Soussana J.F., Loiseau P., Vuichard N. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands // *Soil Use Manag.* 2004. V. 20. P. 219–230.

Influence of Fertilizers and Farming Systems on Carbon Sequestration in Soils

V. N. Kudeyarov^{a,b,#}

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

^b*The All-Russian Research Institute of Phytopathology of the RAS
ul. Institut 5, Moscow region, Odintsovo district, p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia*

[#]*E-mail: vnikolaevich2001@mail.ru*

From the standpoint of assessing the carbon cycle and balance, the ratio of effluents and CO₂ emissions is of fundamental importance, since it is the ratio of these two main components of the balance that determines the level of carbon sequestration by soils. The accumulation of residual organic carbon in the soil as a result of techniques associated with the introduction of various organic (manure, compost) and mineral fertilizers, reclamation materials (lime, bio-coal, etc.), as well as the cultivation of cover crops, siderates and no till soil treatment have their own characteristics and, when strictly considered, do not always fit the definition of “sequestration”. To assess the level of carbon sequestration in soils, it is necessary to determine the balance between heterotrophic respiration (R_h) and the amount of new soil stock of organic carbon (C_{org}) in a form resistant to mineralization. Carbon deposition into net ecosystem products (NEP) determines short-term unstable carbon sequestration, and the transition of organic carbon from NEP to the pool of net biome products (NBP) is accompanied by carbon loss as a result of R_h and CO₂ emissions into the atmosphere.

Key words: carbon cycle and balance, soil organic carbon, “sequestration”, heterotrophic respiration, net ecosystem and biome production.