СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2020

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Влияние вида пара, соломы и систем обработки дерново-подзолистой почвы на ее агрохимические свойства
Н. А. Пегова 3

Биологизация земледелия как фактор оптимизации кормовых севооборотов с кукурузой в Нечерноземной зоне
Л. Д. Фролова, М. Н. Новиков 13

Удобрения

Методы анализа и проектирования системы удобрения яровой пшеницы для формализации принятия решений в условиях Зауралья
Н. В. Степных, А. Н. Копылов, Е. В. Нестерова, А. М. Заргарян 19

Влияние систем удобрения на численность микроорганизмов в аллювиальной лугово-лесной и лугово-коричневой почвах под агроценозами
Г. М. Мамедов 30

Агроэкология

Изменение содержания фтора в почвах лесостепи Западной Сибири при их сельскохозяйственном использовании
В. Н. Якименко, Г.А. Конарбаева, В.С. Бойко, А.Ю. Тимохин 38

Влияние разных способов внесения мелиорантов в сероземно-оазисную почву (irragric anthrosols) на интенсивность миграции фтора (по данным лабораторного опыта). Эмпирические модели процесса элювиирования
А. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев, В. М. Буре, Э. Сальников 47

Влияние различного содержания цинка в почве на аминокислотный состав биомассы кормовых трав
Г. Я. Елькина 57

Вулканические пеплы Камчатки как потенциальный источник улучшения биопродуктивности почв
Л. В. Захарихина, Ю. С. Литвиненко, В. В. Гайнатулина, Н. Ю. Аргунеева, М. А. Макарова, О. В. Бредун, Н. И. Ряховская 66

Экотоксикология

Роль удобрений в азотном питании растений при загрязнении почвы нефтью
В. М. Назарюк, Ф. Р. Калимуллина 76

Оценка загрязнения кадмием агроценоза методами математического моделирования
В. А. Четырбоцкий, А. Н. Четырбоцкий 85

ХРОНИКА

Международная научно-практическая конференция “Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы” (3–5 октября 2019 г., г. Воронеж)
О. А. Лучицкая, Н. Н. Зеленская 94

Contents

No. 4, 2020

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Influence of the Type of Fallow, Straw and Tillage Systems of Sod-Podzolic Soil on Its Agrochemical Properties
N. A. Pegova 3

Agriculture Biologization as a Factor of Optimization of Fodder Crop Rotations with Corn in the Nonchernozem Zone
L. D. Frolova, M. N. Novikov 13

Fertilizers

Methods of Analysis and Designing of System of fertilizer of Spring Wheat to Formalize Decision-Making in the Conditions of Trans-Urals
N. V. Stepnykh, A. N. Kopylov, E. V. Nesterova, O. A. Zhukova, A. M. Zargaryan 19

Impact of Fertilizer Complex on Microorganizms Quantity in Alluvial-Meadow-Forest and Meadow-Brown Soils under Agrocenosis
G. M. Mammadov 30

Agroecology

Change of Fluorine Content in Soils of the Forest-Steppe of Western Siberia at Their Agricultural Use
V. N. Yakimenko, G. A. Konarbaeva, V. S. Boyko, A. Yu. Timokhin 38

Influence of Different Methods of Introduction of Meliorants into the Sierozems-Oasis Soil (Irragric Anthrosols) on the Intensity of Fluorine Migration (According to Laboratory Experience). Empirical Models of the Eluviation Process
A. V. Litvinovich, O. Yu. Pavlova, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure, E. Salnikov 47

Influence of Different Zinc Content in Soil on Amino acid Composition of Fodder Grass Biomass
G. Ya. Elkina 57

Kamchatka Volcanic Ash as a Potential Source of Improving Soil Bioproductivity
L. V. Zakharikhina, Y. S. Litvinenko, V. V. Gainatulina, N. Yu. Arguneeva, M. A. Makarova, O. V. Bredun, N. I. Ryakhovskay 66

Ecotoxicology

Role of Fertilizers in Nitrogen Nutrition of Plants when Soil Is Contaminated with Oil
V. M. Nazaryuk, F. R. Kalimullina 76

Estimation of Cadmium Contamination of Agrocenosis by Mathematical Modeling Methods
V. A. Chetyerbotskiy, A. N. Chetyerbotskiy 85

CHRONICLE

International Scientific and Practical Conference “Global Climate Change: Regional Effects, Models, Forecasts” (3–5 October 2019, Voronezh)
O. A. Luchitskaya, N. N. Zelenskaya 94

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 3–12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ
Плодородие почв

УДК 631.51(450)

ВЛИЯНИЕ ВИДА ПАРА, СОЛОМЫ И СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ НА ЕЕ АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 2020 г. Н. А. Пегова

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, структурное подразделение – Удмуртский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
427007 с. Первомайский, Завьяловский р-н, ул. Ленина, 1, Удмуртская республика, Россия
E-mail: ugniish-nauka@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.
После доработки 06.08.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

В многолетнем стационарном полевом опыте по изучению систем зяблевой обработки почвы (отвальной, комбинированной, безотвальной), видов пара (чистый пар, чистый пар с внесением навоза, сидеральные горчичный и клеверный) и внесения соломы в начале 2-й ротации севооборота (пары – озимая рожь – яровая пшеница – клевер – озимая рожь – яровая пшеница – овес) проведено агрохимическое исследование пахотного слоя с целью выявить влияние длительного применения систем зяблевой обработки почвы (2006–2018 гг.) и биоресурсов на ее агрохимические свойства. Безотвальная система обработки почвы обеспечила условия для большего накопления обменного калия в пахотном слое, чем отвальная. В слое 0–10 см калия содержалось 158 мг/кг, подвижного – 1.55 мг/100 г, при отвальной обработке – 138 и 1.24 соответственно, при одинаковом содержании подвижных форм калия в слое 10–20 см. Агрохимические показатели при комбинированной системе обработки почвы были на уровне отвальной. В вариантах с сидеральными парами, в сравнении с чистым, с изменением показателей кислотности в сторону понижения уменьшалось содержание P_2O_5, K_2O, их подвижность, а также содержание $N\text{-}NH_4$ и Mg, но увеличилось содержание $N\text{-}NO_3$, Ca и Al. Внесение навоза КРС 60 т/га обеспечило наиболее значительное улучшение агрохимических свойств пахотного слоя. На 3-й год после внесения соломы озимой ржи (4 т/га) отмечено увеличение содержания аммонийного азота (2.31–2.72 мг/100 г), снижение содержания обменного магния (2.43–2.91 мг-экв/100 г), в вариантах без соломы соответственно – 1.84–2.05 мг/100 г и 3.63–3.73 мг-экв/100 г. Использование биоресурсов в любом сочетании понизило $H_г$ с 5.27 до 2.59–4.68 ммоль/100 г, показатель pH_{KCl} увеличился с 5.08 до 5.31–5.91, $S_{осн}$ возросла с 9.1 до 10.1–12.6 ммоль/100 г.

Ключевые слова: виды пара, солома, системы обработки почвы, дерново-подзолистая почва, агрохимические свойства.

DOI: 10.31857/S0002188120040109

ВВЕДЕНИЕ

Среди видов работ в земледелии механическая обработка почвы оказывает многостороннее влияние на многие свойства почвы. Это влияние многократно усиливается при длительном применении той или иной системы обработки почвы. Знание закономерностей изменения почвенного плодородия при разработке ресурсосберегающих технологий производства зерна в сравнении с отвальной системой обработки почвы имеет актуальное и приоритетное значение [1, 2].

Необходимым условием поддержания и повышения почвенного плодородия пахотных почв является внесение в почву органических удобрений, сидерация, возврат в почву побочной продукции урожая и других источников органического вещества. Общеизвестно, что внесение навоза обеспечивает существенное повышение содержания органического вещества в почве. Клевер оставляет в почве значительное количество биологического азота. В исследованиях [3] внесение навоза, посев многолетних бобовых культур способствовали улучшению комплекса агрохимических показателей почвы и повышению продуктивности севооборота. Горчица белая в качестве сидерального пара относится к легкомобилизуемым микроорганизмам и органическим веществам, поэтому ее роль в регулирова-

нии биологической активности почвы весьма значительна [4, 5]. Солома зерновых культур с высоким содержанием углерода является ценным материалом для синтеза органического вещества почвы. Однако непосредственная заделка соломы оказывает депрессирующее влияние как на почву, так и на возделываемые культуры, зачастую снижая их урожайность из-за образования токсичных и кислых продуктов разложения органического вещества, а также иммобилизации минерального азота почвы [6]. Ученые Марийского НИИСХ подтверждают целесообразность использования клевера, сидератов и соломы в качестве наиболее экономичных источников органического вещества [7].

Поступление растительных остатков в почву служит важным фактором увеличения биологической активности почвы, накопления микробной массы, что предохраняет элементы питания растений от вымывания, снижает загрязнение грунтовых вод и окружающей среды. Поступая в почвенный раствор в процессе медленного и непрерывного разложения органической массы в течение летнего периода, питательные элементы не накапливаются в избыточных количествах, способствуют экономному расходованию и сохранению почвенного плодородия [8]. Направленность трансформации органического вещества в почве зависит от многих факторов, в том числе и от обработки почвы [9, 10]. Изменение агрохимических показателей почвы в зависимости от системы обработки почвы и вносимых органических удобрений позволяют оценить степень их воздействия на почвенное плодородие.

Цель работы – выявить влияние длительного применения систем обработки почвы (отвальной, комбинированной, безотвальной), вида пара (чистого, чистого с внесением навоза, сидерального горчичного и сидерального клеверного), а также соломы озимой ржи на агрохимические свойства пахотного слоя почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в стационарном полевом опыте в начале 2-й ротации севооборота: пары (2014 г.) – озимая рожь (2015 г.) – яровая пшеница с подсевом клевера (2016 г.) – клевер 1 года пользования (**г.п.**) (2017 г.) – озимая рожь (2018 г.) – ячмень – овес. Почвенные пробы отбирали осенью после посева озимой ржи в 2014 г. и после ее уборки в 2015 и 2018 гг. Схема опыта включала 3 системы основной обработки почвы (фактор *A*): 1 – отвальная (**О**) – ежегодная вспашка на 20 см (контроль); 2 – комбинированная (**К**) – вспашка для заделки дернины клевера на 20 см в 2009 г., вспашка в пару под озимую рожь в 2014 г., вспашка дернины клевера в 2017 г., безотвальные обработки на 12–16 см под остальные культуры севооборота; 3 – безотвальная (**Б**) – ежегодная безотвальная обработка на 12–16 см. Варианты обработки почвы расщеплены видами паров (2014 г.) и внесением соломы озимой ржи в объеме урожая (4 т/га) в 2015 г. при уборке зерновым комбайном с измельчителем соломы (фактор *B*): 1 – чистый пар без органических удобрений (контроль); 2 – чистый пар + солома (**С**); 3 – чистый пар с внесением навоза КРС 60 т/га (**Нав**); 4 – чистый пар с внесением навоза КРС 60 т/га + солома (**Нав+С**); 3 – сидеральный пар (зеленая масса горчицы белой 12.5 т/га) + солома (**Г+С**); 4 – сидеральный пар (зеленая масса клевера 1 г.п. 13.0 т/га) + солома (**Кл+С**). Для ускорения разложения соломы осенью в 2015 г. был внесен азот из расчета 10 кг/т соломы. Навоз, биомасса горчицы и клевера в паровом поле были заделаны в почву в соответствии со схемой опыта в вариантах фактора *A* с предварительной дискацией в 2 следа за 1 мес. до посева озимой ржи. Вариант сидерального клеверного пара был заложен по завершении 1-й ротации в 2013 г., когда был проведен уравнительный посев яровой пшеницы на всем опытном участке с подсевом клевера в вариантах, где по схеме опыта должен быть сидеральный клеверный пар в 2014 г. Повторность опыта четырехкратная, площадь делянки 130 м^2.

Почва опытного участка – агродерново-подзолистая слабосмытая среднесуглинистая на покровных глинах и тяжелых суглинках. В пахотном слое на начало закладки опыта (2006 г.) содержалось гумуса 1.85%, подвижного фосфора – 316–317 мг/кг, обменного калия – 115–119 мг/кг, сумма поглощенных оснований ($S_{осн}$) составляла 16.5–17.4 ммоль/100 г почвы, гидролитическая кислотность ($H_г$) – 1.77–1.78 ммоль/100 г почвы, pH_{KCl} 5.7–5.8, степень подвижности фосфора и калия соответственно – 0.52–0.54 и 2.80–3.25 мг/100 г почвы.

Почвенные образцы отобраны по ГОСТ 17.4.3.01-83 и проанализированы в лаборатории биохимического анализа Удмуртского НИИСХ общепринятыми методами: подвижный фосфор и обменный калий – по Кирсанову в модификации ЦИНАО – (ГОСТ 26207-91); степень подвижности фосфора в 0.03 н. K_2SO_4, степень подвижности калия – в 0.05 н. $CaCl_2$; pH_{KCl} – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85), гидролитическая кислотность – по Каппену (ГОСТ 26212-91), сумма поглощенных оснований –

Таблица 1. Агрохимические показатели пахотного слоя (0–20 см) в зависимости от системы обработки почвы и вида пара (2014 г.)

Обработка почвы (фактор *A*)	Вид пара и биоресурсы (фактор *B*)	P_2O_5	K_2O	Степень подвижности		Ca	Mg	$S_{осн}$	$H_г$	pH_{KCl}
				P_2O_5	K_2O					
		мг/кг		мг/100 г		мг-экв/100 г		ммоль/100 г		ед.
О	Чистый пар (контроль)	343	117	0.44	1.40	11.4	4.01	11.7	3.43	5.27
	Чистый пар + Нав	337	168	0.66	2.18	12.8	4.76	13.1	3.43	5.63
	Сидеральный пар (Г)	342	137	0.48	1.53	11.9	3.82	12.6	2.76	5.60
	Сидеральный пар (Кл)	302	121	0.44	1.29	12.5	3.28	12.8	2.75	5.65
Средние (О)		341	136	0.51	1.60	12.1	3.97	12.6	3.09	5.54
К	Чистый пар (контроль)	336	111	0.42	1.19	11.5	4.34	12.4	3.20	5.50
	Чистый пар + Нав	357	172	0.62	2.05	13.0	4.38	13.4	3.19	5.79
	Сидеральный пар (Г)	304	131	0.49	1.48	11.9	3.11	12.4	2.81	5.54
	Сидеральный пар (Кл)	310	125	0.43	1.13	12.1	3.80	12.7	2.80	5.65
Средние (К)		326	135	0.49	1.46	12.1	3.91	12.7	3.00	5.62
Б	Чистый пар (контроль)	315	105	0.43	1.23	11.8	3.20	12.2	3.44	5.59
	Чистый пар + Нав	333	181	0.64	2.11	12.1	3.48	12.0	3.64	5.58
	Сидеральный пар (Г)	305	138	0.50	1.51	12.2	3.44	12.0	3.13	5.59
	Сидеральный пар (Кл)	326	135	0.43	1.41	12.8	3.43	13.9	3.10	5.66
Средние (Б)		320	140	0.50	1.56	12.2	3.39	12.5	3.33	5.60
Средние (чистый пар, контроль)		331	111	0.43	1.27	11.6	3.85	12.1	3.36	5.45
Средние (чистый пар + Нав)		356	174	0.64	2.11	12.6	4.21	12.9	3.42	5.66
Средние (сидеральный пар Г)		317	136	0.49	1.51	12.0	3.46	12.3	2.90	5.58
Средние (сидеральный пар Кл)		313	127	0.44	1.28	12.5	3.50	13.1	2.88	5.65
HCP_{05} (*A*)		$F_f < F_t$	$F_f < F_t$	$F_f < F_t$	0.10	$F_f < F_t$	0.64	$F_f < F_t$	0.24	$F_f < F_t$
HCP_{05} (*B*)		$F_f < F_t$	15	0.08	0.23	0.79	0.56	0.66	0.21	0.16
HCP_{05} (*AB*)		$F_f < F_t$	27	0.15	0.41	$F_f < F_t$	1.12	1.15	0.44	$F_f < F_t$

Примечание. О – отвальная, К – комбинированная, Б – безотвальная обработка; солома – С, навоз – Нав, горчица белая – Г, клевер – Кл. То же в табл. 2–5.

по Каппену–Гильковицу (ГОСТ 27821-88); обменный кальций и обменный магний (Ca и Mg) – в 0.1 н. NaCl (ГОСТ 26487-85); обменная кислотность и подвижный алюминий – по Соколову; нитратный азот ($N\text{-}NO_3$) – ионометрическим методом (ГОСТ 26489-85); аммиачный азот ($N\text{-}NH_4$) – с реактивом Несслера (ГОСТ 24689-85).

Статистическую обработку результатов исследования проводили методом дисперсионного и корреляционного анализов, с использованием программы STRAZ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В наших исследованиях длительное проведение безотвальной зяблевой обработки почвы (2006–2013 гг.) в сравнении с отвальной и комбинированной существенно не изменило агрохимические свойства пахотного слоя 0–20 см, но в среднем в опыте на начало 2-й ротации (2014 г.) способствовало увеличению гидролитической кислотности до 3.33 ммоль/100 г. При отвальной обработке она составила 3.09, комбинированной – 3.00 ммоль/100 г при $HCP_{05} = 0.24$. При безотвальной обработке отмечена тенденция к снижению содержания обменного магния до 3.39 мг-экв/100 г (при отвальной обработке – 3.97, комбинированной – 3.91 мг-экв/100 г) (табл. 1).

Отсутствие механической обработки почвы в течение одного года (период вегетации озимой ржи) привело к дифференциации пахотного слоя по содержанию основных элементов питания. В вариантах с безотвальной и комбинированной обработками, где растительные остатки располагались преимущественно в верхней части пахотного слоя, содержание подвижного фосфора в

Таблица 2. Агрохимические показатели пахотного слоя почвы (0–10 и 10–20 см) в зависимости от системы обработки почвы и вида пара (2015 г.)

Обработка почвы (*A*)	Вид пара и биоресурсы (*B*)	P_2O_5		K_2O		Степень подвижности			
		мг/кг почвы				P_2O_5		K_2O	
						мг/100 г			
		слой почвы, см							
		0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20
О	Чистый пар (контроль)	386	381	147	107	0.58	0.62	1.79	1.37
	Чистый пар + Нав	355	357	198	156	0.66	0.66	2.42	2.73
	Сидеральный пар (Г)	345	330	156	113	0.56	0.54	1.93	1.17
	Сидеральный пар (Кл)	269	275	146	94	0.40	0.38	1.82	1.14
Средние (О)		339	336	162	117	0.56	0.56	1.99	1.60
К	Чистый пар	343	354	130	95	0.54	0.55	1.60	1.31
	Чистый пар + Нав	332	350	179	159	0.66	0.72	2.41	2.22
	Сидеральный пар (Г)	328	337	148	101	0.56	0.54	1.89	1.33
	Сидеральный пар (Кл)	269	285	129	99	0.42	0.41	1.76	1.08
Средние (К)		318	332	147	114	0.55	0.55	1.92	1.49
Б	Чистый пар	337	348	162	89	0.58	0.49	1.94	1.17
	Чистый пар + Нав	305	303	189	122	0.73	0.55	2.14	1.83
	Сидеральный пар (Г)	322	318	154	89	0.52	0.45	2.08	1.12
	Сидеральный пар (Кл)	306	326	163	92	0.44	0.38	2.26	1.02
Средние (Б)		317	327	167	98	0.57	0.47	2.10	1.28
Средние чистый пар (контроль)		355	361	147	97	0.57	0.55	1.78	1.28
Средние чистый пар + Нав		331	337	189	146	0.69	0.65	2.32	2.26
Средние сидеральный пар (Г)		332	328	153	101	0.55	0.51	1.97	1.20
Средние сидеральный пар (Кл)		281	295	146	95	0.42	0.39	1.95	1.08
HCP_{05} (*A*)		19	$F_f < F_t$	$F_f < F_t$	19	$F_f < F_t$	0.07	$F_f < F_t$	0.36
HCP_{05} (*B*)		44	51	19	19	0.11	0.10	0.26	0.42
HCP_{05} (*AB*)		74	85	32	33	0.17	0.18	0.44	0.71

слое 0–10 см было меньше – 317 и 318 мг/кг, чем при отвальной обработке – 339 мг/кг почвы. В нижней части пахотного слоя (10–20 см) при одинаковом содержании подвижного фосфора (327–337 мг/кг), его подвижность при безотвальной обработке была меньше – 0.47 мг/100 г, чем при отвальной и комбинированной – 0.55–0.56 мг/100 г почвы (табл. 2, рис. 1). Таким образом, концентрация легкогидролизуемого органического вещества в слое 0–10 см почвы снижала содержание подвижных форм фосфора. Во время разложения растительных остатков в этом слое почвы происходит увеличение популяции микроорганизмов и, следовательно, возрастает также потребность в фосфоре. По мнению [11], в разлагаемом органическом веществе критическое содержание фосфора составляет ≈0.2%; при его концентрации выше и ниже будет происходить соответственно чистая минерализация или иммобилизация. Предположили, что в данном случае происходила биологическая аккумуляция подвижного фосфора почвенными микроорганизмами. После уборки 4-й культуры севооборота в 2018 г. снижение содержания подвижного фосфора до 238 мг/кг и его подвижности до 0.56 мг/100 г в сравнении с отвальной и комбинированной обработками (246–256 мг/кг и 0.60–0.67 мг/100 г при HCP_{05} = = 14 мг/кг и 0.04 мг/100 г) отмечено при безотвальной обработке только в слое 10–20 см (табл. 3).

Дифференциация пахотного слоя по содержанию обменного калия и степени его подвижности, независимо от примененной системы обработки почвы, была обусловлена большей подвижностью его соединений в почве. Содержание обменного калия в вариантах опыта тесно коррелировало со степенью его подвижности, $r = 0.857$.

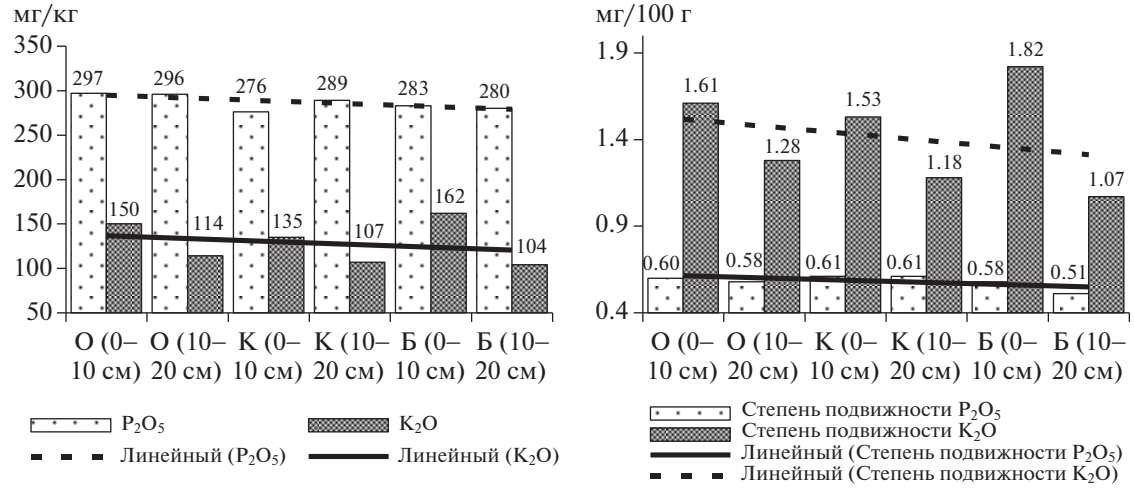


Рис. 1. Содержание подвижных форм фосфора и калия в пахотном слое в зависимости от системы обработки почвы (средние за 2015 и 2018 гг.).

В среднем в вариантах обработки почвы в 2015 г. в слое 0–10 см обменного калия содержалось 147–167, в слое 10–20 см – 98–117 мг/кг, его подвижность соответственно – 1.92–2.10 и 1.28–1.60 мг/100 г почвы. Наибольшая разница между слоями почвы по содержанию подвижных форм калия отмечена на фоне безотвальной системы обработки почвы (табл. 2). Аналогичное распределение подвижных форм калия по профилю пахотного слоя отмечено в 2018 г. (табл. 3). Снижение подвижности фосфора и калия в слое 10–20 см в варианте с безотвальной системой обработки почвы в сравнении с отвальной было связано с естественным процессом почвообразования в условиях промывного режима в отсутствие оборота пласта. При безотвальной обработке затруднено поступление органического вещества в нижнюю часть пахотного слоя, происходит естественное его уплотнение, создаются анаэробные условия для физико-химико-биологических процессов. В 2015 г. в варианте с безотвальной обработкой плотность слоя 10–20 см почвы составила 1.29 г/см^3. На фоне отвальной обработки, при ежегодном обороте верхнего и нижнего слоев, плотность этого слоя составила 1.26 г/см^3. В наших исследованиях плотность почвы отрицательно коррелировала со степенью подвижности фосфора, $r = -0.445$, со степенью подвижности калия – $r = -0.489$.

Величины содержания подвижных элементов питания в пахотном слое почвы в зависимости от системы обработки почвы в среднем за 2015 и 2018 гг. показали тенденцию к снижению содержания подвижного фосфора при комбинированной и безотвальной системах обработки почвы, степени подвижности фосфора при безотвальной обработке, содержания обменного калия и степени его подвижности в слое 10–20 см при комбинированной и безотвальной системах обработки, но увеличение его содержания и степени подвижности в слое 0–10 см (рис. 1). Физико-химические свойства пахотного слоя ($S_{осн}$, $H_г$, pH_{KCl}, Ca, Mg) в зависимости от изученных систем обработки почвы существенных различий в 2015 и в 2018 гг. не имели. Изменения этих показателей представлены на рис. 2, в табл. 4, 5.

Таким образом, установлено, что длительная безотвальная основная обработка почвы в сравнении с отвальной в слое 0–10 см способствовала увеличению содержания обменного калия, его подвижности, но снижала содержание подвижного фосфора. Нижняя прослойка пахотного слоя (10–20 см), при безотвальной обработке, наоборот, обеднялась элементами питания, снижались содержание подвижного фосфора, обменного калия, их подвижность.

Внесение навоза и использование сидеральных (горчичного и клеверного) паров существенно повлияло на агрохимические свойства пахотного слоя почвы. От внесения навоза, независимо от системы обработки почвы, в 2014 г. возросло содержание основных элементов питания, но статистически доказуемым это увеличение было только для калия – 174 мг/кг. Показатель подвижности калия и фосфора в варианте с навозом имел наибольшие величины – 1.64 и 2.11 мг/100 г, показатель обменной кислотности pH_{KCl} был равен 5.66. В варианте с навозом отмечено наибольшее содержание обменного кальция – 12.6 и обменного магния – 4.21 мг-экв/100 г. Соответственно возросла и сумма поглощенных оснований до 12.9 ммоль/100 г (табл. 1). Положительное влияние

Таблица 3. Агрохимические показатели пахотного слоя почвы в зависимости от системы обработки почвы, вида пара и внесения соломы озимой ржи (С) (2018 г.)

Обработка почвы (*A*)	Вид пара и биоресурсы (*B*)	P_2O_5		K_2O		Степень подвижности			
		мг/кг почвы				P_2O_5, мг/100 г		K_2O, мг/100 г	
		слой почвы, см							
		0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20
О	Чистый пар (контроль)	236	286	140	113	0.72	0.70	1.31	0.82
	Чистый пар + С	277	266	107	89	0.60	0.58	0.78	0.60
	Чистый пар + Нав	277	306	141	119	0.60	0.56	1.24	0.94
	Чистый пар + Нав + С	252	196	185	148	0.80	0.68	1.83	1.40
	Сидеральный пар (Г) + С	278	226	165	129	0.60	0.56	1.71	1.36
	Сидеральный пар (Кл) + С	227	234	113	87	0.51	0.50	1.19	0.88
Средние (О)		258	256	138	111	0.64	0.60	1.24	0.96
К	Чистый пар (контроль)	227	243	85	94	0.54	0.56	0.69	0.94
	Чистый пар + С	267	295	98	84	0.65	0.68	0.78	0.72
	Чистый пар + Нав	205	199	147	111	0.77	0.74	1.38	0.86
	Чистый пар + Нав + С	224	258	165	124	0.88	0.88	1.57	1.10
	Сидеральный пар (Г) + С	242	242	142	113	0.66	0.65	1.40	1.06
	Сидеральный пар (Кл) + С	230	227	122	98	0.51	0.51	1.13	1.04
Средние (К)		234	246	123	100	0.67	0.67	1.15	0.88
Б	Чистый пар (контроль)	255	245	129	81	0.45	0.45	1.25	0.66
	Чистый пар + С	264	236	165	132	0.63	0.65	1.57	1.00
	Чистый пар + Нав	252	218	185	120	0.76	0.68	1.86	1.00
	Чистый пар + Нав + С	268	261	176	114	0.62	0.59	1.84	0.94
	Сидеральный пар (Г) + С	237	237	160	99	0.46	0.38	1.63	0.90
	Сидеральный пар (Кл) + С	215	234	152	111	0.53	0.50	1.19	0.94
Средние (Б)		250	238	158	111	0.59	0.56	1.55	0.87
Средние чистый пар (контроль)		239	258	118	96	0.57	0.57	1.08	0.81
Средние чистый пар + С		269	266	123	102	0.63	0.64	1.04	0.77
Средние чистый пар + Нав		245	241	158	117	0.71	0.66	1.49	0.93
Средние чистый пар + Нав + С		248	238	175	129	0.77	0.72	1.75	1.15
Средние сидеральный пар (Г) + С		252	235	156	114	0.57	0.53	1.44	0.96
Средние сидеральный пар (Кл) + С		224	232	129	99	0.52	0.50	1.08	0.80
HCP_{05} (*A*)		15	14	10	$F_f < F_t$	0.05	0.04	0.17	0.04
HCP_{05} (*B*)		27	23	13	13	0.07	0.06	0.18	0.14

навоза на агрохимические свойства пахотного слоя почвы сохранилось в 2015 и 2018 гг. (табл. 2–5).

Внесение в пару зеленого удобрения (горчица, клевер) иначе, чем навоз, повлияло на агрохимические показатели пахотного слоя. В сидеральных парах (2014 г.) наблюдали увеличение содержания обменного калия на 22.5 и 14.7% (136 и 127 мг/кг), в сравнении с чистым паром (111 мг/кг), после сидерального горчичного пара возросла его подвижность до 1.51 мг/100 г. В чистом пару она составила 1.27 мг/100 г. Можно отметить тенденцию к снижению содержания подвижного фосфора в вариантах с сидеральными парами до 317–313 мг/кг, после чистого и унавоженного паров фосфора содержалось 331 и 356 мг/кг (табл. 1). Через год после уборки озимой ржи содержание обменного калия в вариантах с сидеральными горчичным и клеверным парами, а также его подвижность были на уровне контрольного варианта с чистым паром. Сохранилось снижение содержания подвижного

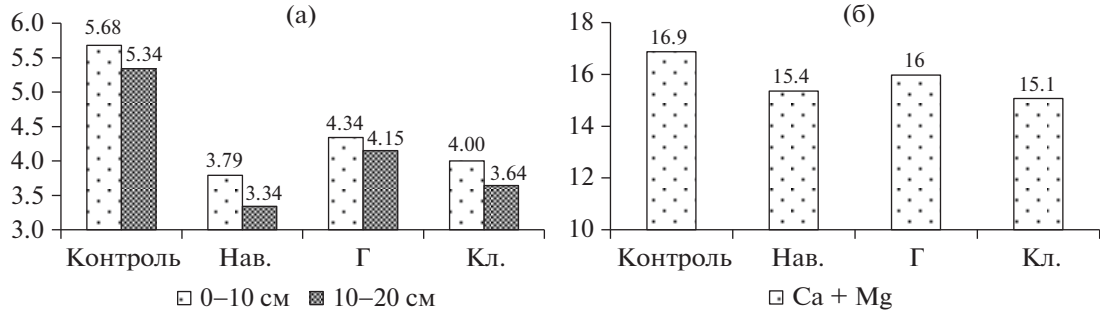


Рис. 2. Содержание Mg в пахотном слое 0–20 см почвы (а), суммарное содержание Ca и Mg (б) в зависимости от вида пара (2015 г.), мг-экв/100 г.

фосфора в варианте с сидеральным клеверным паром в сравнении с чистым, на 74 мг/кг в слое 0–10 см (281 мг/кг) и на 66 мг/кг в слое 10–20 см (295 мг/кг) при $НСР_{05}$ = 44 и 51 мг/кг. Соответственно и подвижность фосфора в варианте с сидеральным клеверным паром была наименьшей – 0.42 и 0.39 мг/100 г. В варианте с чистым паром степень подвижности фосфора составила 0.57 и 0.55 мг/100 г (табл. 2). В 2018 г. в среднем в опыте сохранилась тенденция к снижению содержания подвижного фосфора в варианте с сидеральным клеверным паром. В слое 0–10 см фосфора содержалось 224 мг/кг (в других вариантах – 239–269 мг/кг), в слое 10–20 см – 232 мг/кг (238–266 мг/кг) соответственно. Подвижность фосфора в этом варианте также была наименьшей в опыте (табл. 3). Таким образом, существенное снижение содержания подвижного фосфора в пахотном слое почвы от внесения зеленой массы клевера 13 т/га подтвердило сделанное выше предположение о биологической аккумуляции фосфора почвы. Данный вывод не противоречит результатам исследований [12], где отмечено, что совместное внесение органических и минеральных удобрений способствовало снижению доли минеральных фосфатов. В представленном исследовании в 1-й ротации также отмечали снижение содержания подвижного фосфора в вариантах с внесением соломы озимой ржи [13]. На нарушение сложившегося равновесия между органическими и минеральными формами азота при внесении большого количества органического вещества в почву указано в работе [14]. Известно, что органический фосфор не усваивается растениями. Питание растений происходит за счет минеральных соединений фосфора, а органический фосфор принимает в нем участие по мере минерализации, являясь запасным материалом [15].

Виды пара (чистый, унавоженный, сидеральные) в опыте оказали существенное влияние на физико-химические свойства пахотного слоя почвы. В вариантах с сидеральными горчичным и клеверным парами в год внесения биоресурсов гидролитическая кислотность почвы была существенно меньше (2.90 и 2.88 ммоль/100 г) в сравнении с чистым и унавоженным парами (3.36 и 3.42 ммоль/100 г) при $НСР_{05}$ = 0.21 ммоль/100 г (табл. 1). В 2015 г. этот показатель существенно понизился, не зависел от вида пара и составил в слое 0–20 см почвы 1.51–1.88 ммоль/100 г почвы (табл. 5). В 2018 г. в вариантах с любым сочетанием биоресурсов этот показатель был меньше на 15.6–50.8%, чем в контрольном варианте без биоресурсов (5.27 ммоль/100 г). Показатель обмен-

Таблица 4. Влияние вида пара на агрохимические свойства пахотного слоя 0–20 см (2015 г.)

Обработка почвы (*А*)	Виды паров (*В*)	Подвижность		P_2O_5	K_2O	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	$H_г$	$H_{обм}$	pH_{KCl}	Ca	Mg	Al
		P_2O_5	K_2O	мг/кг			мг/100 г	ммоль/100 г		ед.	мг-экв/100 г		мг/100 г
		мг/100 г											
О	Чистый	0.64	2.07	370	152	4.17	2.37	1.85	0.031	5.45	11.6	4.46	0.10
	Сидеральный	0.47	1.51	305	127	4.69	2.26	1.72	0.030	5.47	11.7	4.17	0.11
К	Чистый	0.62	1.89	345	141	4.11	2.32	1.83	0.033	5.45	11.7	4.83	0.09
	Сидеральный	0.48	1.51	305	119	4.54	2.31	1.62	0.029	5.51	11.8	3.92	0.12
Б	Чистый	0.58	1.77	323	141	4.56	2.33	1.75	0.035	5.44	11.5	4.32	0.08
	Сидеральный	0.45	1.62	318	124	5.93	2.28	1.67	0.029	5.53	11.75	4.00	0.11

Таблица 5. Физико-химические свойства пахотного слоя 0–20 см почвы в зависимости от вида пара и внесения соломы озимой ржи (2018 г.)

Вид пара и биоресурсы	$N\text{-}NH_4$	$S_{осн}$	$H_г$	pH_{KCl}	Ca	Mg
	мг/100 г	ммоль/100 г			мг-экв/100 г	
Чистый (контроль)	1.84	9.1	5.27	5.08	11.9	3.73
Чистый + С	2.72	12.6	2.59	5.91	11.7	2.91
Чистый + Нав	2.05	10.2	4.12	5.42	13.7	3.63
Чистый + Нав + С	2.53	10.3	4.44	5.41	12.5	2.47
Сидеральный (Г) + С	2.32	10.1	4.09	5.31	11.0	2.43
Сидеральный (Кл) + С	2.31	11.1	4.68	5.42	10.9	2.52
HCP_{05}	0.33	1.0	0.57	0.10	0.7	0.80

ной кислотности pH_{KCl} соответственно был выше – 5.31–5.91 против 5.08 в контроле без удобрений. Корреляционная связь между этими показателями была сильной и обратной, $r = -0.84$. В слоях 0–10 и 10–20 см не выявлено существенной разницы показателей кислотности. Таким образом, установлено, что при внесении в почву свежего органического вещества гидролитическая кислотность снижалась независимо от системы обработки почвы.

Содержание обменных оснований кальция и магния в пахотном слое почвы также подверглось существенному изменению при внесении биоресурсов. В паровом поле отмечено существенное увеличение содержания обменного кальция в вариантах с внесением навоза – до 12.6 мг-экв/100 г и биомассы клевера – до 12.5 мг-экв/100 г в сравнении с чистым и сидеральным горчичным парами (11.6 и 12.0 мг-экв/100 г) при $HCP_{05} = 0.8$ (табл. 1). В 2015 и в 2018 гг. повышенное содержание кальция отмечено только в вариантах с внесением навоза. В вариантах с сидеральными парами и последующим внесением соломы содержание кальция было наименьшим в опыте – 11.0 мг-экв/100 г, в контроле – 11.9 мг-экв/100 г при $HCP_{05} = 0.7$.

Обменный магний оказался более подверженным влиянию внесения свежего органического вещества в почву. В сидеральных парах в 2014 г. обменного магния было меньше (3.46 и 3.50 мг-экв/100 г) в сравнении с чистым и унавоженным парами (3.85 и 4.21 мг-экв/100 г). В 2015 г. в вариантах с внесением органических удобрений в пару: навоза 60 т/га, зеленой массы горчицы 12.5 т/га, клевера 13.0 т/га, отмечено существенное снижение содержания обменного магния в пахотном слое почвы в сравнении с чистым паром, как в верхней (3.79–4.34 мг-экв/100 г), так и в нижней (3.34–4.15 мг-экв/100 г) прослойке пахотного горизонта. В контроле без удобрений его содержание составило 5.68 и 5.34 мг-экв/100 г при $HCP_{05} = 0.82$ (рис. 2). Очевидно, это было связано с биологической аккумуляцией этого элемента в почве при внесении большого количества легкогидролизуемого органического вещества. Суммарное содержание обменных кальция и магния также было меньше в вариантах с внесением органических удобрений (рис. 3). В исследовании [16] показано, что в сидеральных парах, как правило, снижалось содержание обменного магния в сравнении с контролем (черным паром).

По данным агрохимического анализа 2015 г., внесение навоза за счет поступления в почву несвойственных ей, активных штаммов микроорганизмов и сидеральные пары за счет внесения большого количества легкогидролизуемого органического вещества и существенного изменения микробного пула почвы оказали разнонаправленное влияние на агрохимические свойства пахотного слоя почвы. В среднем в опыте в вариантах с сидеральными парами (горчичным и клеверным) в сравнении с чистым и унавоженным, независимо от системы обработки почвы, с последовательным изменением показателей кислотности почвы в сторону понижения, уменьшились: содержание в пахотном слое подвижного фосфора, обменного калия, степень подвижности фосфора и калия, содержание аммонийного азота, а также обменного магния. Содержание обменного кальция, подвижного алюминия и нитратного азота, наоборот, увеличивалось в вариантах с сидеральными парами в сравнении с чистыми (табл. 4).

Ввиду особенностей химического состава, солома, внесенная в 2015 г. в разных сочетаниях с биоресурсами, внесенными в пару (навозом, биомассой горчицы и клевера) оказала существенное влияние на химические и физико-химические свойства пахотного слоя почвы в 2018 г. (табл. 3, 5). В среднем в опыте сочетание сидерального клеверного пара с последующим внесением соломы озимой ржи не обеспечило повышения содержания подвижного фосфора и обменного калия в

пахотном слое в сравнении с контролем без удобрений. На фоне внесения соломы сохранилась тенденция к снижению содержания подвижного фосфора и степени его подвижности в варианте с сидеральным клеверным паром. При этом, в варианте, где солома была внесена в сочетании с чистым паром, содержание подвижного фосфора было наибольшим: в слое 0–10 см – 269, в слое 10–20 см – 266 мг/кг, содержание обменного калия – на уровне чистого пара без удобрений. В вариантах с внесением соломы существенно возросло содержание аммонийного азота и снизилось содержания обменного магния. Содержание аммонийного азота в пахотном слое составило 2.31–2.72 мг/100 г, в вариантах с чистым и унавоженным парами без дополнительного внесения соломы – 1.84 и 2.05 мг/100 г (HCP_{05} = 0.33). Содержание нитратного азота отмечено на уровне следов. Обменного магния в вариантах с соломой содержалось 2.43–2.91, без соломы – 3.63–3.73 мг-экв/100 г (HCP_{05} = 0.80). Внесение соломы существенно понизило гидролитическую кислотность пахотного слоя почвы до 2.59–4.68 ммоль/100 г в сравнении с контрольным вариантом – чистым паром без соломы (5.27 ммоль/100 г), Изменение кислотности в сторону ее снижения в вариантах с внесением соломы и наиболее существенное – в варианте с чистым паром ($H_г$ = = 2.29 ммоль/100 г, pH_{KCl} 5.91) – в сравнении с контролем чистым паром ($H_г$ = 5.27 ммоль/100 г. pH_{KCl} 5.08) было обусловлено более медленным разложением соломы без дополнительного источника азота. Дефицит азота при разложении соломы в почве компенсируется многими источниками, в том числе деструкцией органического вещества почвы, имеющего кислую реакцию, в частности фульвокислот. Такое заключение было сделано в предыдущих исследованиях на основании того, что в вариантах с внесением соломы содержание специфического гумуса и фульвокислот снизилось на 0.25% в сравнении с вариантами, где солому не вносили [17].

Внесение соломы озимой ржи в сочетании с сидеральными горчичным и клеверным парами выявило существенное снижение содержания обменного кальция (11.0 мг-экв/100 г) в сравнении с чистым (11.7–11.9) и унавоженным (12.5–13.7 мг-экв/100 г) парами.

ВЫВОДЫ

1. Длительная безотвальная основная обработка дерново-подзолистой почвы в сравнении с отвальной способствовала увеличению содержания обменного калия, его подвижности в верхней части пахотного слоя, но снижала содержание подвижного фосфора. В нижней его части (10–20 см) уменьшалось содержание подвижного фосфора, обменного калия, их подвижность.

2. Внесение в почву свежего органического вещества (биомассы горчицы, клевера) способствовало снижению гидролитической кислотности и содержания обменного магния в пахотном слое независимо от системы обработки почвы.

3. Вид органического удобрения оказывал существенное влияние на агрохимические свойства пахотного слоя. Внесение зеленого удобрения в качестве сидерата в сравнении с чистым паром с изменением показателей кислотности в сторону понижения способствовало уменьшению содержания P_2O_5, K_2O, их подвижности, содержания $N\text{-}NH_4$ и Mg, но увеличению содержания $N\text{-}NO_3$, Ca и Al. Внесение навоза КРС 60 т/га обеспечило наиболее значительное улучшение агрохимических свойств пахотного слоя.

4. На 3-й год после внесения соломы озимой ржи (4 т/га) отмечено существенное ее влияние на агрохимические свойства пахотного слоя почвы. В вариантах с соломой увеличилось содержание аммонийного азота до 2.31–2.72 мг/100 г, снизилось содержание обменного магния до 2.43–2.91 мг-экв/100 г в сравнении с вариантами без соломы (чистый пар и унавоженный чистый пар), где содержание этих элементов соответственно составило 1.84–2.05 мг/100 г и 3.63–3.73 мг-экв/100 г.

5. Использование биоресурсов в любом сочетании в сравнении с контролем без удобрений понизило гидролитическую кислотность с 5.27 до 2.59–4.68 ммоль/100 г, показатель pH_{KCl} увеличился с 5.08 до 5.31–5.91, $S_{осн}$ возросла с 9.1 до 10.1–12.6 ммоль/100 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дринча В.Н.* Технологические проблемы производства зерна // Земледелие. 2000. № 4. С. 6–7.
2. *Рядчиков В.Г.* Тенденция производства калорий белка и лизина в мировом земледелии // Вестн. РАСХН. 2002. № 1. С. 46–49.
3. *Владыкина Н.И.* Влияние вида пара на изменение агрохимических показателей плодородия почвы и продуктивность севооборота в длительном опыте // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 5. С. 62–67.
4. *Возняковская Ю.М., Попова Ж.Н., Петрова В.Г.* Сидеральные удобрения – регуляторы почвенно-микробиологических процессов // Докл. ВАСХНИЛ. 1988. № 2. С. 23–26.
5. *Лошаков В.Г.* Пожнивная сидерация и плодородие дерново-подзолистых почв // Земледелие. 2007. № 1. С. 11–14.

6. *Верниченко Л.Ю., Мишустин Е.Н.* Влияние соломы на почвенные процессы и урожайность сельскохозяйственных культур // Использование соломы как органического удобрения. М.: Наука, 1980. С. 3–33.

7. *Христофоров Л.В.* Пути воспроизводства плодородия пахотных угодий в современном адаптивно-ландшафтном земледелии Республики Марий Эл // Мат-лы научн. практ. конф., посвящ. 120-летию со дня рожд. В.А. Жуковского "Научные основы рационального землепользования с.-х. территорий Северо-Востока Европейской части России". Сывтывкар. 2002. С. 152–155.

8. *Матюк Н.С., Селицкая О.В., Солдатова С.С.* Роль сидератов и соломы в стабилизации процессов трансформации органического вещества в дерново-подзолистой почве // Изв. ТСХА. 2013. Вып. 3. С. 63–73.

9. *Картамышев Н.И.* Критика современной теории гумусообразования // Аграр. Россия. 2002. № 6. С. 7–9.

10. *Пупонин А.И.* Обработка почвы в интенсивном земледелии Нечерноземной зоны. М.: Колос, 1984. 184 с.

11. *Alexander M.* Introduction to soil microbiology. N.Y.: Wiley, 1961. P. 353–369.

12. *Варламова Л.Д., Нефедьева В.В.* Изменение фракционного состава фосфатов при многолетнем применении удобрений // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2014. 2014. № 5. С. 38–42.

13. *Пегова Н.А.* Влияние систем обработки почвы и биоресурсов на агрохимические свойства дерново-подзолистой суглинистой почвы // Вестн. Рос. сел.- хоз. науки. 2017. № 6. С. 31–35.

14. *Дабахова Е.В.* Эколого-агрономическая оценка применения различных систем удобрения на светло-серой лесной почве: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1998. 37 с.

15. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.

16. *Дзюин А.Г., Дзюин Г.П.* Агрохимическое состояние дерново-подзолистой почвы при использовании навоза, сидератов и соломы совместно с минеральными удобрениями // Владимир. земледелец. 2016. № 4. С. 6–11.

17. *Пегова Н.А.* Органическое вещество пахотной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в зависимости от системы обработки почвы и фона удобрения // Достиж. науки и техн. АПК. 2013. № 9. С. 22–26.

Influence of the Type of Fallow, Straw and Tillage Systems of Sod-Podzolic Soil on Its Agrochemical Properties

N. A. Pegova

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Structural Unit – Udmurt Scientific Research Institute of Agriculture
ul. Lenina 1, Zavyalovsky district, p. Pervomaysky 427007, Udmurt Republic, Russia

E-mail: ugniish-nauka@yandex.ru

In the multi-year stationary field experiment at the study of the autumn about the development of the soil (conventional, combination, subsurface), types of steam (pure steam, pure steam with manure mustard green manure and clover) and making straw at the beginning of the 2nd crop rotation (pair – winter rye – spring wheat – clover – winter rye, spring wheat, oats) held agrochemical study of the topsoil in order to identify the effect of duration systems application of under-winter tillage (2006–2018) and of biological resources on its agrochemical properties. The waste-free system of tillage provided conditions for a greater accumulation of exchange potassium in the arable layer than the dump system. In a layer of 0–10 cm of potassium contained 158 mg/kg, mobile – 1.55 mg/100 g, with dump processing – 138 and 1.24, respectively, with the same content of mobile forms of potassium in a layer of 10–20 cm Agrochemical indicators in the combined system of soil treatment were at the level of the dump. In the variants with sideral pairs, in comparison with pure ones, the content of P_2O_5, K_2O, their mobility, as well as the content of $N\text{-}NH_4$ and Mg decreased with a decrease in acidity indicators, but the content of $N\text{-}NO_3$, Ca and Al increased. Introduction of cattle manure 60 t/ha provided the most significant improvement in the agrochemical properties of the arable layer. In the 3rd year after the introduction of winter rye straw (4 t/ha), there was an increase in the content of ammonium nitrogen (2.31–2.72 mg/100 g), a decrease in the content of total magnesium (2.43–2.91 mg-eq/100 g), in the variants without straw, respectively – 1.84–2.05 mg/100 g and 3.63–3.73 mg-eq/100 g. The use of bioresources in any combination lowered the H_a from 5.27 to 2.59–4.68 mmol/100 g, while the pH_{KCl} increased from 5.08 to 5.31–5.91, the *S* increased from 9.1 to 10.1–12.6 mmol/100 g.

Key words: types of steam, straw, soil treatment systems, sod-podzolic soil, agrochemical properties.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 13–18

УДК 631.58:631.582:633.15(470.31)

БИОЛОГИЗАЦИЯ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ КАК ФАКТОР ОПТИМИЗАЦИИ КОРМОВЫХ СЕВООБОРОТОВ С КУКУРУЗОЙ В НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЕ

© 2020 г. Л. Д. Фролова[1], М. Н. Новиков[1,*]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений – филиал Верхневолжского ФАНЦ 601390 п. Вяткино, Судогодский р-н, Владимирской обл., Россия

**E-mail: novik.mih@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.01.2019 г.
После доработки 07.05.2019 г.
Принята к публикации 10.12.2019 г.

На дерново-подзолистых супесчаных почвах Мещерской низменности в кормовых севооборотах с кукурузой (1 – бессменная кукуруза, 2 – однолетние травы с подсевом донника–донник–кукуруза, 3 – однолетний люпин–кукуруза) изучали эффективность бобовых культур как биологического фактора в оптимизации формирования продуктивности кукурузы и севооборотов. Донник и люпин возделывали на корм. Во всех севооборотах под кукурузу вносили минеральные удобрения (нитрофоску) по следующей схеме: 1 – контроль без удобрений, 2 – (NPK)30, 3 – (NPK)60, 4 – (NPK)90, 5 – (NPK)120. Бобовые предшественники оказали положительное влияние на плодородие пахотного слоя почвы. В среднем в вариантах с удобрениями по сравнению с кукурузой масса корней донника была больше в 1.7 раза, люпина – в 3 раза, содержание в ней общего азота (кг/га) больше в 2.2–1.9 раза соответственно. Минеральные удобрения в севообороте с бессменным посевом кукурузы способствовали подкислению почвы, бобовые предшественники кукурузы сглаживали этот негатив, кроме того под их влиянием до 30% возросло содержание в почве усвояемых форм фосфора и калия. Оказывая положительное влияние на плодородие почв, бобовые предшественники способствовали росту зеленой массы кукурузы. На их фоне без удобрений урожайность кукурузы возросла на 56 и 57 ц/га (на 17%). Максимальная урожайность бессменной кукурузы достигла 633 ц/га при использовании (NPK)120. Такая же урожайность получена при возделывании кукурузы на фоне (NPK)60 в севообороте с люпином и донником. Таким образом, бобовые культуры, как важнейший элемент биологизации земледелия, позволили сократить применение минеральных удобрений в кормовых севооборотах с кукурузой в 2 раза. В среднем в вариантах с удобрениями по сравнению с бессменной кукурузой в севооборотах с донником и люпином выход протеина возрос на 17 и 24%, обеспеченность одной кормовой единицы протеином (г) – на 16 и 19%. В биологизированных севооборотах только за счет экономии минеральных удобрений доход составил ≈6 тыс. руб./га, за счет повышения белковости кормов – 16 тыс. руб./га.

Ключевые слова: кормовые севообороты, предшественники, кукуруза, донник, люпин, дозы минеральных удобрений, плодородие почвы, урожайность, качество кормов.

DOI: 10.31857/S0002188120040055

ВВЕДЕНИЕ

Среди из самых острых проблем последних лет в земледелии Нечерноземной зоны является недостаточное внесение удобрений и, как следствие, формирование большей части урожая за счет элементов питания почвы, что приводит к уменьшению ее плодородия. В сложившихся хозяйственно-экономических условиях одним из реально возможных, экономически выгодных, экологически релевантных направлений развития аграрного сектора страны является биологизация земледелия, в системе которой ведущее место занимают бобовые кормовые культуры, обладающие высокими средоулучшающими свойствами и кормопродукционным потенциалом [1].

В настоящей работе было предусмотрено изучение приемов эффективного использования бобовых культур для увеличения продуктивности и качества зеленой массы кукурузы в кормовых севооборотах. Кукуруза является одной из основных кормовых культур во многих регионах страны [2]. Особую ценность она представляет как высокоурожайное кормовое растение разностороннего использования. Для снижения затрат на

Таблица 1. Схема севооборотов и их расположения на опытном поле

Вариант, №	Севооборот 1	Вариант, №	Севооборот 2			Вариант, №	Севооборот 3	
	поле, №		поле, №				поле, №	
	1		1	2	3		1	2
	культура		культура				культура	
	бессменная кукуруза		однолетние травы	донник	кукуруза		люпин	кукуруза
1	Без удобрений	1	Без удобрений	Без удобрений	Без удобрений	1	Без удобрений	Без удобрений
2	(NPK)30	2	–	–	(NPK)30	2	–	(NPK)30
3	(NPK)60	3	–	–	(NPK)60	3	–	(NPK)60
4	(NPK)90	4	–	–	(NPK)90	4	–	(NPK)90
5	(NPK)120	5	–	–	(NPK)120	5	–	(NPK)120

возделывание кукурузы и получения высококачественных, сбалансированных по белку и другим компонентам кормов, возникла необходимость проведения исследования по использованию биологического азота и других элементов питания бобовых культур (люпина и донника) для питания растений кукурузы и улучшения кормов на ее основе. Цель работы – разработка биологических приемов оптимизации использования кормовых севооборотов с кукурузой в Нечерноземной зоне, получение качественных кормов, ограничение применения минеральных удобрений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение эффективности использования донника и люпина в севооборотах с кукурузой проводили в полевом опыте, заложенном в 2014 году на опытном поле ФГБНУ ВНИИОУ в 3-х севооборотах по следующей схеме (табл. 1).

В севооборотах возделывали наиболее адаптированные к местным условиям сорта растений: кукурузу сорта Катерина, донник сорта Мещерский 99, люпин белый сорта Дега, овес сорта Астор.

Почва под опытом – дерново-подзолистая супесчаная, сформированная на древнеаллювиальных отложениях Мещерской низменности, характеризуется слабокислой реакцией почвенной среды (pH_{KCl} 6.3, $H_г$ – 0.94 мг-экв/100 г почвы), низким содержанием гумуса – 1.2%, средним – усвояемых форм подвижного фосфора и обменного калия (соответственно 118 и 103 мг/кг почвы). Площадь опытной делянки – 56 м^2, учетной – 42 м^2, повторность во времени – двукратная, в пространстве – трехкратная. В пространстве севообороты были развернуты всеми культурами, что позволяло более объективно оценивать проведенные наблюдения и исследования.

Агротехника возделывания культур в опыте – общепринятая для условий Владимирской обл. [3]. Во время вегетации изученных культур проводили фенологические наблюдения и биометрические учеты [4], урожайность кукурузы учитывали в фазе восковой спелости, донника 2-го года жизни – в фазе бутонизации, люпина и однолетних трав (овса с люпином) – в фазе блестящего боба люпина по методике [4]. Одновременно определяли содержание корне-пожнивных остатков изученных растений в пахотном слое почвы по Станкову [5], накопление биологического азота надземной и корневой массой бобовых предшественников кукурузы – по [6]. Также определяли в течение вегетации поражение растений болезнями и вредителями [7, 8].

Научные исследования агрохимического плана выполняли в соответствии с “Методическими указаниями по проведению исследований в опытах с удобрениями” и по соответствующим ГОСТам [9–14], достоверность результатов исследования рассчитывали по [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метеоусловия вегетационных периодов за годы проведения исследования были неравнозначными по температурным показателям и влагообеспеченности, но в целом были удовлетворительными для возделывания изученных культур.

Посев всех культур проводили в первой декаде мая. Всходы однолетних трав и подсеянного донника появились спустя 9–12 сут, кукурузы – 14–16, люпина – 10–12 сут. Отрастание донника 2-го года жизни происходило в начале 3-й декады апреля. Наступление и прохождение фенофаз от-

Таблица 2. Накопление сухого вещества (ц/га) и элементов питания (кг/га) корневой массой предшественников кукурузы в пахотном слое почвы

Вариант	Предшественники кукурузы*								
	1. кукуруза			2. донник			3. люпин		
	Сухое вещество	NPK	N	Сухое вещество	NPK	N	Сухое вещество	NPK	N
1. Без удобрений	18	61	12	30	80	25	51	97	35
2. (NPK)30	18	82	17	31	96	37	54	92	33
3. (NPK)60	17	101	17	31	97	40	56	86	32
4. (NPK)90	18	107	18	30	100	39	57	92	31
5. (NPK)120	19	111	19	30	109	43	55	91	33

* Нумерация предшественников кукурузы та же в табл. 3–6.

Таблица 3. Влияние различных доз минеральных удобрений и предшественников на агрохимические свойства почвы под посевами кукурузы (среднее за ротацию севооборота)

Вариант	pH_{KCl}			$H_г$			$Ca^{2+} + Mg^{2+}$		
				мг-экв/100 г почвы					
	предшественники кукурузы*								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. Без удобрений	6.2	6.2	6.6	1.20	1.17	0.76	5.10	5.19	5.97
2. (NPK)30	6.1	6.2	6.5	1.27	1.00	0.64	5.14	4.91	5.90
3. (NPK)60	6.1	6.0	6.5	1.27	1.02	0.64	4.81	4.85	5.92
4. (NPK)90	6.0	5.9	6.6	1.34	1.10	0.65	4.78	5.00	6.00
5. (NPK)120	5.8	5.8	6.6	1.40	1.11	0.58	4.49	5.51	5.83

дельно взятой культуры проходило одновременно во всех вариантах. Густота стояния растений в вариантах в период полных всходов и перед уборкой урожая различалась незначительно. Гибели растений донника за зимний период не отмечено.

Агрохимические свойства почвы под посевами кукурузы в севооборотах существенно зависели от предшественников, уровня формирования их корневой массы и накопления в ней элементов питания. Оценка этих показателей даже на глубину пахотного слоя почвы свидетельствовала о значительном преимуществе бобовых культур как предшественников кукурузы. По сравнению с бессменной кукурузой они способствовали увеличению накопления в почве органической массы корней и элементов питания, прежде всего азота (табл. 2). По сравнению с бессменной кукурузой бобовые предшественники способствовали увеличению накопления в почве корневой массы и содержание в ней азота. Вес корневой массы предшественников в отдельности существенно не зависел от удобрений, но под их влиянием возрастало общее содержание элементов питания в корнях кукурузы, люпина и донника.

По сравнению с кукурузой масса корней донника превышала в 1.7 раза, люпина – в 3 раза, содержание азота соответственно – в 2.2 и 1.9 раза. Около 60% азота в корнях донника и люпина представлял симбиотический азот.

На основе полученных данных можно судить, что приоритет удобрительных свойств бобовых предшественников связан с увеличением их корневой массы и содержания в ней азота за счет биологической азотфиксации.

Минеральные удобрения, особенно в высоких дозах, в севообороте с бессменной кукурузой способствовали подкислению почвы, предшественник донник, судя по показателям гидролитической кислотности и насыщенности почвы поглощенными основаниями, ослаблял этот негатив, в севообороте с предшественником люпином отмечали снижение кислотности почвы во всех вариантах с применением минеральных удобрений (табл. 3).

Таблица 4. Влияние предшественников и удобрений на содержание элементов питания в пахотном слое почвы под посевами кукурузы (среднее за вегетацию)

Вариант	P_2O_5			K_2O		
	мг/кг почвы					
	предшественники кукурузы*					
	1	2	3	1	2	3
1. Без удобрений	124	191	159	108	137	139
2. (NPK)30	143	203	162	129	140	160
3. (NPK)60	147	203	196	124	141	166
4. (NPK)90	149	204	206	127	141	176
5. (NPK)120	146	213	200	118	149	168

Донник и люпин как предшественники во всех вариантах опыта с удобрениями способствовали увеличению в почве усвояемых форм фосфора (54 и 28%) и калия (28 и 29%) соответственно (табл. 4). Эффект позитивного воздействия предшественников на показатели плодородия почвы сохранился на фоне применения всех доз удобрений.

Минеральные удобрения и предшественники бобовых культур способствовали повышению урожайности кукурузы в севооборотах (табл. 5). В варианте без удобрений по сравнению с бессменной кукурузой урожайность на фоне бобовых предшественников возросла на 56 и 57 ц/га (на 17%) соответственно. В среднем от удобрений по отношению к контролю урожайность после предшественника кукурузы увеличилась на 172 ц/га (на 51%), донника – на 183 ц/га (на 46%), люпина – на 228 ц/га (на 57%), т.е. удобрения только в севообороте с донником незначительно ограничили влияние предшественников на формирование урожая.

Достоверная эффективность всех доз минеральных удобрений проявилась лишь после предшественника кукурузы. Максимальная урожайность 623 ц/га достигнута при внесении (NPK)120, после донника аналогичный урожай получен при применении дозы (NPK)90, после люпина – (NPK)60. Таким образом, за счет подбора оптимальных предшественников кукурузы в кормовых севооборотах использование минеральных удобрений под нее можно сократить в 2 раза.

Качество растительной продукции изученных севооборотов существенно зависело от их структуры и примененных удобрений (табл. 6). Наибольший выход кормовых единиц (**к.е**.) получен в севообороте с бессменной кукурузой, в среднем при применении удобрений – 132 (100%), в севообороте с донником – 98 (74%), с люпином – 108 ц к.е./га (82%). Действие доз удобрений на прирост к.е. отчетливо и достоверно проявилось на бессменной кукурузе, наибольший сбор (ц к.е./га) получен при применении (NPK)120. В севооборотах с донником и люпином максимальный эффект удобрений ограничивался дозами (NPK)30–(NPK)60.

По выходу протеина приоритет имели севообороты с люпином и донником, при этом уровень самого высокого его содержания в кормовой массе этих севооборотов достигал при дозе удобрений (NPK)60, в то время как в урожае кукурузы – при применении (NPK)120.

Удобрения в меньшей мере, чем севообороты, оказывали влияние на обеспеченность кормов протеином. В среднем при внесении удобрений в

Таблица 5. Влияние различных доз минеральных удобрений и предшественников на урожайность зеленой массы кукурузы

Вариант	Предшественники кукурузы*								
	1			2			3		
	урожайность, ц/га	прибавка		урожайность, ц/га	прибавка		урожайность, ц/га	прибавка	
		ц/га	%		ц/га	%		ц/га	%
1. Без удобрений	340	–	–	396	–	–	397	–	–
2. (NPK)30	388	48	14	509	113	29	543	146	37
3. (NPK)60	462	122	36	543	147	37	644	247	62
4. (NPK)90	563	233	66	626	230	58	652	255	64
5. (NPK)120	623	283	83	636	240	61	661	264	66
$НСР_{05}$, ц/га	45			41			43		

Таблица 6. Показатели качества кормов севооборотов с кукурузой

Вариант	Сбор кормовых единиц за ротацию севооборотов, ц к.е/га			Сбор протеина, ц/га			Содержание протеина в 1 к.е., г/к.е.		
	предшественники кукурузы*								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. Без удобрений	101	77	85	4.5	5.2	7.7	45	68	88
2. (NPK)30	112	99	105	5.3	7.3	8.9	47	74	89
3. (NPK)60	131	102	116	6.3	7.8	10.1	48	76	86
4. (NPK)90	153	105	117	7.4	7.8	10.3	48	74	88
5. (NPK)120	165	105	118	8.0	7.9	10.5	48	75	89
$НСР_{05}$, ц/га	10	7	11	0.6	0.9	1.0			

севообороте с севообороте с кукурузой она составила 48 г (100%), донником – 75 г (156%), люпином – 88 г (183%), т.е. в севооборотах с бобовыми предшественниками кукурузы, несмотря на снижение (на 18–26%) общей массы кормовых единиц, их качество за счет увеличения выхода белка значительно улучшалось.

ВЫВОДЫ

1. Важнейшим фактором системы биологизации земледелия являются высокопродуктивные средоулучшающие культуры, использование их (донника и люпина однолетнего) в кормовых севооборотах с кукурузой способствовало улучшению плодородия почв (снизилась кислотность, в почве увеличилось содержание подвижных форм фосфора и калия), повышению ее урожайности на 17%.

2. В среднем в вариантах применения удобрений по сравнению с бессменной кукурузой в севооборотах с предшественниками донником и люпином выход протеина возрос на 17 и 24%, обеспеченность 1 кормовой единицы протеином – с 48 до 75 и 88 г/к.е.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков М.Н., Тужилин В.М.* Система биологизации земледелия в Нечерноземной зоне // Научно-практические рекомендации на примере Владимирской области. М.: Росинформагротех, 2007. 296 с.
2. *Шпаков А.С.* Кормовые культуры в системе земледелия и севооборотах. М.: Росинформагротех, 2004. 400 с.
3. *Автонеев К.И., Агре Д.А., Григорьев А.А.* Система ведения земледелия Владимирской области. Владимир, 1983. 313 с.
4. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М., 1968. 336 с.
5. *Станков Н.З.* Корневая система растений. М.: Знание, 1969. 48 с.
6. *Посыпанов Г.С.* Методы изучения биологической фиксации азота воздуха. М.: Агропромиздат, 1991. 299 с.
7. *Хохряков М.К.* Определение болезней растений. Л.: Колос, 1966. 532 с.
8. *Брянцев В.А.* Сельскохозяйственная энтомология. Л.: Колос, 1966. 342 с.
9. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. Анализ почв / Под ред. Панникова В.Д. М., 1975. 164 с.
10. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Часть. 2. Анализ растений / Под ред. Панникова В.Д. М., 1975. 164 с.
11. ГОСТ 26483-85. Определение степени кислотности почв – величины pH_{KCl} по методу ЦИНАО.
12. ГОСТ 26212-91. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена.
13. ГОСТ 27821-88. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена.
14. ГОСТ 26213-91. Определение содержания органического вещества (гумуса) по методу Тюрина в модификации ЦИНАО.
15. ГОСТ 26207-91. Определение содержания подвижного фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
16. Программа и методика исследований в Географической сети полевых опытов по комплексному применению средств химизации в земледелии / Под ред. Милащенко Н.З. М., 1990. 187 с.

Agriculture Biologization as a Factor of Optimization of Fodder Crop Rotations with Corn in the Nonchernozem Zone

L. D. Frolova[a] and M. N. Novikov[a,#]

[a] *All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers – branch of "Verkhnevolzhskaya PANTS" p. Vyatkino, Sudogda district, Vladimir region 601390, Russia*

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

On sod-podzolic sandy loam soils of Meshcherskaya lowland in fodder crop rotations with corn (1 – permanent corn, 2 – annual grasses with sowing of sweet clover – sweet clover – corn, 3 – annual lupin – corn) studied the effectiveness of legumes as a biological factor in optimizing the formation of productivity of maize and crop rotations. Clover and lupine cultivated for forage. In all crop rotations under maize was introduced mineral fertilizers – nitrophosphate, according to the following scheme: 1 – control without fertilizers, 2 – (NPK)30, 3 – (NPK)60, 4 – (NPK)90, 5 – (NPK)120. Legume predecessors had a positive impact on the fertility of the arable soil. On average, in the variants with fertilizers compared with corn, the weight of the roots of melon exceeded 1.7 times, lupine – 3.0 times, the content of total nitrogen (kg/ha), respectively – 2.2–1.9 times. Mineral fertilizers in crop rotation with permanent maize contributed to soil acidification, maize bean precursors smoothed this negative, in addition, under their influence, up to 30% increased the content of soil digestible forms of phosphorus and potassium. Having a positive impact on soil fertility, bean precursors contributed to the growth of green mass of corn. According to their background without fertilizers corn yield increased by 56 and 57 kg/ha (17%). The maximum yield of permanent maize reached 633 C/ha using (NPK)120. A similar yield was obtained in the cultivation of corn background (NPK)60 in crop rotation with lupine. That is, legumes as an important element of the biologization of agriculture can reduce the use of mineral fertilizers in fodder crop rotations with corn in 2 times. On average, in the variants with fertilizers compared with permanent corn in crop rotations with melilot and lupin protein yield increased by 17 and 24%, the provision of 1 feed unit of protein, grams – 16 and 19%.

Key words: fodder crop rotations, predecessors, corn, melon, lupin, doses of mineral fertilizers, soil fertility, yield, feed quality.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 19–29

Удобрения

УДК 631.81:633.11“321”(571.1)

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАУРАЛЬЯ[1]

© 2020 г. Н. В. Степных[1,*], А. Н. Копылов[1], Е. В. Нестерова[1], А. М. Заргарян[1]

[1] ФГБНУ “Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук”
620142, г. Екатеринбург, ул. Белинского, д. 112 а, Россия
**E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru*

Поступила в редакцию 19.08.2019 г.
После доработки 11.10.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

Рассмотрены методы анализа и проектирования системы удобрения для ее применения в геоинформационных технологиях управления растениеводством в условиях Зауралья. Одним из критериев выбора методики определения доз удобрений является возможность формализации расчета. Анализ литературных данных показал, что в сельхозпредприятиях применяются различные по точности и сложности методы: самый простой – рекомендации научных организаций, более адаптированный – нормативный метод. При наличии базы данных агрохимических, почвенных, гидротехнических и других параметров полей, а также поправочных коэффициентов могут применять балансовые расчеты. Авторами на базе многолетних агрохимических опытов предложен свой экспертный метод определения дозы удобрения на основе 8 ведущих факторов, влияющих на эффективность удобрений. Наибольшую информативность об эффективности удобрений в конкретных условиях дают полевые эксперименты, но проводить их традиционными методами трудоемко и затратно. В современном земледелии это решается с помощью геоинформационных технологий. Дифференцированное внесение удобрений и картирование урожайности позволяют повысить производительность труда сотрудников, существенно увеличить количество опытных участков. Для установления наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность удобрений в агротехнологиях, целесообразно применять системно-когнитивный анализ. При ограниченности материальных ресурсов в хозяйстве для рационального планирования применения удобрений в полях рекомендуется использовать функциональную надстройку в программе EXCEL “Поиск решения”.

Ключевые слова: методы проектирования, дозы удобрений, яровая пшеница, балансовый расчет, дифференцированное внесение, производственный опыт.

DOI: 10.31857/S0002188120040110

ВВЕДЕНИЕ

Применение удобрений является одним из важнейших и эффективных элементов системы земледелия. В то же время удобрения – дорогой ресурс, что требует взвешенного подхода к принятию решений по их применению. Несмотря на дороговизну удобрений в настоящее время, отдача от них в развитых странах составляет ≈15 кг зерна/кг д.в., в России – ≈7 кг и больше. В зависимости от повышения уровня наукоемкости агротехнологий окупаемость затрат становится выше: для нормальных технологий возделывания пшеницы она находится на уровне 7–9 кг, для интенсивных – 10–12, для точных – 13–15 кг зерна/кг д.в. с учетом последействия удобрений [1]. Существенно снизить затраты на производство можно за счет их дифференцированного внесения на микроучастках с почвенной разностью. Это требует высокого уровня информационного обеспечения, а именно наличия баз данных соответствующих показателей для элементарных участков агроландшафтов.

В то же время к точному земледелию с дифференцированными по микроучасткам дозами удобрений большинство сельскохозяйственных предприятий еще не готовы. Зачастую в производстве дозы удобрений и вовсе ограничиваются средними величинами, установившимися многолетней практикой. Более реально и перспективно

[1] Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 18-8-9-3.

в ближайшие годы распределение удобрений в зависимости от агрохимических, почвенных и других параметров полей. Но и в этом случае встает вопрос о том, каким именно образом принимать решение о величине дозы удобрения.

Общие методы оптимизации доз удобрений широко изучены и представлены в агрохимических монографиях, учебниках и методических руководствах [2, 3]. Для проектирования системы удобрения важно также учитывать рекомендации региональных научных учреждений и производственный опыт по определению дозы внесения элементов питания.

При этом необходимо предусмотреть влияние всех параметров природных и антропогенных факторов, однако это усложняет возможность их формализации. В то же время основное влияние на результат оказывают лишь несколько лимитирующих факторов, которые и могут быть учтены для разработки алгоритма принятия решений в цифровых технологиях, что и было использовано авторами настоящего исследования.

Цель работы – изучение методов анализа и проектирования системы удобрения яровой пшеницы при различных уровнях информационного обеспечения для их использования в алгоритмах компьютерных программ управления агротехнологиями.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – филиале УрФАНИЦ УрО РАН, в лаборатории экономики и инновационного развития. Объектом исследования были методы определения доз удобрений. Для достижения цели использован аналитический подход. Проведен обзор литературных данных с точки зрения определения дозы удобрения. С целью проверки в условиях реального производства некоторые методы были протестированы на примере научных и производственных полевых экспериментов при выращивании яровой пшеницы в Курганском НИИСХ. На основе многолетних данных стационарных исследований предложен формализованный алгоритм принятия решений по выбору доз азотных удобрений для яровой пшеницы в условиях Зауралья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ научной литературы показал большое разнообразие применяемых методов определения доз удобрений. Для планирования растениеводства Министерством СХ РФ рекомендован нормативный метод – на основании нормативов затрат минеральных удобрений на планируемый урожай (или на прибавку урожая) [4]. Более точными являются методы, основанные на обобщении данных с использованием балансовых расчетов. Они учитывают вынос элементов питания запланированным урожаем, эффективное плодородие почвы, коэффициенты использования питательных веществ из почвы и удобрений.

Метод балансового расчета доз удобрений разработан Шатиловым И.С. (1987 г.) и Каюмовым М.К. (1989 г.) [5, 6], широко применяется в научной и производственной практике. На его основе существует несколько способов, предусматривающих расчет доз питательных элементов по выносу всем запланированным урожаем или на планируемую прибавку урожая. При этом важно учитывать степень удобренности предшествующей культуры, чтобы учесть последействие удобрений (из расчета 10–15% исходного количества д.в. в них).

Балансовый метод наиболее верный с точки зрения биологической потребности растений, но требует высокого уровня информационного обеспечения, в частности, базы данных для полей, наличия карты, в том числе почвенной, книги истории полей. Кроме того, разработанные в 1980–1990-х гг. нормативы требуют сответствующей корректировки и дальнейшего совершенствования в связи с изменениями плодородия почв, внедрением в производство новых сортов, химических и биологических средств и переходом на более высокие технологии [7]. Табличные данные выноса питательных элементов, несмотря на их получение опытным путем, в конкретных условиях также могут существенно отличаться, что требует дополнительных экспериментальных данных. Например, вынос азота для яровой пшеницы, по данным разных авторов, варьирует от 27 до 47 и более, калия – от 18 до 25, фосфора – от 9 до 18 кг/т основной продукции. В свою очередь, с единицы площади при одном и том же стартовом содержании нитратов в слое 0–40 см в засушливый год вынос азота растениями пшеницы снижается в 1.8–2.5 раза [8].

Принятие решения усложняется тем, что необходимо выявить эффективность как минимум 2-х, а иногда и больше, видов удобрений, а для получения одного уровня урожайности на разных участках могут быть необходимы разные дозы удобрений. В связи с этим распространение получили различные методы и модификации балансовых расчетов.

Метод элементарного баланса предусматривает в расчете коэффициенты использования элементов почвы (**КИП**). Метод расчетов на плано-

вую прибавку урожая учитывает обеспеченность почв питательными элементами и возможный урожай без удобрений. Расчет оптимальных доз с помощью балансовых коэффициентов использования удобрений, дифференцированных по плодородию почв является лучшим методом, т.к. позволяет одновременно регулировать и обеспеченность почвы питательными элементами. Так же применяют расчеты оптимальных доз удобрений с помощью коэффициентов возврата (возмещения) или интенсивности баланса.

Определение доз удобрений с учетом ежегодного повышения плодородия почвы и выноса питательного элемента урожаем по методу Н.Н. Михайлова (1966 г.) [9] позволяет определить дозу удобрения не только на планируемый урожай, но и на реальные темпы повышения запасов питательных веществ в почве по их заданному содержанию.

Расчет доз удобрений по балльной оценке почв, предложенный Т.Н. Кулаковской (1978 г.) [10] основан на разработанной системе стоимости балла пашни в кг продукции/балл. Пользуясь показателями окупаемости единицы питательных веществ, рассчитывают дозу удобрений на дополнительный урожай, учитывая благоприятное соотношение N:P:K [3].

Метод определения действительно возможного урожая (**ДВУ**) основан на том, что содержание элементов питания в почве является лимитирующим фактором и определяет получение ДВУ. По этому методу, кроме содержания питательных веществ в почве, важно знать и соотношение каждого из элементов, принимавших участие в формировании урожая, а также степень доступности их растениям. Коэффициенты использования питательных веществ растениями из почвенных запасов для Сибири определены Ю.И. Ермохиным и А.Ф. Неклюдовым (2002 г.) в следующих диапазонах: нитратный азот – 0.6–0.8 (60–80%), подвижный фосфор – 0.1 (10%), обменный калий – 0.2–0.3 (20–30%) [11].

Методы расчета доз удобрений на планируемый урожай, разработанные Н.К. Болдыревым (1983 г.) [12], включают комплексные методы листовой и почвенной диагностики, т. е. химический состав листьев, содержание подвижных питательных веществ в почве, балансовый метод расчета доз удобрений и др.

Несмотря на достаточную изученность отдельных элементов системы удобрения и многообразие методов расчета оптимальных доз, формализация этих знаний пока находится на низком уровне, не позволяющем проводить качественный автоматизированный анализ данных и проектирование доз удобрений. Сложность расчета потребности растений в минеральных удобрениях связана с тем, что содержание питательных элементов в почве, особенно минерального азота, изменяется в широких пределах в зависимости от происходящих в почве каждого агроландшафта химических, биологических, физических и других процессов. При разных условиях произрастания растений меняется их способность использовать питательные элементы из почвы и удобрений [13].

Поэтому в настоящее время самым распространенным и простым для формализации способом определения доз удобрений является использование рекомендаций, полученных научными учреждениями в агроландшафтных зонах. Это методы, основанные на обобщении данных с эмпирическими дозами удобрений. В результате опытов Географической сети ВИУА и агрохимической службы ЦИНАО для основных почвенно-климатических зон на преобладающих типах почв со средним содержанием подвижного фосфора и обменного калия разработаны оптимальные дозы макроудобрений под основные культуры, а также дозы и способы внесения микроудобрений [3].

Региональные НИУ предлагают более детальные рекомендации. В условиях Зауралья установлена наибольшая потребность яровой пшеницы в азотных и фосфорных удобрениях. Из-за высокого естественного фона содержания калия в почве потребности в дополнительном внесении этого элемента нет [14]. Потребность в азотных удобрениях определяется по шкале А.Е. Кочергина (1965 г.) [15], а детализацию доз проводят на основании многолетних исследований. По данным опытов Курганского НИИСХ, в центральной и южной зонах с более выраженной засушливостью климата и легким гранулометрическим составом почв на выщелоченных черноземах оптимальной и экономически целесообразной является доза азота N40. В восточной зоне, по данным Макушинского опытного поля, достаточно вносить N20 в сочетании с фосфорным удобрением (P15). В условиях северо-западной зоны эффективной и окупаемой является доза N50. Оптимальными дозами припосевного внесения фосфорного удобрения в центральной зоне являются 15–20 кг д.в./га при условии достаточной обеспеченности азотом. В северо-западной зоне дозу фосфора не рекомендуют увеличивать более 20–25 кг д.в./га [14].

Длительные полевые опыты представляют большой практический и научный интерес, т.к. позволяют проследить влияние предшественника и последействия удобрений. В алгоритме проектирования доз удобрений рекомендуемые дозы

привязывают к агроландшафтным зонам и по умолчанию выбирают в соответствующих технологиях выращивания сельхозкультур. Такой подход уже используют в программе по проектированию агротехнологий, разработанной в Курганском НИИСХ [16]. Этот метод применяют чаще всего при недостаточном уровне информационной обеспеченности и цифровизации предприятия.

С развитием информационных технологий эмпирические методы определения доз удобрений трансформируются и совершенствуются, основываются на масштабном статистическом обобщении многолетних экспериментальных данных полевых опытов, предусматривают в том числе расчетные методы и модификации с моделированием и применением электронной техники [3, 17]. Недостатком этих методов является науко- и трудоемкость, необходимость большого набора вариантов, но самое главное – недооценка биологических потребностей культур в питательных элементах.

Таким образом, основные методы расчета доз удобрений сводятся к трем группам: нормативные, балансовые и статистические [1, 3]. Каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки. Во всех используют те или иные поправочные коэффициенты на условия вегетации, связанные с содержанием элементов в почве, удобрениях и растениях, но почти не учитываются предшественники, степень окультуренности почвы и другие показатели, существенно влияющие на коэффициент использования питательных веществ растениями из почвы и удобрения. Поэтому их нужно рассматривать как весьма ориентировочные, особенно если их берут из справочных источников [18]. Кроме того, приведенные методы не учитывают экономическую целесообразность. Диспаритет цен на зерно и удобрения, которые, обеспечивая в интенсивных технологиях существенный прирост урожайности культур, в среднем 1.26 т/га [14, 19], все же не гарантирует хозяйствам получение стабильной прибыли [8].

В связи с этим необходима гибкая система расчетов доз удобрений, при этом стратегия их оптимальной дифференциации должна быть ориентирована не на получение максимальной или заданной (равной) продуктивности культур при разных условиях в пределах конкретного хозяйства, а на обеспечение целесообразной агрономической и экономической эффективности при условии поддержания необходимого уровня плодородия почв, о чем пишет в своей статье О.Г. Чуян [18].

Для Зауралья и Сибири установление оптимальных доз удобрения осложняется неблагоприятными погодными условиями. В засушливые годы эффективность, например, внесенного азота сводится к минимуму, неиспользованный азот вымывается в нижние слои почвы, что резко ограничивает верхние пределы эффективных доз удобрений.

Многолетние исследования сибирских ученых показали, что оптимальные дозы всех 3-х макроэлементов в условиях Сибири могут определяться на основе единого подхода, основанного на учете их количества во фракциях, представляющих ближайший резерв элементов для растений. Дополнительное внесение должно быть в дозе, равной отчуждению элемента с поля урожаем (в среднем за ротацию севооборота), т.е. за счет поддержания в почве оптимальных количеств с помощью компенсирующих доз элементов минерального питания, с распределением между культурами севооборота в соответствии с их относительными потребностями (выносом) по методу расчета элементарного баланса [8].

В условиях Зауралья расчетный метод элементарного баланса зачастую экономически себя не оправдывает, т.к. в засушливые годы эффективность азотных удобрений сводится к минимуму, а во влажные оставшийся азот используется растениями лишь частично. В связи с этим учеными Курганского НИИСХ на основе анализа многолетних исследований в стационарных опытах (с 1967 г.), проведенных в различных почвенно-климатических зонах и в разные по тепло- и влагообеспеченности годы, даны рекомендации по принятию решений при определении оптимальных доз удобрений [14, 20]. Статистический анализ полученных многолетних данных позволил установить коэффициенты значимости 8-ми основных факторов, лимитирующих условия вегетации растений, предложена своя экспертная методика определения оптимальных доз азотных удобрений под яровую пшеницу (табл. 1, 2).

Исходя из условий конкретного поля доза азотных удобрений определяется по суммарному баллу ($\Sigma \boldsymbol{K}_э$), исходя из суммы баллов указанных коэффициентов, умноженной на балл обеспеченности фосфором, как представлено в формуле и табл. 2:

$$\Sigma K_э = (Z + P + Pr + U + D + O + Za) \times S,$$

где Z, P, Pr, U, D, O, Za, S – коэффициенты значимости следующих факторов: Z – зона, P – почва, Pr – предшественник, U – урожайность предшественника, D – доза азота под предшественник, O – обработка почвы, Za – засоренность предшественника, S – содержание фосфора в почве.

Таблица 1. Коэффициенты значимости факторов ($K_з$) для расчета по экспертной методике дозы азотных удобрений при возделывании яровой пшеницы в условиях основных природных зон Зауралья

1	Зона (*Z*)				Тип (подтип) почвы (*P*)				
2	центральная	восточная		северо-западная	южная	$Ч_в^т$	$Ч_в^с$	$Ч_в^л$	$Ч_{осн}^л$
3	20	21		6	17	7	18	18	23
1	Предшественник (*Pr*)								
2	черный пар	поверхностный пар	химический пар	1-я пшеница после пара	2-я пшеница после пара	бессменная пшеница	рапс	кукуруза	зернобобовые
3	45	30	24	14	11	7	5	4	18
1	Урожайность предшественника (*U*), ц/га								
2	0–8		8–15	15–20		20–25		25>	
3	10		6	4		2		0	
1	Доза азота под предшественник (*D*), кг/га					Обработка почвы (*O*)			
2	0–15	15–30	30–50	50–70	>70	вспашка	поверхностная 5–10	мелкая		без обработки
								10–15	15–25	
3	0	3	6	8	10	10	3	5	8	0
1	Засоренность предшественника (Za)					Содержание фосфора в почве (S), г/кг				
2	сильная	средняя		слабая	нет сорняков	От 0 до 44		45–60		60 и более
3	0	3		6	10	10		1.35		1

Примечания: 1. В строке 1 – фактор, 2 – показатель фактора, 3 – балл коэффициента значимости фактора. 2. $Ч_в^т$ – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый, $Ч_в^с$ – чернозем выщелоченный среднесуглинистый, $Ч_в^л$ – чернозем выщелоченный легкосуглинистый, $Ч_{осн}^л$ – чернозем обыкновенный солонцеватый легкоглинистый.

Таблица 2. Доза азотных удобрений в соответствии с суммарным баллом коэффициентов значимости условий выращивания сельскохозяйственных культур ($\Sigma K_з$), кг д.в./га

$\Sigma K_з$	110 и более	105–109	100–104	95–99	90–94	85–89	80–84	75–79
Доза	0	10	15	17	20	23	25	27
$\sum K_з$	70–74	65–69	60–64	55–59	50–54	45–49	40–44	35–39
Доза	30	33	35	37	40	43	45	47
$\sum K_з$	30–34	25–29	25–29	20–24	15–19	10–14		
Доза	50	55	55	60	65	70		

Коэффициент значимости обеспеченности почвы фосфором в формуле вынесен за скобку в связи с тем, что на фоне низкого содержания этого элемента все рекомендации по применению азота становятся экономически неэффективными, требуется обязательное применение фосфорного удобрения, которое рекомендуют вносить в дозе Р15–20 [5]. Более высокая доза экономически нецелесообразна, т.к. экономически не эффективна.

Данный алгоритм является экспертным и получен методом подбора. Тем не менее, он может быть использован для создания экспертно-советующей системы, встроенной в программу по проектированию агротехнологий в условиях Зауралья как для нормальных, так и для интенсивных технологий.

С этой целью данный метод был апробирован на производственных полях Курганского НИИСХ. Для каждого поля в институте ведется электрон-

Рис. 1. Фрагмент карты с распределением различных расчетных доз азотного удобрения в зависимости от условий каждого поля (Курганский НИИСХ, 2019 г.).

ная книга истории полей. На основании информации о каждом поле в 2019 г. проведен расчет и даны рекомендации по выбору доз азотных удобрений. Результаты показали, что расчетная доза азота для некоторых полей меньше, чем общепринятая в центральной зоне (N40) (рис. 1). Это позволило сэкономить количество удобрений. Например, общая потребность в азоте под посев пшеницы после зернового предшественника на запланированных 11-ти полях площадью 434 га по новой экспертной методике составила 15.8 т, что на 1.5 т д.в. (или в переводе на стоимость – на 65.2 тыс. рублей) меньше в сравнении с традиционно рекомендуемой.

При высоком уровне информационного обеспечения и цифровизации управления распространение получают более совершенные методы расчета доз удобрений, основанные на широком спектре показателей состояния растений и почвы и цифровых системах сбора и обработки данных, полученных с помощью высокоточного оборудования, космических снимков и другого инструментария. На основании расчетной информации о получении действительно возможной урожайности, максимальной для реального уровня плодородия каждого поля, возможен выбор оптимальной технологии возделывания сельскохозяйственных культур в зависимости от потребностей и финансовых возможностей товаропроизводителя [21].

Перспективно использование карт-заданий при дифференцированном применении агрохимикатов, основанных на агрохимических показателях почвы и растений, индексах NDVI, позволяющих распределять удобрения по полю с учетом потребности растений. Например, с помощью специальных датчиков фиксируется свет, отраженный от растений, бортовой компьютер вычисляет индекс вегетации и дозу удобрения или средств защиты растений, передает команду на открытие дозатора для выдачи препарата. В то же время технические и программные средства для дифференцированного внесения удобрений еще далеки от совершенства, имеют высокую стоимость, а соответствующие методы расчета оптимальной дозы по потребности растений в элементах питания требуют отбора и анализа почвенных образцов на конкретном микроучастке.

Анализ всего многообразия методических подходов к определению доз внесения удобрений под пшеницу показал, что на фоне жесткой экономической конкуренции в борьбе за каждый рубль окупаемости универсального метода быть не может. При этом все варианты доз, условий и технических возможностей в научных учреждениях на делянках изучить невозможно, тем более при учете особенностей агроландшафтных зон. Возникает необходимость изучения технологий в конкретных условиях хозяйства.

Для проверки эффективности технологий на различных полях авторами был проведен полевой эксперимент на полях Курганского НИИСХ по изучению эффективности удобрений, который показал, что на разных полях при прочих равных условиях эффективность удобрений существенно различалась и отличалась от данных, полученных на опытных участках.

При одинаковых предшественнике, сорте и технологии возделывания яровой пшеницы эффективность удобрения сульфоаммофос (0.8 ц/га) была различной: прибавка на поле 27 составила 5.0, на поле 36 – 3.6 ц/га. При стоимости зерна яровой пшеницы 4-го класса 10 тыс. руб./т с каждого гектара на первом поле получили дополнительно 1400 руб. прибыли только за счет почвенных различий (почвы тяжелее, гумуса и фосфора в почве больше (3.9 против 3.2% и 104 против 71 мг/кг соответственно). Накопление подобной информации о поле позволяет использовать ее в проектировании системы удобрений. Дополнительную информацию (почвенные характеристики, погодные условия, сроки посева и уборки и т.п.) можно хранить в электронной книге (базе данных) истории полей, привязанной к электронной карте. Авторами создана компьютерная программа управления базой данных полей [22].

Внедрение цифровых технологий в производство открывает новые возможности для проведения массовых экспериментов в производственных условиях. Речь идет об использовании системы картирования урожайности и дифференцированного внесения удобрений на основе задания, содержащегося в компьютерной программе и электронной карте.

Для определения доз удобрений в Агрофизическом институте широко апробирован метод прецизионных (точных) опытов. В соответствии со схемой производят автоматическое внесение удобрений в различных дозах в нескольких повторениях, а также оставляют контрольные участки без удобрений. Во время уборки ведут учет урожайности с помощью системы картирования. Приемник сигналов GPS, ГЛОНАСС в реальном времени привязывает показания датчиков урожайности к электронной карте. В результате проведения прецизионного эксперимента и обработки его результатов средствами геоинформационных систем генерируется единая информационная база о наиболее целесообразных дозах удобрений в условиях пространственной неоднородности опытного поля [23, 24]. Система картирования урожайности в такой технологии является одним из методов сбора информации. На проблемных участках с низкой урожайностью анализируют запасы влаги, агрохимический состав, определяют элементы, находящиеся в дефиците, затем составляют электронную карту-задание доз удобрений по микроучасткам для выравнивания урожайности по установленным нормам.

Таким образом, необходимо комплексное использование научного и производственного опыта. Схемы опытов должны предусматривать возможность обобщения их результатов с использованием современных экономико-математических методов и ПЭВМ [14]. На первых этапах удобным инструментом могут стать электронные книги истории полей, анализ которых позволит получать дополнительную информацию о системе земледелия для каждого сельхозпредприятия.

Для анализа экспериментальных и производственных данных, характеризующих состояние агроценоза и особенности агротехнологий для принятия решений при проектировании, как правило, применяют статистические методы. В то же время большое разнообразие и количество получаемых при этом данных делает их анализ проблематичным и требует специальных методов работы с так называемыми “большими данными”, обзор которых предполагает отдельную проблему. Один из интересных и перспективных способов анализа данных – системно-когнитивный анализ, для которого Е.В. Луценко разработал доступный программный инструментарий (универсальную когнитивную аналитическую систему “Эйдос”). По мнению автора, метод обеспечивает возможность разумной содержательной интерпретации результатов, выявление силы и направления влияния сотен или даже тысяч факторов, является непараметрическим, позволяет корректно обрабатывать неполные (фрагментированные) данные; эффективно подавлять шум в данных. Суть метода системно-когнитивного анализа состоит в последовательном повышении степени формализации модели и преобразовании данных в информацию, а ее – в знания и решения на основе этих знаний задач идентификации (распознавания, классификации и прогнозирования), поддержки принятия решений и исследования моделируемой предметной области [25].

Для апробации этого метода анализа данных с помощью системы “Эйдос” авторами проанализированы результаты многолетних исследований технологий выращивания сельскохозяйственных культур в 3-х природно-климатических зонах Курганской обл. (северо-западной, центральной и восточной). В отдельных стационарах изучали севообороты, способы обработки почвы, подготовки пара, дозы удобрений, применение гербицидов – всего 30 факторов в 257 вариантах. Необходимо было определить влияние технологических факторов на урожайность и рентабельность выращивания зерновых культур. Простой анализ такого количества факторов одновременно не представляется возможным, т.к. не соблюдается классический в опытном деле принцип единственного различия.

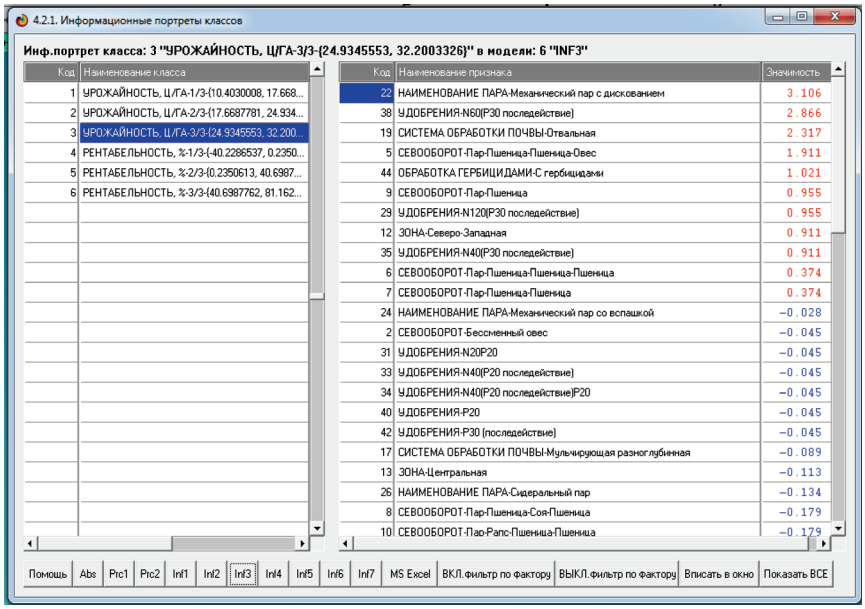


Рис. 2. Информационный портрет класса “урожайность 24.9–32.2 ц/га”.

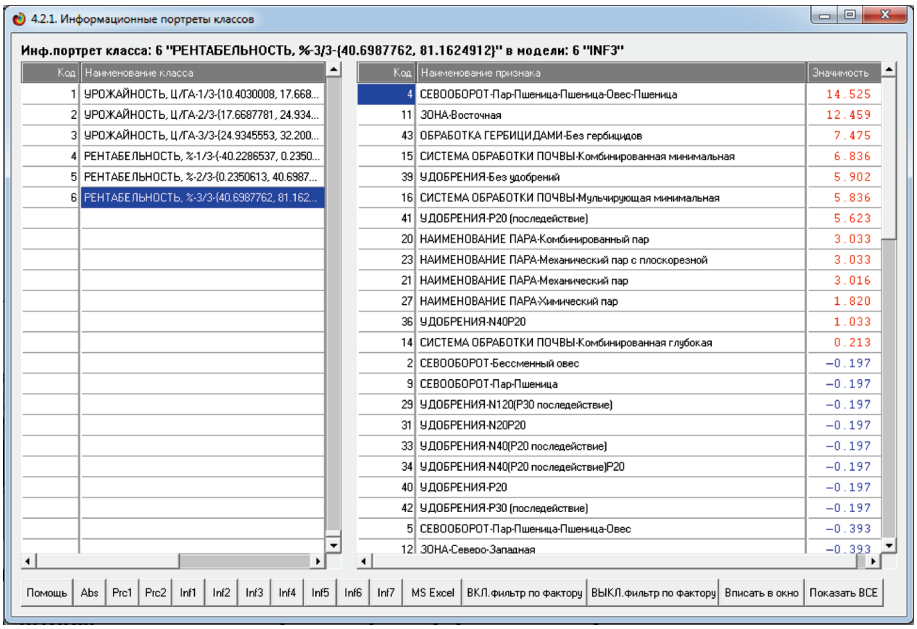


Рис. 3. Информационный портрет класса “рентабельность 40.7–81.2%”.

Система “Эйдос” в загруженных данных выделила 3 класса по урожайности и 3 – по рентабельности, формируя информационный портрет каждого класса (рис. 2, 3). Класс представляет собой группу данных, систематизированных по конкретному признаку в определенных пределах величин. В каждом классе система определяет значимость (силу) влияния различных факторов (признаков). Оказалось, чтобы достичь высокой урожайности, необходимо использовать 5 первых технологических факторов с наибольшими показателями значимости. Другим выводом стало то, что высокий уровень урожайности культур не всегда совпадает с высокой экономической эффективностью их выращивания: для получения наибольшей рентабельности (в пределах 40.7–81.2%) влияние оказывали другие технологические факторы.

Констатируя возможность использования методики Луценко Е.В. для установления значимости факторов производства на результативные показатели, необходимо отметить ее ограничен-

Таблица 3. Экономическая эффективность производства зерна в зависимости от севооборота, технологии возделывания и фона удобренности (Центральное опытное поле Курганского НИИСХ)

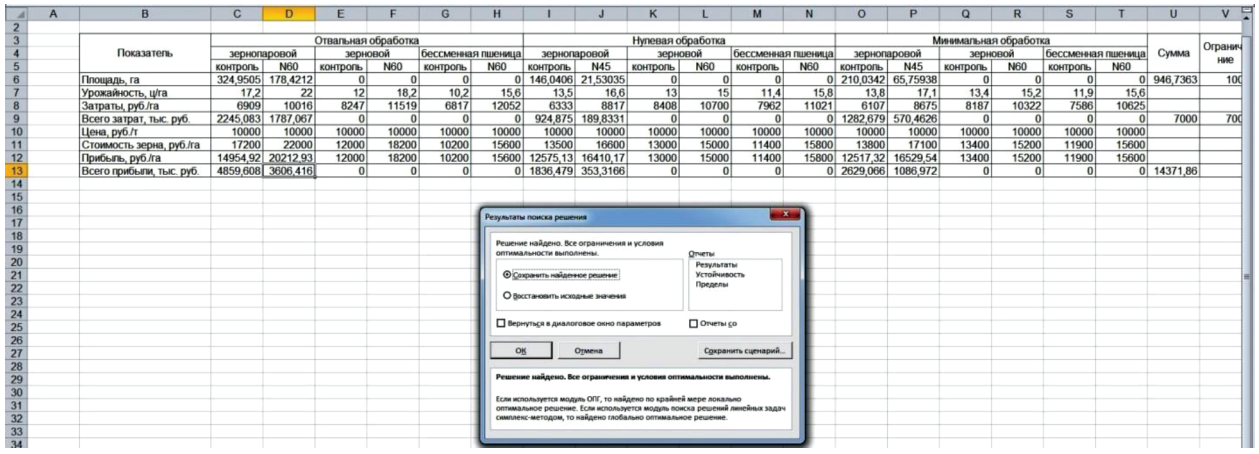
Севооборот, бессменный посев	Фон удобренности	Урожайность, ц/га	Затраты	Прибыль	Рентабельность, %	Себестоимость, руб./ц
			руб./га			
Отвальная обработка (1999–2005 гг.)						
Зернопаровой	Контроль	17.2	6909	10291	71	533
	N60	22.0	10016	11984	46	607
Зерновой	Контроль	12.0	8247	3753	10	686
	N60	18.2	11519	6681	18	631
Бессменная пшеница	Контроль	10.2	68817	3383	15	864
	N60	15.6	12052	3548	28	773
Нулевая (no-till) обработка (2008–2015 гг.)						
Зернопаровой	Контроль	13.5	6333	7167	58	627
	N45	16.6	8817	7783	40	707
Зерновой	Контроль	13.0	8408	4592	56	645
	N60	15.0	10700	4300	41	710
Бессменная пшеница	Контроль	11.4	7962	3438	42	698
	N60	15.8	11021	4779	42	698
Минимальная обработка (2008–2015 гг.)						
Зернопаровой	Контроль	13.8	6107	7693	67	591
	N45	17.1	8675	8425	52	653
Зерновой	Контроль	13.4	8187	5213	65	610
	N60	15.2	10322	4878	48	680
Бессменная пшеница	Контроль	11.9	7586	4314	55	637
	N60	15.6	10625	4975	45	681

ность в принятии решений. Она не дает количественной оценки влияния факторов в натуральных показателях, т.е. не показывает прибавку урожайности при увеличении действия фактора.

Эффективность удобрения определяется целым набором условий всей системы земледелия, из которых определяющим является севооборот, а решающим – материальные ресурсы. Поэтому для проектирования системы удобрения важно знать данные об эффективности севооборотов в сочетании с технологиями выращивания сельскохозяйственных культур и применением удобрений, а также с учетом рыночного спроса и стоимости продукции. Для выбора оптимального варианта целесообразно использовать надстройку "Поиск решения" – составной части программы EXCEL. Решение может осуществляться 3-мя методами: симплекс-методом, который используют для решения линейных задач, методом обобщенного приведенного градиента (**ОПГ**) для нелинейных задач и эволюционным, используемым для решения функциональных задач. В нашем случае используют симплекс-метод и метод ОПГ. В параметрах устанавливают целевую ячейку – максимум прибыли и ограничения по площади и финансовым ресурсам. Для условного примера были взяты данные об эффективности севооборотов в исследованиях Курганского НИИСХ на условной площади 1000 га (табл. 3).

При ограничении финансовых ресурсов "поиск" рекомендует занять поле почти целиком (947 га) зернопаровым севооборотом, в том числе с применением азотных удобрений в дозе N45–60 на площади 266 га. На 53 га площади для посева культуры не хватает ресурсов. При достаточном наличии средств преимущество зернопарового севооборота сохраняется, из 1000 га предлагается занять 740 га, но в отличие от первого варианта со значительным увеличением применения удобрений (575 га). Становятся выгодными зерновые севообороты (160 га) и бессменная пшеница (100 га), но с обязательным использованием удобрений (рис. 4).

Этот пример отражает динамический характер системы земледелия, параметры которой не могут быть постоянными, а зависят от изменения природно-климатических факторов, обеспеченности предприятий ресурсами, экономических условий производства и реализации продукции. Успешно реагировать и принимать эффективные решения в динамичном производстве позволяют цифровые технологии. Средства программирования современных приложений (готовых программ, баз данных и электронных таблиц) позволяют создавать экспертно-советующие системы, встраивая в них логику решения задачи, нормативную базу,



Показатель	Отвальная обработка						Нулевая обработка						Минимальная обработка						Сумма	Ограничение
	зернопаровой		зерновой		бессменная пшеница		зернопаровой		зерновой		бессменная пшеница		зернопаровой		зерновой		бессменная пшеница			
	контроль	N60	контроль	N60	контроль	N60	контроль	N45	контроль	N60	контроль	N60	контроль	N45	контроль	N60	контроль	N60		
Площадь, га	324,9505	178,4212	0	0	0	0	146,0406	21,53035	0	0	0	0	210,0342	65,75938	0	0	0	0	946,7363	100
Урожайность, ц/га	17,2	22	12	18,2	10,2	15,6	13,5	16,6	13	15	11,4	15,8	13,8	17,1	13,4	15,2	11,9	15,6		
Затраты, руб./га	6909	10016	8247	11519	6817	12052	6333	8817	8408	10700	7962	11021	6107	8675	8187	10322	7586	10625		
Всего затрат, тыс. руб.	2245,083	1787,067	0	0	0	0	924,875	189,8331	0	0	0	0	1282,679	570,4626	0	0	0	0	7000	700
Цена, руб./т	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000		
Стоимость зерна, руб./га	17200	22000	12000	18200	10200	15600	13500	16600	13000	15000	11400	15800	13800	17100	13400	15200	11900	15600		
Прибыль, руб./га	14954,92	20212,93	12000	18200	10200	15600	12575,13	16410,17	13000	15000	11400	15800	12517,32	16529,54	13400	15200	11900	15600		
Всего прибыли, тыс. руб.	4859,608	3606,416	0	0	0	0	1836,479	353,3166	0	0	0	0	2629,066	1086,972	0	0	0	0	14371,86	

Рис. 4. Задача в “Поиске решения” по выбору севооборота.

разнообразные условия, от которых зависит эффективность тех или иных приемов и т.п. [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ методов определения доз удобрений показал, что в сельхозпредприятии могут применять различные по точности и сложности методы. Критериями выбора для использования в алгоритмах при автоматизированном проектировании системы удобрения является возможность формализации расчета и уровень информационной обеспеченности предприятия. При низком уровне информационной обеспеченности самым простым способом установления доз является применение рекомендаций научных организаций, более точным – нормативный метод. При более высоком уровне цифровизации в предприятии и наличии базы данных агрохимических, почвенных, гидротехнических и других параметров полей, а также поправочных коэффициентов к нормативам можно применять метод элементарного баланса.

Наибольшую точность при установлении эффективности удобрений и определении их оптимальных доз в конкретных условиях, а также для формализации знаний и уточнения поправочных коэффициентов для расчетов дают полевые эксперименты, которые можно проводить как традиционными методами, что более затратно, так и с применением геоинформационных технологий (оборудования по дифференцированному внесению удобрений и картированию урожайности), которые позволяют повысить количество опытных вариантов и производительность труда.

Среди методов анализа данных апробирован и рекомендован для установления наиболее значимых факторов в эффективности технологий системно-когнитивный анализ по Е.В. Луценко.

Эффективным методом, используемым для принятия решений, является надстройка EXCEL “Поиск решения”, которая позволяет распределять ресурсы, в том числе денежные, по полям.

Для установления оптимальных доз удобрений в условиях Зауралья с учетом основных влияющих факторов предложен свой алгоритм принятия решений, основанный на результатах многолетних исследований лаборатории агрохимии Курганского НИИСХ – филиала УрФАНИЦ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кирюшин В.И., Кирюшин С.В.* Агротехнологии: Учеб-к. СПб.: Изд-тво Лань, 2015. 464 с.
2. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Колос, 2002. 584 с.
3. *Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П.* Агрохимия. Учеб-к / Под ред. Минеева В.Г. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
4. Справочник экономиста сельскохозяйственной организации. М.: Росинформагротех, 2012. 464 с.
5. *Шатилов И.С.* Основы программирования урожаев сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат, 1987. 358 с.
6. *Каюмов М.К.* Справочник по программированию урожаев. М.: Россельхозиздат, 1987. 368 с.
7. *Державин Л.М.* Оптимизация научного обеспечения интегрированного применения удобрений в интенсивном земледелии // Агрохимия. 2007. № 7. С. 5–14.
8. *Шарков И.Н.* Проблемы оптимизации минерального питания зерновых в интенсивном земледелии Сибири // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века: Сб. мат-лов Всерос. научн. конф. с международ. участием, посвящ. 110-летию выдающегося организатора науки и первого директора ИПА СО РАН Р.В. Ковалева. 2017. С. 266–271.

9. *Михайлов Н.Н.* Расчеты доз минеральных удобрений на основе агрохимических анализов почв. М.: Колос, 1966. 24 с.
10. *Кулаковская Т.Н.* Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев. Минск, 1978. 272 с.
11. *Ермохин Ю.И., Неклюдов А.Ф.* Программирование урожая в Западной Сибири: Уч. пособ. Омск: ОмскГАУ, 2002. 88 с.
12. *Болдырев Н.К.* Использование нормативных показателей в методе листовой диагностики для расчета норм удобрений на запланированный урожай пшеницы // Агрохимия. 1983. № 2. С. 105–113.
13. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / Под ред. Иванова А.Л., Державина Л.М. М., 2008. 392 с.
14. *Волынкина О.В., Волынкин В.И., Копылов А.Н., Кириллова Е.В., Лысухин Д.В.* Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья / Под ред. Волынкиной О.В. Куртамыш: ООО “Куртамышская типография”, 2017. 284 с.
15. *Кочергин А.Е.* Определение потребности зерновых культур в азотных удобрениях на черноземах Западной Сибири // Докл. ВАСХНИЛ. 1965. № 2. С. 5–8.
16. *Жукова О.А., Заргарян А.М., Степных Н.В.* Проектирование технологий выращивания сельхозкультур. Компьютерная программа для ЭВМ. Свид-во о госрегистрации № 2017617052 от 3.11.2017 г.
17. Методика проектирования системы удобрения в адаптивно-ландшафтном земледелии. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2008. 64 с.
18. *Чуян О.Г.* К вопросу определения оптимальных доз минеральных удобрений для усовершенствования базы данных при проектировании и реализации системы удобрений в адаптивно-ландшафтном земледелии // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 12. С. 70–75.
19. *Холмов В.Г., Юшкевич А.В.* Интенсификация и ресурсосбережение в земледелии лесостепи Западной Сибири. Омск: ОмскГАУ, 2006. 395 с.
20. *Копылов А.Н., Волынкина О.В., Кириллова Е.В.* Ресурсосберегающая система применения удобрений в Зауралье // Аграрн. сектор. 2018. № 2(36). С. 84–88.
21. *Рухович О.В.* Методы прогнозирования урожайности озимой пшеницы в бассейне р. Оки с использованием рельефа, климата и почв // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5-ти т. / Под ред. Сычева В.Г., Мюллера Л. М., 2018. Т. I. С. 51–56.
22. *Заргарян А.М.* Управление базой данных состояния и функционирования агроландшафтов. Компьютерная программа для ЭВМ // Свид-во о госрегистрации № 2018662258 от 03.10.2018 г. / Заргарян А.М.
23. *Якушев В.П., Лекомцев П.В., Матвеенко Д.А., Петрушин А.Ф., Якушев В.В.* Применение дистанционного зондирования в системе точного земледелия // Вестн. сел.-хоз. науки. 2015. № 1. С. 23–25.
24. *Матвеенко Д.А., Канаш Е.В., Якушев В.В., Митрофанов Е.П., Петрушин А.Ф.* Использование тестовых площадок для определения доз азотных подкормок в системе точного земледелия // Агрофизика 2016. № 4. С. 43–51.
25. *Луценко Е.В., Лаптев В.Н., Сергеев А.Э.* Системно-когнитивное моделирование в АПК: Учеб. пособ. Краснодар: Экоинвест, 2018. 518 с.

Methods of Analysis and Designing of System of Fertilizer of Spring Wheat to Formalize Decision-Making in the Conditions of Trans-Urals

N. V. Stepnykh[a,#], A. N. Kopylov[a], E. V. Nesterova[a], O. A. Zhukova[a], and A. M. Zargaryan[a]

[a] *Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences 112a Belinskiy Str., 620142, Ekaterinburg, Russia*

[#] *E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru*

The methods of analysis and design of fertilizer systems for their application in geoinformation technologies of crop management in the Trans-Urals was shown. One of the criteria for choosing the method of determining the doses of fertilizers is the possibility of formalization of the calculation. The analysis of the literature data showed that agricultural enterprises can use different methods in accuracy and complexity: the simplest recommendations of scientific organizations, more adapted – the normative method. In the presence of a database of agrochemical, soil, hydraulic and other field parameters, as well as correction factors, balance calculations can be used. Authors on the basis of long-term agrochemical experiments the expert method of determination of a dose of fertilizer on the basis of 8 leading factors influencing efficiency of fertilizers is offered. The most informative about the effectiveness of fertilizers in specific conditions give field experiments, but to carry out their traditional methods time-consuming and costly. In modern agriculture it is solved with the help of geoinformation technologies. Differentiated fertilizer application and yield mapping can improve employee productivity, significantly increase the number of experimental plots. To determine the most significant factors affecting the efficiency of fertilizers in agricultural technologies, it is advisable to use a system-cognitive analysis. With limited material resources in the economy for the rational planning of fertilizers on the fields, it is recommended to use a functional add-in in EXCEL “solution Search”.

Key words: design methods, fertilizer doses, spring wheat, balance calculation, differentiated application, production experience, Trans-Urals.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 30–37

УДК 631.81:631.46:631.445.24

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА ЧИСЛЕННОСТЬ МИКРООРГАНИЗМОВ В АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ЛУГОВО-ЛЕСНОЙ И ЛУГОВО-КОРИЧНЕВОЙ ПОЧВАХ ПОД АГРОЦЕНОЗАМИ

© 2020 г. Г. М. Мамедов

Институт почвоведения и агрохимии НАН Азербайджана
Az 1073 Баку ул. М. Рагима 5, Республика Азербайджан
E-mail: goshgarmm@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2019 г.
После доработки 05.04.2019 г.
Принята к публикации 10.11.2019 г.

Изучено влияние систем удобрения на численность микроорганизмов в аллювиальной лугово-лесной и орошаемой лугово-коричневой почвах под агроценозами в Азербайджане. Выявлена эффективность применения органических систем удобрения для повышения общей численности микроорганизмов в орошаемой лугово-коричневой и алювиально лугово-лесной почвах под агроценозами. При применении навоза 40 т/га на орошаемых лугово-коричневых почвах под яблоневым садом общее число микроорганизмов, число актиномицетов, общее число грибов и бактерий повысилось по сравнению с контролем без удобрений соответственно на 25800 тыс./г почвы, 21200 тыс., 72 тыс. и 2020 тыс.; по сравнению с минеральной системой удобрения N120P160K180 – на 21300 тыс., 19400 тыс., 56 тыс. и 1610 тыс.; по сравнению с органо-минеральной системой (N60P90K120 + навоз 20 т/га) – на 14700 тыс., 13200 тыс., 17 тыс. и 941 тыс./г почвы. В аллювиальной лугово-лесной почве под овощными агроценозами получены аналогичные результаты по влиянию органических, органо-минеральных и минеральных систем удобрения на микробиологическое состояние почв.

Ключевые слова: системы удобрения, численность микроорганизмов, аллювиальные лугово-лесные, лугово-коричневые почвы, агроценозы.

DOI: 10.31857/S0002188120020106

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация сельскохозяйственного производства оказывает большое влияние на химический состав, физическую структуру, содержание и качественный состав гумуса практически всех типов почв. Этим обусловлены значительные изменения в функционировании почвы как природной биологической системы. Исключительно чуткими индикаторами на изменения, происходящие в почве, являются микроорганизмы [1, 2].

В комплексе мер по повышению продуктивности сельскохозяйственных культур, сохранению и улучшению плодородия почв важное место занимает разработка эффективных систем удобрения. Во многих длительных опытах, проводимых в различных природных условиях, отмечено положительное действие органических органо-минеральных систем удобрения. Наибольшая урожайность культур севооборота отмечена при использовании органической и органо-минеральной систем удобрения в высоких дозах, но положительный баланс гумуса при этом обеспечивала только органо-минеральная система. Плодородие почвы, созданное в процессе длительного применения органо-минеральной системы удобрения, обладает более высоким последействием, чем сформированное с использованием только минеральной системы [1–5].

Важнейшим показателем, характеризующим плодородие почв, интенсивность проходящих в них процессов, является биологическая активность, и любые агротехнические мероприятия, направленные на повышение урожая культур и воспроизводство почвенного плодородия должны иметь почвенно-микробиологическое обоснование [1, 2, 6–9].

Почвы региона Куба-Хачмазской зоны Азербайджана недостаточно изучены в отношении особенностей микробиологических процессов, происходящих под влиянием различных агрохимических воздействий. В современных экономических условиях для устойчивого развития сельскохозяйственного производства необходимо эффективное использование пахотных земель, сохранение

плодородия почв, сбалансированное использование почвенно-климатических ресурсов и биологических факторов интенсификации растениеводства [3, 10–12].

Одним из основных приемов сохранения и повышения плодородия почв является внесение в них органических удобрений. Особенно большую роль они выполняют в поддержании определенного количества гумуса в составе почв [1, 4, 6, 7, 13].

Агрохимические и агротехнические воздействия отражаются на свойствах почвы и ее микробном населении, изменяют состав и интенсивность жизнедеятельности микроорганизмов, определяют направленность минерализации и синтеза органических соединений. Экспериментальные данные некоторых авторов [7, 8, 14, 15] показали, что связь между содержанием гумуса в почве и ее биологическими свойствами настолько тесная, что есть основания говорить о функциональной зависимости между ними. В агроценозах идет постоянное отторжение органического вещества и элементов питания урожаем биомассы. Для того чтобы не произошла деградация почвы, подбор мероприятий, компенсирующий потери, сохраняющий равновесие между процессом минерализации и синтеза органического вещества [1, 4, 6, 7, 14].

Микробные сообщества в хорошо развитой плодородной почве, находясь в состоянии устойчивого равновесия, обладают способностью сохранять свои внутренние взаимосвязи, а также формируют устойчивое микробное сообщество. Микробиологические характеристики необходимы и очень показательны при оценке плодородия почв.

В этой связи в настоящее время существует мнение, что при использовании почв необходимо иметь, наряду с агрохимической, и микробиологическую характеристику почв [2, 9, 15, 16]. Цель работы – изучение влияния систем удобрения на численность микроорганизмов в аллювиальной лугово-лесной и лугово-коричневой почвах под агроценозами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в Куба-Хачмазской зоне Азербайджана по общепринятым методам под различными агроценозами: в яблоневом саду и под овощными культурами (томатами) на орошаемой лугово-коричневой и аллювиальной лугово-лесной почвах. Агротехнические мероприятия соответствовали общепринятым агроправилам для региона [3, 11].

Перед закладкой опыта проводили агрохимическое обследование пахотного слоя почвы опытных участков. Показатели плодородия почвы определяли следующими методами: содержание гумуса – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), нитратный азот – ионометрическим методом, аммонийный – колориметрическим методом с реактивом Несслера. Подвижные формы элементов питания определяли в вытяжке Мачигина: фосфора – колориметрическим методом, обменного калия – методом пламенной фотометрии (ГОСТ 26207-91). Величину pH_{H_2O} определяли потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85) [3, 11, 12, 17].

Пахотный слой аллювиальной лугово-лесной почвы перед закладкой опыта был слабощелочным (pH_{H_2O} 7.8), с низким содержанием (по Мачигину) подвижных форм P_2O_5 и средним K_2O – 16.8 и 238 мг/кг почвы соответственно. Содержание гумуса в пахотном слое было равно 3.25%, $N\text{-}NH_4$ – 17.5, $N\text{-}NO_3$ – 9.62 мг/кг почвы.

В то же время в орошаемой лугово-коричневой почве в 1-метровом слое почвы эти показатели были следующими: гумус – 0.64–3.12%; поглощенные $N\text{-}NH_4$ – 7.35–2.01, $N\text{-}NO_3$ – 0.86–12.2 мг/кг; подвижный фосфор – 8.92–35.8, обменный калий – 72.1–264 мг/кг, что характеризовало эти почвы как слабо обеспеченные, а по степени кислотности – практически слабощелочные (pH_{H_2O} 7.5–7.8) [3, 11].

Численность микроорганизмов в почве определяли методом прямого учета люминесцентной микроскопией. Учет микроорганизмов проводили методом Хансена в модификации Мирчик. Определение общей микробной биомассы в почве проводили экстракционно-фумигационным методом [18–21].

Для определения численности микроорганизмов в почве применяли метод их учета на твердых питательных средах. Почву отбирали в 10-ти местах с каждой делянки.

После тщательного перемешивания, удаления корней и других посторонних включений отбирали средний образец массой 10 г и переносили в колбу с 90 мл стерильной водопроводной воды. Взвесь взбалтывали 15 мин. Готовили разведения 1:100 для посева грибов на среду, 1:1000 – актиномицетов на крахмал, аммиачный агар (КАА) и 1:10000 – на мясо-пептонный агар (МПА). Высевали по 0.05 мл соответствующего разведения в 2 параллельные чашки. Учет бактерий проводили через 2-е сут, актиномицетов и грибов – через 7 сут. На КАА учитывали, кроме актиномицетов,

и другие группы бактерий, усваивающих минеральный азот. Представлены средние данные за период исследования (весна, лето и осень) [6, 18–23].

В опыте изучали эффективность применения минеральных и органических удобрений в эквивалентных по азоту дозах. Агрометеорологические условия в годы проведения исследования были благоприятными для роста и развития растений.

Эффективность применения органических удобрений изучали на орошаемой аллювиальной лугово-лесной и орошаемой лугово-коричневой почвах Куба-Хачмазской зоны.

В качестве минеральных удобрений применяли: $N_{аа}$ (NH_4NO_3, 34% N), P_c ($Ca(H_2PO_4)_2$, 18% P_2O_5), сульфат калия (K_2SO_4, 46% K_2O). Органическим удобрением служил навоз КРС с влажностью 65%, содержащий в среднем 0.5% азота, 0.25% P_2O_5 и 0.55% K_2O.

Общая площадь опытного участка на орошаемой лугово-коричневой почве составила 9600 м^2, площадь питания одного дерева – 8 × 4 м (32 м^2). Повторность опыта трехкратная. В каждом варианте площадь опытной делянки 1600 м^2, общее количество деревьев (вместе с повторным вариантом) – 48 шт., из них 9 шт. – учетные (площадь – 288 м^2).

Полевые опыты на аллювиальной лугово-лесной почве под овощными культурами (томатами) были заложены в трехкратной повторности. Площадь делянки – 30 м^2, площадь одной учетной делянки – 100 м^2, площадь питания одного растения – 2.1 м^2 (70 × 30 см), в каждом варианте один ряд – защитный. Выращивали томат сорта Севимли.

В полевом опыте на лугово-лесной почве было 8 вариантов. Вся годовая доза органических удобрений (100%) внесена под вспашку осенью. Минеральные удобрения внесены в 3 срока в период вегетации томата: 1 – при посадке рассады в поле, 2 – в начале бутонизации, 3 – в начале плодоношения. В плодовых садах под яблони минеральные удобрения были внесены: 1 – в период набухания почек побегов, 2 – после цветения, 3 – при завязывании плодов.

В полевом исследовании на лугово-коричневой почве под яблоневым садом, согласно схеме опыта, были использованы следующие минеральные и органические удобрения, варианты: 1 – контроль без удобрений, 2 – навоз КРС 40 т/га – органическая система удобрения, 3 – N60P60K120 + + навоз КРС 20 т/га – органо-минеральная система, 4 – N90P120K140 + навоз КРС 10 т/га – органо-минеральная система, 5 – N120P160K180 – минеральная система удобрения.

На аллювиальной лугово-лесной почве под овощными культурами использована следующая схема, варианты: 1 – контроль без удобрения, 2 – органическая система удобрения – навоз 40 т/га, 3 – органо-минеральная система удобрений N60P90K120 + навоз 20 т/га, 4 – органо-минеральная система удобрения N90P100K140 + навоз 10 т/га, 5 – минеральная система удобрения N120P160K180. Все эксперименты были проведены в трехкратной повторности. Статистическую обработку полученных данных осуществляли по [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди биологических индикаторов, характеризующих различные аспекты состояния почвенной биоты, ведущее место занимают почвенные микроорганизмы вследствие своей высокой лабильности, исключительно четкой способности реагировать на изменения, происходящие в почве.

В настоящее время механизмы функционирования микробных сообществ в почвах выяснены еще недостаточно и требуют детализации количественно-качественных характеристик биогенности почв. Известно, что именно они обеспечивают стабильную устойчивость и продуктивность биогеоценозов.

В структуре микробной биомассы доминируют грибы, причем в орошаемых почвах (лугово-коричневых и аллювиально лугово-лесных) преобладает биомасса спор и мицелия грибов.

Внесение органических (навоза) и минеральных (азотных, фосфорных и калийных) удобрений повышает общее содержание микробной биомассы.

Почвенные микроорганизмы способны разрушать все природные органические соединения, а также ряд неприродных органических соединений. Особенности почв разных типов и различия в их плодородии во многом определяются спецификой почвенных микроорганизмов и микробиологических процессов в почве.

Климат Куба-Хачмазской зоны отличается достаточной аридностью: среднегодовое количество осадков – 350 мм, среднегодовая температура воздуха составляет 13.8°C, сумма активных температур воздуха >10°C равна 4000°C. Сельскохозяйственное использование аллювиальной лугово-лесной и орошаемой лугово-коричневой почв Куба-Хачмазской зоны Азербайджана, наряду с основными агрохимическими и водно-физическими показателями плодородия почв, изме-

Таблица 1. Изменение количества и видового состава грибов по профилю почв

Слой почвы, см	Количество, КОЕ/г	Число видов (видовой состав грибов)
Орошаемая лугово-коричневая почва (агроценоз яблоневый сад, 2016 г.)		
0–20	4.6×10^4	34 (*Actinomucor elegans, Alternaria brevicolla, Aspergillus flavus, A. niger, A. ochraceus, A. terreus, Aureobasidium pullulans, Botrytis cinerea, Chaetomium cellulloliticum, Ch. globosum, Cladosporium cladosporides, C. herbarium, Fusarium moniliforme, F. oxysporium, F. solani, Gliocladium album, G. cylindrosporum, Mucor circineloides, M. hiemalis, M. globosus, M. mucedo, Penicillium chryzogenium, P. expansum, Penicillium lanosum, P. purpureogenum, P. variabile, Rhizopus nigricans, Sordaria alpina, Trichoderma atroviride, T. harzianum, T. koningii, T. liqnorum, Verticillium alboatrum, V. dahliae*)
20–40	1.1×10^2	10 (*Actinomucor elegans, Aspergillus terreus, Mucor circineloides, M. hiemalis, M. racemosus, Fusarium solani, F. oxysporum, Trichoderma atroviride, T. harzianum, T. koningii*)
40–60	84	2 (*Mucor circineloides, M. hiemalis*)
Орошаемая аллювиально лугово-лесная почва (агроценоз овощные культуры (томат), 2016 г.)		
0–20	3.1×10^4	22 (*Actinomucor elegans, Alternaria alternata, Aspergillus flavus, A. niger, A. ochraceus, A. terreus, Botrytis cinerea, Chaetomium globosum, Cladosporium cladosporides, C. herbarium, Fusarium moniliforme, F. oxysporium, Gliocladium album, Mucor circineloides, M. globosus, Penicillium chryzogenium, P. purpureogenum, Rhizopus nigricans, Sordaria alpina, Trichoderma atroviride, T. harzianum, T. koningii, T. liqnorum, Verticillium alboatrum*)
20–40	07×10^2	7 (*Actinomucor elegans, Aspergillus ochraceus, A. terreus, Mucor circineloides, M. racemosus, Fusarium oxysporum, Trichoderma atroviride*)
40–60	84	1 (*Mucor circineloides*)

няет их общую биологическую активность, которая в основном обусловлена деятельностью почвенной микрофлоры [3].

Перед закладкой опыта в орошаемой лугово-коричневой почве под агроценозами (яблоневый сад) и в аллювиально лугово-лесной почве под овощными культурами (томат) изучено изменение количества и видового состава грибов по профилю почв (табл. 1). В слое 0–20 см лугово-коричневой почвы установлено 34 вида в общей численности грибов, количество которых составило 4.6×10^4 КОЕ/г подавляющих видов, в основном *Actinomucor elegans*, *Altenaria brevicolla* и *Aspergillums flavus*.

В слое 20–40 см почвы состав и численность грибов значительно уменьшились. Например, в слое 0–20 см численность грибов снизилась до 1.1×10^2 КОЕ/г почвы и осталось всего 10 видов. В слое 40–60 см почвы всего осталось всего 84 КОЕ/г и 2 вида грибов (*Mucor circineloides* и *M. hicmalis*).

Также было изучено изменение количества и видового состава грибов по профилю почв в аллювиально лугово-лесной почве (агроценоз, овощные культуры (томат). По сравнению с орошаемой лугово-коричневой почвой в этих почвах видовой состав грибов сократился до 22 видов в верхнем слое 0–20 см почвы, их количество составило 3.1×10^4 КОЕ/г почвы.

В слое 20–40 см почвы число и видовой состав грибов значительно сократился, что составило 22 вида и 07×10^2 КОЕ/г почвы, в слое 10–60 см почвы был обнаружен только один вид (*Mucor circineloides*) в количестве 84 КОЕ/г почвы. Таким образом, установлено видовое и количественное сокращение численности грибов с глубиной профиля. Выявлено благоприятное развитие грибов в верхних слоях почв, которые обеспечивали микроорганизмы теплом и воздухом.

Также было проведено исследование по изучению влияния различных систем удобрения на численность, количественный состав микрофлоры в орошаемой лугово-коричневых почвах (табл. 2).

Исследование показало, что общая численность микроорганизмов варьировала в вариантах опыта от 11300 тыс. до 37200 тыс./г почвы. Бóльшая численность микроорганизмов выявлена при применении органической системы удобрения, где был применен навоз КРС в дозе 40 т/га (37200 тыс./г почвы).

Высокие численность актиномицетов, общее количество грибов и бактерий также отмечено в этом варианте, что составило соответственно 22800, 108 и 6880 тыс./г почвы. Определено долевое содержание актиномицетов от общего числа микроорганизмов, которое составило 61.3%. Это была самая высокая численность актиномицетов, которую наблюдали в общем составе микроорганизмов в исследованной почве.

Таблица 2. Влияние систем удобрения на численность микроорганизмов в почвах (средние за 3 года)

Вариант	Общее количество микроорганизмов	Актиномицеты	Актиномицеты, %	Общее количество грибов	Общее количество бактерий
	тыс./г почвы			тыс./г почвы	
Орошаемая лугово-коричневая почва под агроценозами (слой 0–30 см)					
1. Без удобрения (контроль)	11300	16200	14.3	36	4850
2. Органическая система удобрения навоз 40 т/га	37200	22800	61.3	108	6880
3. Органо-минеральная система удобрения N60P90K120 + навоз 20 т/га	22400	9600	42.8	91	5940
4. Органо-минеральная система удобрения N90P100K140 + навоз 10 т/га	18100	6060	33.5	79	5430
5. Минеральная система удобрения N120P160K180	15800	3420	21.6	52	5300
$НСР_{05}$	20	10	–	3	10
Аллювиально лугово-лесная почва под агроценозами (слой 0–30 см)					
1. Без удобрения (контроль)	9215	1180	12.8	32	3997
2. P90K120 (фон)	11156	2164	19.4	46	4543
3. Фон + N75	13723	3458	25.2	49	4692
4. Фон + навоз 15 т/га	14342	4503	31.4	52	4874
5. Фон + N90	15276	5647	34.7	71	5075
6. Фон + N45 + навоз 9 т/га	16638	7194	38.6	83	5312
7. Фон + N120	17984	9057	41.2	85	5563
8. Фон + N60 + навоз 12 т/га	19767	11899	49.3	89	5747
9. Навоз 24 т/га	26254	14360	54.7	92	5996
$НСР_{05}$	17	11	–	2.9	13

Органо-минеральная система удобрения (N60P90K120 + навоз 20 т/га) также положительно влияла на общее число микроорганизмов, грибов, бактерий и актиномицетов. В этом варианте общая численность микроорганизмов составляла 22400 тыс./г почвы, общая численность грибов – 91 тыс., общая численность бактерий – 5940 тыс./г почвы. Численность актиномицетов была равна в этом варианте 9600 тыс./г почвы или 42.8% от общего числа микроорганизмов.

Уменьшение доли органических удобрений в составе органо-минеральных систем удобрения привело к снижению общего числа микроорганизмов, в том числе актиномицетов, грибов и бактерий.

При применении только минеральной системы удобрения в дозе N120P160K180 в отличие от органической и органо-минеральной систем удобрения отмечена самая низкая численность микроорганизмов в исследованных почвах, в том числе грибов, актиномицетов и бактерий по сравнению с контрольным (без удобрения) вариантом. Разница с контролем общей численности микроорганизмов составила 4490 тыс./г почвы, тогда как в варианте с применением органической системы удобрений (навоз 40 т/га) разница была гораздо больше. Например, в этом варианте общая численность микроорганизмов повысилась на 25800 тыс./г почвы. Разница с контрольным вариантом численности актиномицетов, общей численности грибов и бактерий составила соответственно 21200, 72 и 2020 тыс./г почвы соответственно.

Изучено также влияние различных систем удобрения на численность микроорганизмов в аллювиальной лугово-лесной почве под агроценозами (табл. 2). Показано, что различные системы удобрения по-разному влияли на общую численность бактерий, грибов и актиномицетов.

В фоновом варианте при применении минеральной системы удобрения P90K120 общая численность микроорганизмов составляла 11200 тыс./г почвы, при добавлении к фону азотных удобрений в дозах N75, N90 и N120 повысилась числен-

ность микроорганизмов соответственно до 13700, 15300 и 18000 тыс./г почвы, при замене эквивалентного количества азотных удобрений на органические увеличилось общее число микроорганизмов. Например, в вариантах фон + N75 и фон + + навоз 15 т/га при замене навоза эквивалентным количеством азота (N75) общее число микроорганизмов при использовании навоза 15 т/га составило 14400 тыс./г почвы и повысилось при применении минеральных удобрений (вариант фон + + N75) на 619 тыс./г почвы.

Повышение доз азотных и органических удобрений в варианте фон + N45 + навоз 9 т/га положительно влияло на общее число микроорганизмов, численность актиномицетов и общее число грибов и бактерий. В варианте фон + N90 (без органического удобрения) общее число микроорганизмов составляло 15300 тыс./г почвы. При замене части минерального азотного удобрения эквивалентным количеством органического (фон + + N45 + навоз 9 т/га) заметно повысилось общее число микроорганизмов, численность актиномицетов, общее число грибов и бактерий. Увеличение составило соответственно 16600 тыс., 71900 тыс., 83 тыс. и 5310 тыс./г почвы. Общее число микроорганизмов повысилось на 1360 тыс., актиномицетов – на 1550 тыс., общее число грибов – на 12 тыс. общее число бактерий – на 237 тыс./г почвы.

Увеличение доз азотных (минеральных) и органических (навоз) удобрений при их совместном внесении положительно влияло на численность микроорганизмов, в том числе актиномицетов, грибов и бактерий.

При применении органических систем удобрения (навоз КРС) в дозе 24 т/га была выявлена высокая численность микроорганизмов в исследованных почвах. Например, в этом варианте общее число микроорганизмов составляло 26300 тыс., число актиномицетов – 14400 тыс. или 54.7% от общего количества микроорганизмов. Общее число грибов составляло 92 тыс., общее число бактерий – 6000 тыс./г почвы. Внесение в почву удобрений не только улучшало питание растений, но и изменяло условия существования в ней почвенных микроорганизмов, которые также нуждаются в минеральных элементах питания. При благоприятных климатических условиях количество микроорганизмов и их активность после внесения органического удобрения значительно возрастали. Усиливался распад гумуса, вследствие чего увеличивалась мобилизация азота, фосфора и других элементов. Внесение минеральных удобрений в основном способствовало развитию в почве автотрофной микрофлоры.

Изменяя реакцию почвы в благоприятную (при внесении навоза) сторону, было нейтрализовано вредное влияние физиологически кислых минеральных удобрений, примененных в органо-минеральной системе удобрения. Микрофлора почвы и растения реагировали на изменение почвенного фона примерно одинаково.

Таким образом, действие органической и органо-минеральной систем удобрения оказывало положительное влияние на структуру микробного сообщества. Улучшился качественный состав бациллярного населения. Наибольшее разнообразие спороносной микрофлоры, актиномицетов отмечено при внесении органической системы удобрения в дозе навоз 24 т/га.

Внесение органических удобрений поддерживало энергетические потребности гетеротрофной части микробиоценоза, в связи с чем микробная система находились в активном состоянии. Благоприятные изменения в составе микрофлоры почвы наблюдали при совместном внесении органических и минеральных удобрений. Интенсивный рост микроорганизмов, развивавшихся за счет минеральных форм азота, был обусловлен уменьшением содержания подвижных и водорастворимых форм органического вещества.

В исследованных почвах под овощными агроценозами и под яблоневым садом наиболее благоприятный микробиологической состав среды в зависимости от быстрого развития и роста численности складывался при использовании органической и органо-минеральной систем удобрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено изменение количества и видового состава грибов по профилю почв и охарактеризована микробная флора в орошаемой лугово-коричневой и аллювиально лугово-лесной почвах под агроценозами. В орошаемой лугово-коричневой почве в зависимости от глубины выявлено 34, в аллювиально лугово-лесной почве – 22 вида грибов с численностью соответственно 4.6×10^4 и 3.1×10^4 КОЕ/г в слое 0–20 см почвы. Только 2 вида грибов (*Musor circineloidos* и *M. heimalis*) с численностью 84 КОЕ/г почвы были отмечены в слое 40–60 см исследованных почв. В орошаемых лугово-коричневых и лугово-лесных почвах установлено видовое и количественное сокращение численности грибов по глубине почвенного профиля.

Эксперимент на орошаемой лугово-коричневой почве под яблоневым садом показал положительное действие органической и органо-минеральной систем удобрения. Выявлена эффектив-

ность органической системы удобрения в орошаемой лугово-коричневой почве по общей численности микроорганизмов. Наилучшие показатели численности микроорганизмов установлены при применении органической и органо-минеральной систем удобрения. Вариант с внесением навоза 40 т/га превосходил по численности микроорганизмов контрольный вариант без удобрений, а также варианты с применением минеральной и органо-минеральной систем удобрения. В этом варианте общее число микроорганизмов, число актиномицетов, общее число грибов и бактерий повысилось по сравнению с контролем соответственно на 25800 тыс., 21200 тыс., 72 тыс. и 2020 тыс./г почвы: в сравнении с минеральной системой удобрения – на 21300 тыс., 19400 тыс., 56 тыс. и 1610 тыс., в сравнении с органо-минеральной системой удобрения (N60P90K120 + навоз 20 т/га) соответственно на 14700, 13200, и 17 и 941 тыс./г почвы.

Варианты органо-минеральных систем удобрения превосходили по численности микроорганизмов контроль и варианты применения минеральных систем удобрения. При минеральной системе удобрения N120P160K180 общее число микроорганизмов, число актиномицетов, общее число грибов и бактерий повышалось по сравнению с контролем на 4490, 1800, 16 и 412 тыс./г почвы соответственно. При применении органо-минеральной системы удобрения (N60P90K120 + + навоз 20 т/га) эти показатели повысились по сравнению с контролем на 11100, 7980, 55 и 1080 тыс./г почвы, по сравнению с минеральной системой удобрения (N120P160K180) –на 6600, 6180, 39 и 670 тыс./г почвы соответственно.

Совместное применение минеральных и органических удобрений также улучшало состояние и численность микробного населения в алювиально лугово-лесных почвах под культурой томата. Органо-минеральная система удобрения положительно влияла на общее число микроорганизмов, грибов и бактерий, а также число актиномицетов, которое составляло в варианте P90K120(фон) + N60 + навоз 12 т/га соответственно 19800, 89, 5750 и 49.3 тыс./г почвы. Установлено, что в этом варианте общее число грибов, общее число микроорганизмов, число актиномицетов было больше на 57, 10600, 10700 тыс./г почвы по сравнению с неудобренным вариантом. Численность бактерий повысилась по сравнению с контролем на 1750 тыс./г почвы.

Использование систем удобрения (органических, минеральных и органо-минеральных) на аллювиальной лугово-лесной почве под овощными культурами также изменило общую численность микроорганизмов, число актиномицетов, общее число грибов и бактерий, а также их видовой состав. По сравнению с контролем без удобрения при применении различных систем минерального и органического и органо-минерального удобрения общее число микроорганизмов повысилось (тыс./г почвы) и варьировало от 11200 до 26300 тыс., число актиномицетов – от 2160 до 14400 тыс., общее число грибов – от 46 до 92 тыс., общее число бактерий – от 4540 до 6000 тыс./г почвы При применении органической системы удобрения в дозе навоз 24 т/га отмечены максимальные общее число микроорганизмов, доля актиномицетов, общее число грибов и бактерий в исследованной почве. При применении органической системы удобрения (навоз 24 т/га) эти показатели превосходили все варианты опыта, и было выявлено положительное влияние на общее число микроорганизмов, грибов и бактерий соответственно на 17000, 60 и 2000 тыс./г почвы. Численность актиномицетов повысилась на 13200 тыс./г почвы по сравнению с контролем.

Доля актиномицетов от общего числа микроорганизмов повысилась при применении органической и органо-минеральной систем удобрения в орошаемой лугово-коричневой и аллювиальной лугово-лесной и почвах. При органической системе удобрения (навоз 24 т/га) в лугово-лесной почве под овощными культурами установлено увеличение численности актиномицетов по сравнению с контролем на 41.9% от общего числа микроорганизмов, а в орошаемой лугово-коричневой почве под яблоневым садом при применении навоза 40 т/га – соответственно на 47%. Таким образом, применение различных систем удобрения приводило к количественным и структурным изменениям пула микроорганизмов в агроландшафтах Куба-Хачмазской зоны. Совместное использование минеральных и органических удобрений оказало стимулирующее действие на развитие бактериального и грибного комплекса орошаемой лугово-коричневой и аллювиальной лугово-лесной почвы, повысив общую биогенность почв по сравнению с неудобренным вариантом. Дополнительное поступление органического вещества при использовании навоза оптимизировало микробиологическое состояние пахотного горизонта почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Славкина В.П.* Влияние систем удобрения и извести на микробиологическую активность почвы // ФГБНУ Сахалинский НИИСХ. Южно-Сахалинск, 2015. С. 94–104.
2. Влияние минеральных удобрений на почвенные микроорганизмы. www.aqroinf.com

3. *Мамедов Г.М.* Влияние разных систем удобрения на агрегатный состав аллювиальных лугово-лесных и лугово-коричневых почв сухих субтропиков Азербайджана // Почвовед. и агрохим. 2017. № 2(59). С. 76–87.
4. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П.* Длительное применение органических и минеральных удобрений при оптимизации их доз и сочетаний на легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2006. № 10. С. 33–40.
5. *Звягинцев Д.Г.* Минеральные удобрения как фактор антропогенного воздействия на почвенную микрофлору // Микроорганизмы и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 47–83.
6. *Зинченко М.К., Бибик Т.С., Стоянова Л.Г.* Влияние систем удобрения на структуру и изменение отдельных физиологических групп микроорганизмов в серой лесной почве Владимирского ополья // Фундамент. исслед-я. 2014. № 12. С. 552–557. URL: http// www.fundamental-research.ru/ru/article/
7. Влияние минеральных и органических удобрений на микроорганизмы и плодородие почвы. www.aqroinf.com
8. *Самутенко Л.В., Славкина В.П.* Динамика агрохимических и микробиологических показателей плодородия, лугово-дерновой почвы Сахалина при использовании систем удобрения разной степени интенсивности и мелиоранта // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 3. С. 28–37.
9. www.cyberleninka.ru/article
10. *Исмаилов Н.М.* Экология и культура. Баку: Элм, 2006. 775 с.
11. *Мамедов Г.Ш.* Основные принципы определения оценки плодородия почв в Азербайджане // Изв. АН Аз.ССР, сер. биол. науки. 1980. № 3. С. 49–52.
12. *Исмаилов Н.М.* Практическая экотехнология. Баку: ТПП “Техсил”, 2009. 582 с.
13. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Козлова А.В., Макшакова О.В., Волошин С.П., Панкратенкова П.В.* Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2012. № 2. С. 37–46.
14. *Кауричев И.С., Лыков Р.М.* Проблема гумуса пахотных почв при интенсивном земледелии // Почвоведение. 1979. № 12. С. 5–14.
15. www.geologika.ru
16. *Алиева Л.А., Бабаева И.Х., Касумова С.Ю.* Микробиологическая характеристика почв и грунтов на трассах газопроводов различных регионов Азербайджана // Сб. мат-лов III Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 85-летию Астрахан. гос. ун-та. Астрахань, 2017. С. 7–11.
17. *Новоселов С.И., Толмачев Н.И.* Влияние минеральных удобрений на условия питания и урожайность озимой ржи // Агрохимия. 2017. № 8. С. 48–52.
18. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
19. *Емцев В.Т., Мишустин Е.Н.* Удобрение и микробиологические процессы в почве // Микробиология. М.: Колос, 1993. С. 294–308.
20. *Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И.* Практикум по микробиологии. М.: Агропромиздат, 2004. 238 с.
21. *Алиева Л.А.* Микробиологическая оценка почв Азербайджана с различным функциональным назначением: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Баку, 2018. 22 с.
22. *Мишустин Е.Н.* Ассоциации почвенных микроорганизмов. М.: Наука, 1975, 175 с.
23. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
24. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 352 с.

Impact of Fertilizer Complex on Microorganizms Quantity in Alluvial-Meadow-Forest and Meadow-Brown Soils under Agrocenosis

G. M. Mammadov

Institute of Soil Science and Agrochemistry of ANAS
M. Rahim str. 5, Az.1073, Baku, Azerbaijan
E-mail: goshgarmm@mail.ru

The impact of fertilizer complex on microorganisms quantity in alluvial meadow-forest soils in irrigative meadow-brown soils of the apple garden has been studied. The efficiency of fertilizer organic system application on total quantity increase of microorganisms under agrocenosis has been revealed. Under an application of 40 t/ha, manure a total quantity of microorganisms, actinomyces and fungus rose in comparison with the control accordingly – 25800000; 21200000 72000 and 2020000, with the mineral system of fertilizer (N120P160K180) – 21300000, 19400000, 56000 and 1610000 but with organo-mineral system of fertilizes (N120P160K180 + organic fertilizer 20 t/ha) the increase formed accordingly – 1470000, 13200000, 17000 and 941000 per 1 gram of soil. The analogous results have been got under vegetable agrocenosis in alluvial meadow-forest soils under an influence of organic, organo-mineral and mineral system of fertilizers on soil microbiological condition.

Key words: complex fertilizer, microorganisms quantity, alluvial meadow-forest and meadow-brown soils of agrocenosis.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 38–46

Агроэкология

УДК 546.16:631.416.3:631.47(571.1)

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ФТОРА В ПОЧВАХ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПРИ ИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

© 2020 г. В. Н. Якименко[1,*], Г.А. Конарбаева[1], В.С. Бойко[2], А.Ю. Тимохин[2]

[1] Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия
[2] Омский аграрный научный центр
644012 Омск, просп. Королева, 26, Россия
*****E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru*

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.
После доработки 02.12.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

В стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири показано, что многолетнее экстенсивное сельскохозяйственное использование почв слабо отразилось на содержании в них валового фтора. Длительное внесение фторсодержащих фосфорных удобрений в дозах 60–90 кг/га/год привело к достоверному повышению в пахотном слое почв содержания валового (на 15–45% от исходного) и водорастворимого (на 1.0–1.5 мг/кг) фтора. Несмотря на многолетний положительный баланс фтора в агроценозах с систематическим использованием фосфорных удобрений, его концентрация в почвах и растительной продукции не превысила действующие нормативные показатели.

Ключевые слова: почва, агроценоз, удобрения, валовой и подвижный фтор, баланс фтора, лесостепь, Западная Сибирь.

DOI: 10.31857/S0002188120040122

ВВЕДЕНИЕ

Сельскохозяйственное использование почвы может оказывать существенное влияние как на отдельные количественные и качественные почвенные характеристики, так и на экологическое состояние агроландшафта в целом. Особая роль в этом процессе принадлежит средствам химизации, научно обоснованное применение которых оптимизирует циклы биогенных макро- и микроэлементов в агроценозах, способствует сохранению и повышению плодородия почвы, усиливает адаптационный потенциал растений к неконтролируемым факторам внешней среды. Вместе с тем внесение минеральных удобрений оказывает разноплановое влияние на окружающую среду из-за содержащихся, зачастую токсичных примесей, физиологической кислотности и других нежелательных свойств. Характерной особенностью большинства минеральных удобрений является наличие в них сопутствующих балластных элементов, в т.ч. галогенов и тяжелых металлов. Например, достаточно широко применяемые в земледелии фосфорные удобрения в зависимости от исходного сырья и технологии производства могут содержать до 1–4% фтора [1, 2]. Следует отметить, что фтор является довольно важным микроэлементом для животных и человека, участвующим в различных физиологических процессах. Однако роль фтора в метаболизме растений однозначно не установлена [3], а повышенные его концентрации приводят к торможению роста и развития растений, снижению их продуктивности. В ряде работ показано, что при избыточном поступлении и накоплении фтора в окружающей среде он может оказывать негативное воздействие на свойства почвы, качество растительной продукции и здоровье людей [3–7].

Данные изучения влияния сельскохозяйственного использования почвы, вообще, и вносимых фосфорных удобрений, в частности, на почвенное содержание фтора довольно ограничены, особенно для условий Западной Сибири, и посвящены в основном действию фосфогипса при мелиорации солонцов [8, 9]. В этой связи выявление региональной специфики трансформации фонда фтора в почвах агроценозов имеет важное агрохимическое и экологическое значение.

Цель работы – в длительных стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири оценить изменения содержания фтора в почвах при их сельскохозяйственном использовании.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили почвы лесостепной зоны Западной Сибири – лугово-черноземная (южная лесостепь) и серая лесная (северная лесостепь).

Полевой опыт на исходно целинной лугово-черноземной тяжелосуглинистой почве был заложен в 1978 г. на научно-исследовательском стационаре СибНИИСХоза (Омская обл., Омский р-н). На одном участке почвы в севообороте выращивали преимущественно многолетние и однолетние травы и травосмеси (далее – кормовой севооборот), параллельно на другом – зерновые культуры и травосмеси (зернотравяной севооборот). В опытах разрабатывали приемы повышения продуктивности выращиваемых культур при орошении [10]. В данном сообщении рассмотрены 2 наиболее контрастных варианта опытов – без удобрений и с внесением NP; в связи с очень высоким содержанием калия в исследованной почве (обменного – 60 мг/100 г) калийные удобрения не применяли. Побочная продукция зерновых и зернобобовых культур – солома, при уборке ее разбрасывали по полю, данные продуктивности конкретных культур по годам опыта опубликованы ранее [10].

Полевой опыт на исходно целинной серой лесной среднесуглинистой почве был заложен в 1988 г. на научно-исследовательском стационаре ИПА СО РАН (Новосибирская обл., Искитимский р-н). Выращивали овощные культуры в севообороте до 2000 г., затем картофель в бессменной посадке. В опытах изучали влияние интенсивности калийного баланса на эколого-агрохимическое состояние агроценозов [11, 12]. В настоящем сообщении рассмотрены наиболее контрастные варианты данного опыта: без удобрений, NP и NPK. В опытах учитывали и убирали с делянок как основную, так и побочную продукцию выращенных культур. Полученная в опыте в различные годы продуктивность основной и побочной продукции конкретных культур приведена в работах [11, 12]. Для суммирования продуктивности различных выращенных культур, полученной за годы проведения опытов, она выражена в кормовых единицах (**к.е.**).

Удобрения вносили в форме $N_{аа}$, $P_{сд}$ и $K_{х}$, ежегодно, с учетом потребности конкретной выращиваемой культуры. Закладку и проведение опытов осуществляли по общепринятой методике, повторность в опытах четырехкратная. Агрохимические анализы почвы проводили общепринятыми, стандартными методами [13, 14]: гумус определяли по Тюрину, pH-потенциометрическим методом, подвижный фосфор – по Чирикову, обменные катионы (Ca, Mg, K) – в вытяжке 1 М раствора CH_3COONH_4. Валовой фтор в почвенных образцах определяли спектрофотометрическим методом с анализарин-комплексоном без предварительной отгонки [15], водорастворимый фтор – методом потенциометрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация минерального питания растений в опытах посредством рационального систематического применения удобрений способствовала значительному росту продуктивности выращиваемых культур (табл. 1), относительно увеличивающемуся по мере возрастания продолжительности сельскохозяйственного использования почв. Например, на лугово-черноземной почве, исходно достаточно высоко плодородной, средняя продуктивность культур за время проведения опытов в контрольных вариантах (без удобрений) кормового и зернотравяного севооборотов составила 34–37 ц к.е./га, тогда как при внесении оптимальных доз NP-удобрений – 53–55 ц.

Эффективное плодородие серой лесной почвы было заметно меньше по сравнению с лугово-черноземной. Однако одностороннее внесение NP-удобрений в серую лесную почву было малоэффективным (среднегодовая продуктивность в контроле и NP-варианте равна соответственно 65 и 76 ц/га), очевидно, в связи с лимитированным калийным питанием растений. Сбалансированное внесение минеральных удобрений в варианте NPK способствовало существенному росту продуктивности овощных культур и картофеля (среднегодовая – 114 ц к.е./га). Результаты проведенных нами длительных полевых опытов подтверждают безальтернативность научно обоснованного применения минеральных удобрений в агроценозах для оптимизации как продуктивности культур, так и агрохимических свойств почвы.

Длительное сельскохозяйственное использование почвы, как интенсивное, так и экстенсивное, неизбежно отражается в той или иной степени на почвенных физико-химических свойствах, что может повлиять на процессы трансформации фонда содержащихся в ней макро- и микроэлементов, в т.ч. и фтора. Различная интенсивность использования минеральных удобрений в вариантах проведенных опытов, специфика отдель-

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

Вариант	Суммарная продуктивность, ц к.е./га	Внесено с удобрениями, кг д.в./га		
		азот	фосфор	калий
Лугово-черноземная почва				
Кормовой севооборот (1978–2019 гг.)				
Без удобрений	1580	–	–	–
NP	2150	2740	3290	–
Зернотравяной севооборот (1978–2019 гг.)				
Без удобрений	1390	–	–	–
NP	2130	3140	2800	–
Серая лесная почва				
Овощные культуры и картофель (1988–2019 гг.)				
Без удобрений	1990	–	–	–
NP	2320	3820	2180	–
NPK	3470	3820	2180	6060

Таблица 2. Изменение некоторых агрохимических свойств исследованных почв в длительных полевых опытах (слой 0–20 см)

Вариант	Гумус, %	pH_{H_2O}	Подвижный фосфор	Обменные катионы		
				Ca	Mg	K
			мг/ 100 г почвы			
Лугово-черноземная почва (1978–2019 гг.)						
Целина	6.5	6.8	13	644	58	60
Без удобрений	6.2	7.1	12	598	56	33
NP	6.6	7.0	25	630	53	32
$НСР_{05}$	0.3	0.2	4	68	5	5
Серая лесная почва (1988–2019 гг.)						
Целина	4.9	7.3	18	405	15	12
Без удобрений	3.0	7.1	10	367	13	7
NP	3.1	6.7	55	336	10	7
NPK	3.4	6.8	48	301	8	19
$НСР_{05}$	0.3	0.3	5	28	3	3

ных культур и технологии их выращивания соответствующим образом обусловливали изменения эффективного плодородия исследованных почв (табл. 2).

Содержание гумуса в лугово-черноземной почве в результате многолетнего возделывания изменилось мало, что связано, вероятно, со значительной долей орошаемых трав в структуре посевов и, соответственно, поступлением в почву большого количества корневых и пожнивных остатков. Минерализация в верхнем почвенном слое растительной биомассы способствовала сохранению содержания катионов кальция и магния на уровне целинной почвы [10]. Величина pH исследованной почвы за время проведения опыта несколько возросла – на 0.2–0.3 ед. В наибольшей степени изменения свойств почвы коснулись фонда зольных элементов – фосфора и калия: содержание подвижного фосфора в вариантах с его внесением увеличилось в 2 раза по сравнению с исходной почвой, а содержание обменного калия при перманентном дефиците его баланса аналогично снизилось.

В вариантах опыта на серой лесной почве содержание гумуса резко снизилось по сравнению с целиной, что, вероятно, обусловлено перманентной минерализацией почвенного органического вещества при небольшом поступлении растительного материала. При этом в варианте NPK содержание гумуса было больше, чем в контроле и в NP-варианте, что связано, очевидно, с более высокой продуктивностью (табл. 1) при оптимизированном питании культур и соответствующем поступлении в почву растительных остатков.

Реакция среды почвы контрольного варианта за время проведения опыта мало изменилась относительно целины, а в вариантах с внесением азотных удобрений заметно снизилась. Дополнительное использование калийных удобрений не отразилось на кислотности почвы по сравнению с внесением NP-удобрений. Содержание подвижного фосфора в почве контрольного варианта значительно снизилось по сравнению с целиной, а в результате систематического длительного применения фосфорных удобрений – существенно возросло. Аналогичная ситуация отмечена с калийным состоянием почвы при внесении или не внесении калия (табл. 2).

Сельскохозяйственное использование почвы и систематическое внесение минеральных удобрений отразилось на почвенном содержании обменных катионов. Оптимизация калийного состояния почвы и сопутствующий ей рост продуктивности растений привели к заметному уменьшению уровня обменного кальция и особенно магния. Следует отметить, что все изменения указанных почвенных агрохимических свойств во всех вариантах опытов произошли, главным образом, в слое 0–20 см почв.

Кроме того, в проведенных ранее исследованиях [16] установлено некоторое утяжеление гранулометрического состава пахотного слоя почв опытов в условиях агроценоза, за счет интенсификации процессов дробления мелкопесчаной фракции.

Выявленные в длительных опытах изменения почвенных свойств способны повлиять на трансформацию соединений фтора, поведение которого во многом определяется содержанием глинистых минералов, величиной pH, концентрацией щелочноземельных элементов и фосфора [3, 4, 7, 8].

Фтор является наиболее химически активным элементом в ряду галогенов, образующим множество различных соединений. Большинство из них плохо растворимы, что является фактором, лимитирующим миграцию фтора в профиле почвы; интенсивность его водной миграции значительно меньше, чем других галогенов. Например, коэффициент водной миграции фтора составляет 1.6, тогда как других галогенов, для сравнения: хлора – 644, брома – 203, йода – 99 [17]. Валовое содержание фтора в почвах лесостепи Западной Сибири в среднем составляет 338 мг/кг, при варьировании от 120 до 480 мг/кг [18] и тесно зависит от гранулометрического и минералогического состава почв. Связи между содержанием в почвах фтора и гумуса не установлено [8], что связано со слабой способностью органического вещества почвы сорбировать фтор и малочисленностью возможных реакций между ними в почвенных условиях.

Содержание валового фтора в верхнем слое 0–20 см исследованных целинных почв было прямо пропорционально их гранулометрическому составу, составляя 220–230 мг/кг серой лесной почвы и 340–350 мг/кг лугово-черноземной (табл. 3). Данные величины вполне укладываются в характерный для региона интервал показателей, свидетельствуя о типичности фонда фтора в изученных почвах. Ниже по профилю, в слое 20–40 см содержание фтора в обеих почвах несколько возрастало, вероятно, в связи с соответствующим утяжелением гранулометрического состава.

Длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование почв слабо отразилось на содержании валового фтора. В лугово-черноземной почве отмечена слабая тенденция к его снижению, что связано, возможно, с выносом урожаями и воздействием орошения. В контрольном варианте опыта в серой лесной почве содержание фтора не изменилось. Резкое уменьшение содержания гумуса в данной почве по сравнению с целиной не повлияло на общий фонд фтора, свидетельствуя о его инертности к почвенному органическому веществу.

Многолетнее систематическое внесение фосфорных удобрений заметно отразилось на уровне содержания фтора в почве агроценозов (табл. 3). В вариантах NP опытов на лугово-черноземной почве содержание валового фтора в пахотном слое возросло на 34–43 мг/кг или на 10–13% по сравнению с контрольными вариантами. В серой лесной почве содержание валового фтора повысилось еще существеннее – в вариантах NP и NPK на 93–110 мг/кг или на 42–49% относительно контроля. Ниже по профилю количество валового фтора в различных вариантах опыта в соответствующих почвах практически не различалось.

В проведенных ранее исследованиях внесение фторсодержащих удобрений и мелиорантов в пахотный слой почвы, как правило, не приводило к увеличению его содержания в нижележащих сло-

ях почвенного профиля по сравнению с контрольным вариантом [9, 19]. В опытах [8] по мелиорации солонцов фосфогипсом валовое содержание фтора в почве при внесении различных доз мелиоранта возросло лишь в слое 0–10 см. Очевидно, что основная фиксация поступающего в почву фтора (илистой фракцией, полуторными оксидами и др.) происходит непосредственно в зоне внесения. Такая ситуация обусловлена высокой химической активностью фтора, который при поступлении в почву быстро и прочно связывается ее компонентами. В этой связи следует отметить слабую растворимость флюорита (CaF_2), селлаита (MgF_2), а также фторидов алюминия и железа [3, 4, 7, 8].

Таким образом, существенное накопление валового тора в исследованных суглинистых почвах происходило только в результате многолетнего использования фосфорных удобрений; относительно тяжелый гранулометрический состав данных почв способствовал указанному процессу. Длительное выращивание различных культур, в том числе и при орошении, определенные изменения в почвах содержания гумуса, обменных катионов, реакции среды слабо отразились на почвенном содержании валового фтора.

В связи с отсутствием установленной по ГОСТу предельно допустимой концентрации (**ПДК**) на фтор, зачастую ориентируются на литературные данные, в соответствии с которыми допустимым уровнем содержания валового фтора в почве принято считать до 500 мг F/кг, критическим – от 500 до 1000, недопустимым – >1000 мг/кг [20]. Согласно этим данным, валовое содержание фтора в почвах наших опытов с длительным внесением фосфорных удобрений следует оценить как соответствующее допустимому уровню.

Содержание валового фтора в почве дает представление о его общих запасах, однако поведение этого элемента в системе почва–растение–животное–человек определяется концентрацией подвижной формы элемента, т.е. количеством фторид-анионов, не связанных прочно с компонентами почвы и способных к миграции.

Наиболее мобильной фракцией подвижного пула фтора является его водорастворимая часть. В почвах земледельческой зоны Сибири, по данным ряда авторов [8, 17, 21, 22], содержание водорастворимого фтора значительно варьирует – от 0.8–1.0 до 6.2–7.2 мг/кг и более, с максимумом в интразональных почвах, возрастая по мере их засоленности.

В исследованных нами целинных почвах содержание водорастворимой фракции фтора было максимальным в верхнем слое 0–20 см почв и составляло 3.1–5.6 мг/кг, пропорционально их валовым запасам; вниз по профилю почв концентрация водорастворимого фтора равномерно снижалась.

Таблица 3. Изменение содержания валового и водорастворимого фтора в почвах при их длительном сельскохозяйственном использовании

Вариант	Слой почвы, см	Содержание фтора, мг/кг почвы	
		валовой	водорастворимый
Лугово-черноземная почва			
Целина (исходное)	0–20	345	5.6
	20–40	374	5.0
Кормовой севооборот (1978–2019 гг.)			
Без удобрений	0–20	339	5.0
	20–40	353	5.8
NP	0–20	373	5.9
	20–40	371	6.5
Зернотравяной севооборот (1978–2019 гг.)			
Без удобрений	0–20	332	4.9
	20–40	376	5.8
NP	0–20	375	6.0
	20–40	373	6.5
$НСР_{05}$		27	0.5
Серая лесная почва			
Целина (исходное)	0–20	222	3.1
	20–40	238	2.1
Овощные культуры и картофель (1988–2019 гг.)			
Без удобрений	0–20	223	3.2
	20–40	235	2.1
NP	0–20	316	3.8
	20–40	240	2.8
NPK	0–20	333	4.6
	20–40	250	4.0
$НСР_{05}$		33	0.2

Известно, что фторид-анионы могут активно фиксироваться глинистыми минералами по механизмам сорбции и обмена, образовывать труднорастворимые соединения со щелочноземельными металлами. Исследованные почвы имеют небольшое утяжеление гранулометрического состава к нижней части профиля и подстилаются лессовидными карбонатными суглинками. Очевидно, что при этом количество трехслойных глинистых минералов вниз по профилю увеличивается, равно как и нарастает активность кальциевого

геохимического барьера. Данное обстоятельство и обусловливает снижение содержания водорастворимого фтора вниз по профилю исследованных целинных почв.

В верхнем слое 0–20 см лугово-черноземной почвы содержание водорастворимого фтора в контрольных вариантах заметно снизилось по сравнению с целиной, а при длительном внесении удобрений оставалось на уровне целины, несмотря на значительное дополнительное поступление элемента в агроценозы. Это могло быть связано как с определенным поглощением фтора выращиваемыми культурами, так и, вероятно, главным образом, с его миграцией в подпахотный слой 20–40 см почвы в результате действия многолетнего орошения. Содержание водорастворимого фтора в этом почвенном горизонте во всех вариантах опыта существенно возросло – на 0.8–1.5 мг/кг относительно исходного состояния. Кроме этого, неизменный относительно целины уровень содержания щелочноземельных катионов в пахотном слое почвы агроценозов, при некотором ее подщелачивании (табл. 2), не способствовал повышению подвижности фтора и увеличению содержания водорастворимой формы.

Длительное экстенсивное использование серой лесной почвы не отразилось на содержании в ней водорастворимого фтора; его количество в слое 0–40 см почвы контрольного варианта осталось на уровне целины (табл. 3). Многолетнее внесение минеральных удобрений, в т.ч. фосфорных, сопровождавшееся снижением в почве концентрации щелочноземельных катионов и некоторым ее подкислением, заметно интенсифицировало процессы повышения мобильности фтора; содержание его водорастворимой формы возросло не только в пахотном, но и в подпахотном горизонте.

На поведении фтора в исследованной почве могло отразиться изменение содержания подвижного фосфора. Анионы фосфатов и фторидов являются конкурентами в почвенных процессах их обменной адсорбции коллоидами с положительным зарядом, а также химического связывания с образованием нерастворимых в воде солей Ca, Mg, Al, Fe. Поэтому с ростом концентрации подвижного фосфора в почвах, вероятно, можно ожидать увеличения степени мобильности ионов фтора.

Особенно существенное повышение содержания водорастворимого фтора произошло в верхней части профиля почвы варианта NPK. Учитывая, что дозы внесенных фосфорных удобрений во всех удобренных вариантах были равны, а сформировавшиеся уровни содержания подвижного фосфора в почве примерно одинаковыми, причиной заметного увеличения концентрации фторид-анионов в почве варианта NPK служат, на наш взгляд, следующие обстоятельства.

Во-первых, содержание обменного кальция и магния в верхней части профиля почвы варианта NPK было заметно меньше, чем в варианте NP (табл. 2), что связано с интенсивным выносом из почвы этих элементов культурами при оптимизированном питании. Снижение содержания щелочноземельных металлов в почвенном растворе способствовало, вероятно, некоторому относительному повышению мобильности фторид-ионов.

Во-вторых, почва вариантов NP и NPK значительно различались между собой по содержанию обменного калия (табл. 2). Принимая во внимание некоторое снижение содержания щелочноземельных обменных катионов в почве варианта NPK (по сравнению с NP), можно полагать, что доля калия в составе обменных катионов почвы заметно возросла. В то же время известно, что фториды щелочных металлов (K, Na), в отличии от щелочноземельных (Ca, Mg), достаточно хорошо растворимы в воде и в определенной степени способны к миграции. Очевидно, что в почве с повышенным уровнем калия интенсивность образования его соединений с фтором возрастала (по сравнению с почвой с истощенным калийным фондом), соответственно, увеличивалось и содержание подвижных фторид-анионов.

В целом, проведенные исследования показали, что произошедшие относительные изменения фонда подвижного фтора в серой лесной среднесуглинистой почве выглядят значительно рельефнее по сравнению с тяжелосуглинистой лугово-черноземной (табл. 3), несмотря на то, что количество внесенных фторсодержащих фосфорных удобрений в агроценозах на лугово-черноземной почве было больше (табл. 1). Это обстоятельство подтвердило влияние гранулометрического состава почвы на подвижность содержащихся в ней химических элементов – чем тяжелее гранулометрический состав, тем меньше их мобильность. Однако помимо гранулометрического состава почвы, на содержание и распределение водорастворимого фтора, в отличии от валового, заметное влияние оказали не только внесенные фосфорные удобрения, но и изменившиеся агрохимические почвенные свойства, а также используемые агротехнологии.

Концентрация водорастворимого фтора в почвах оценивается согласно следующим критериям: ПДК равна 10 мг/кг, допустимым уровнем счита-

Таблица 4. Среднегодовой хозяйственный баланс фтора в опыте на серой лесной почве (2009–2019 гг.)

Вариант опыта	Содержание фтора в картофеле, мг/кг		Вынос фтора картофелем, г/га		Поступление с удобрениями, г/га	Баланс, г/га/год
	клубни	ботва	клубни	ботва		
Без удобрений	2.2	4.2	5.6	3.2	–	– 8.8
NP	3.0	4.9	9.2	5.6	598.5	+583.7
NPK	2.2	4.2	14.3	6.3	598.5	+577.9

ется <10, критическим – 10–30, недопустимым – >30, фон – 1.5 мг/кг [23, 24]. Длительное внесение фосфорных удобрений в наших опытах не привело к повышению концентрации водорастворимого фтора в почвах агроценозов до токсичного уровня. Содержание элемента в почве удобренных вариантов, хотя и заметно возросло по сравнению с контрольными (табл. 3), тем не менее, было значительно меньше его ПДК.

На содержание в почве агроценоза того или иного элемента, в т.ч. и фтора, определяющее влияние оказывает его складывающийся баланс, т.е. соотношение приходной и расходной статей. Хозяйственный баланс фтора в агроценозах рассмотрим на примере опыта на серой лесной почве при выращивании картофеля в 2009–2019 гг. (табл. 4).

В использованном в опытах двойном суперфосфате содержалось 0.45% валового фтора. При внесении этого удобрения в дозе P60 в почву ежегодно поступало 599 г фтора/га.

Содержание фтора в картофеле при внесении NP-удобрений резко увеличивалось по сравнению с контрольным вариантом; дополнительное применение калийных удобрений на этом фоне приводило к заметному снижению содержания фтора в растительной продукции (табл. 4). Обращает на себя внимание тот факт, что содержание фтора в основной продукции картофеля (клубнях) было примерно в 2 раза ниже, чем в нетоварной части урожая (ботве). Это демонстрирует эффективность защитных реакций растительного организма, препятствующих накоплению поллютантов в репродуктивных и запасающих органах. Анализируя характер поступления фтора в растения при внесении минеральных удобрений можно полагать, что во взаимодействии фтора и калия существует определенный антагонизм, а фтора и фосфора – синергизм; следовательно, поступление этого галогена в растения агроценозов будет снижаться при использовании сбалансированных доз минеральных удобрений.

Максимально допустимый уровень (МДУ) содержания фтора в кормовых корне- и клубнеплодах в нашей стране составляет 20 мг/кг, в ряде зарубежных стран эти требования строже – ПДК для фтора установлен на уровне 2,3 мг/кг; по отечественным нормативам ПДК фтора в овощах и фруктах не должны превышать 2,5 мг/кг [9]. Результаты наших опытов показывают, что длительное внесение относительно высоких, но сбалансированных доз минеральных удобрений не привело к загрязнению фтором товарной части урожая картофеля.

Баланс фтора в различных вариантах опыта складывался неодинаково (табл. 4). В контрольном варианте закономерно формировался перманентно дефицитный баланс фтора, однако его небольшой вынос слабо повлиял на почвенные запасы этого элемента (табл. 3). Вынос фтора растительной продукцией в варианте NPK был наибольшим в связи со значительно более высокой продуктивностью картофеля. Небольшие по абсолютным величинам (г/га) статьи баланса фтора – поступление и вынос – различались между собой в 30–40 раз. Соответственно, баланс фтора в агроценозах с внесением фосфорных удобрений складывался с большим профицитом. Защитные механизмы растений препятствовали поступлению избыточного количества фтора в биомассу и, соответственно, повышенному выносу этого элемента, поэтому фтор, поступающий в агроценоз с фосфорными удобрениями, обусловливал увеличение его почвенного фонда (табл. 3). Фтор, внесенный с удобрениями в подвижной форме, по-видимому, достаточно быстро фиксировался компонентами почвы в прочносвязанное состояние, что существенным образом снижало его способность к миграции, а также и ограничивало доступность растениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное в стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири, показало, что длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование почв слабо отразилось на почвенном содержании валового фтора; выращивание различных культур – трав, зерно-

вых, пропашных, в т.ч. при орошении, произошедшие определенные изменения агрохимических почвенных свойств – содержания гумуса, обменных катионов, фосфора, не повлияли значимо на общий фонд фтора. Существенному увеличению содержания валового фтора в верхнем слое 0–20 см почв (до 45% от исходного уровня) способствовало многолетнее применение фторсодержащих фосфорных удобрений; ниже по профилю его содержание практически не изменилось.

На уровень содержания водорастворимого фтора в почвах существенное влияние оказало длительное применение фосфорных удобрений и произошедшее изменение некоторых почвенных характеристик (содержания обменных катионов, фосфора), а также отдельные агротехнические приемы (орошение). На орошаемых участках отмечали достоверную миграцию подвижного фтора в подпахотный почвенный слой. Относительные изменения фонда подвижного фтора в почве более легкого гранулометрического состава были рельефнее по сравнению с почвой тяжелого гранулометрического состава.

При внесении NP-удобрений под картофель в почву с низкой обеспеченностью доступным калием содержание фтора в растительной продукции достоверно увеличивалось, тогда как использование сбалансированных доз NPK существенно снижало концентрацию фтора в растениях, до показателей, не превышающих установленные нормативы.

Многолетнее внесение рациональных доз фосфорных удобрений (в среднем P60–90 в год) не привело к накоплению в почвах агроценозов валового и водорастворимого фтора больше уровня нормативных показателей, несмотря на перманентный профицитный баланс этого элемента. Тем не менее, систематический контроль за экологической ситуацией в интенсивных агроценозах является целесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н.* Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 334 с.
2. *Шеуджен А.Х.* Биогеохимия. Майкоп: Адыгея, 2003. 1028 с.
3. *Шелепова О.В., Потатуева Ю.А.* Агроэкологическое значение фтора // Агрохимия. 2003. № 9. С. 78–87.
4. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
5. *Белякова Т.М.* Фтор в почвах и растениях в связи с эндемическим флюорозом // Почвоведение. 1977. № 8. С. 53–63.
6. *Кремленкова Н.П.* Геохимическая оценка опасности фторидного загрязнения почв Восточной Европы // Почвоведение. 1996. № 8. С. 1135–1141.
7. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенном загрязнении // Агрохимия. 2019. № 3. С. 65–71.
8. *Конарбаева Г.А.* Галогены в почвах юга Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 200 с.
9. *Танделов Ю.П.* Фтор в системе почва–растение. М.: РАСХН, 2004. 106 с.
10. *Бойко В.С.* Полевое кормопроизводство на орошаемых черноземах в лесостепи Западной Сибири. Омск: Изд-во ИП Макшеевой Е.А., 2019. 312 с.
11. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
12. *Якименко В.Н.* Баланс калия, продуктивность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 10. С. 16–24.
13. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
14. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
15. *Миллер А.Д., Капитонова Т.А.* Метод определения фтора с ализаринкомплексоном в горных породах и минералах без предварительной отгонки // Методы анализа редкометалльных минералов, руд и горных пород. М., 1971. Вып. 2. С. 80–89.
16. *Якименко В.Н.* Изменение форм калия в гранулометрических фракциях некоторых автоморфных почв в агроценозе // Агрохимия. 2001. № 6. С. 11–16.
17. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 528 с.
18. *Ермолов Ю.В.* Фтор в компонентах природных ландшафтов Обь-Иртышского междуречья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2002. 17 с.
19. *Минеев В.Г., Грачева М.К., Ефремов В.Ф.* Фтор в почвах и корнеплодах кормовой свеклы // Химия в сел. хоз-ве. 1987. № 2. С. 45–47.
20. *Гапонюк Э.И., Кузнецова М.В.* Влияние фтористого натрия на свойства почвы и развитие некоторых сельскохозяйственных культур // Гигиена и санитария. 1984. № 6. С. 77–79.
21. *Волошин Е.И.* Содержание и распределение водорастворимого фтора в почвах Средней Сибири // Агрохимия. 2003. № 2. С. 65–73.
22. *Сараев В.Г.* Техногенное рассеяние фтора в почвах КАТЭКа // Географ. и природн. ресурсы. 1986. № 4. С. 142–146.
23. Санитарные нормы допустимых концентраций токсичных веществ. СанПиН 42–126–4433–87 // Методы определения загрязняющих веществ в почве. М., 1988. 72 с.
24. *Дмитриев И.Т., Казнина Н.М., Пинигина М.А.* Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде. М.: Химия, 1989. 368 с.

Change of Fluorine Content in Soils of the Forest-Steppe of Western Siberia at Their Agricultural Use

V. N. Yakimenko[a,#], G. A. Konarbaeva[a], V. S. Boyko[b], and A. Yu. Timokhin[b]

[a] *Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Division, RAS*
prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia
[b] *Omsk Agricultural Research Center*
prosp. Koroleva 26, Omsk 644012, Russia
[#] *E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru*

In stationary field experiments in the forest-steppe of Western Siberia, it was shown that long-term extensive agricultural use of soils had little effect on the content of gross fluorine in them. Long-term application of fluorine-containing phosphorus fertilizers in doses of 60–90 kg/ha/year led to a significant increase in the level of gross (15–45% of the initial) and water-soluble (1–1.5 mg/kg) fluoride in the arable layer of soils. Despite the long-term positive balance of fluorine in agrocenoses with the systematic use of phosphorus fertilizers, its concentration in soils and plant products did not exceed the current regulatory indicators.

Key words: soil, agrocenosis, fertilizers, gross and mobile fluorine, fluorine balance, forest-steppe, Western Siberia.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 47–56

УДК 631.821:631.445.56:631.41:546.16

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ВНЕСЕНИЯ МЕЛИОРАНТОВ В СЕРОЗЕМНО-ОАЗИСНУЮ ПОЧВУ (IRRAGRIC ANTHROSOLS) НА ИНТЕНСИВНОСТЬ МИГРАЦИИ ФТОРА (ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ОПЫТА). ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭЛЮВИИРОВАНИЯ

© 2020 г. А. В. Литвинович[1,2,*], О. Ю. Павлова[1], А. В. Лаврищев[2], В. М. Буре[1,3], Э. Сальников[4]

[1] Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург-Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия
[3] Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия
[4] Soil Science Institute
11000 Belgrade, Teodora Drajzera 7, Serbia
**E-mail: avlavr@rambler.ru*

Поступила в редакцию 07.03.2019 г.
После доработки 21.10.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

В лабораторном опыте на колонках установлены масштабы миграции фтора при многократном промывании сероземно-оазисной почвы. Показано, что почва в естественном состоянии характеризуется наличием определенного запаса водорастворимого фтора. Общие потери за 8 промываний с суммарным объемом просочившейся влаги 1 л из незагрязненной фтором почвы составили 1.2 мг F. При искусственном загрязнении почвы фтористым натрием количество мигрирующего F многократно возрастало (51.8 мг). Добавление в загрязненную почву известняковой муки (ИМ) и фосфогипса (ФГ) приводило к снижению подвижности фтора, однако его полного осаждения не отмечено. В большинстве фильтратов концентрация фтора превосходила ПДК, установленную для питьевых вод. Выявлено, что способ размещения мелиорантов оказывал существенное влияние на миграционные потери фтора из почвы. При смешивании ИМ и ФГ во всем объеме почвы средняя скорость изменения содержания фтора в отдельных порциях фильтрата во всем интервале изучения составила в варианте с ИМ 1.20 и в варианте с ФГ – 1.88 г/дм^3. Количество вымытого фтора за 8 промываний было равно 7.28 и 10.5 мг соответственно. Наибольший эффект от применения мелиорантов достигнут при их размещении в качестве “подпочвенного экрана”. Средняя скорость изменения содержания фтора в отдельных порциях фильтрата в варианте с ИМ была равна –0.296, в варианте с ФГ– –0.16 мг/дм^3; суммарные потери в вариантах составили 2.80 и 2.26 мг F. Рассмотрены механизмы поглощения фтора твердой фазой почвы. Разработаны линейные эмпирические модели, адекватно описывающие процесс миграции фтора из загрязненной почвы без использования мелиорантов и с их применением.

Ключевые слова: миграция фтора, химическая мелиорация почв, известняковая мука, фосфогипс, эмпирические модели.

DOI: 10.31857/S0002188120040079

ВВЕДЕНИЕ

Фтор относится к токсичным элементам. По деструктивному действию на живое вещество он стоит на 2-м месте после ртути [1]. Накопление в почвах фтористых соединений происходит в результате выпадения на них летучих выбросов промышленных предприятий, длительного применения фосфорных удобрений и мелиорантов.

К настоящему времени в литературе можно найти сведения, посвященные накоплению фтора в системе почва–растение [2–12]. Попав в почву, фтор довольно быстро закрепляется в составе почвенного поглощающего комплекса. Предло-

Таблица 1. Валовой химический состав сероземно-оазисной почвы, %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	MnO	Na_2O	P_2O_5	SO_3
57.5	10.9	4.61	9.53	2.51	1.8	0.07	1.72	0.24	<0.05

жено несколько механизмов, объясняющих природу исчезновения фторид-ионов из растворов во время его взаимодействия с твердой частью почвы:

1 – прямое замещение фторид-ионами ионов OH^- кристаллической структуры алюмосиликатов [13];

2 – замещение OH^- свободных гидроксилов алюминия и основных полимеров алюминия, адсорбированных на поверхности минералов [14];

3 – образование фторалюмосиликатов [15];

4 – разрушение алюмосиликатов и образование нерастворимых фторалюминатов [16, 17];

5 – разрушение алюмо- (феррисиликатов) под действием фторид-ионов с участием реакции комплексообразования, приводящих к растворению полуторных оксидов и образованию растворимых фторалюминатов и фторферратов [18].

Все указанные механизмы одновременно осуществляются в почвах благодаря поликомпонентному составу и естественной микропестроте химических условий, еще более усугубляемой при неравномерном распределении удобрений и химических мелиорантов.

В экспериментах [19] фиксация фтора отдельными компонентами 20 образцов почв коррелировала с содержанием аморфного алюминия (r = = 0.69), исходной величиной pH почв (r = 0.50) и содержанием в них глины (r = 0.46), но не коррелировала с содержанием органического углерода. Кварц оказался практически инертным к действию KF.

В опытах [20] количество фтора, поглощенного почвой, уменьшалось с ростом содержания обменного натрия и повышением величины pH. Это связано с образованием высокорастворимого соединения NaF.

На слабую способность гумуса щелочных почв поглощать фтор есть указания в работе [21].

Основными объектами, поглощающими фтор, являются силикаты, свободные оксиды алюминия и железа с образованием нерастворимых фторалюминатов или растворимых фторалюминатов и фторферратов [22, 23]. В работе [24] рассчитаны константы устойчивости фторсодержащих минералов в кислых и щелочных почвах.

В богатых кальцием почвах фтор вступает в реакцию с кальцием и образует труднорастворимое соединение CaF_2 (флюорит), поэтому для внутри- и межпочвенной миграции фтора важен кальциевый геохимический барьер [25]. В работах [26–28] экспериментально установлено, что минимальное количество водорастворимого фтора в почвах приурочено к горизонтам, содержащим кальций. Тем не менее, ряд авторов указывает, что щелочные почвы обладают слабой способностью удерживать фтор.

Цель работы – в опыте на колонках установить возможность снижения подвижности фтора в загрязненной сероземно-оазисной почве при добавлении различных соединений кальция; установить масштабы миграции фтора в почве при разных способах внесения мелиорантов; определить среднюю скорость изменения концентрации фтора в отдельных порциях фильтрата за весь период эксперимента; разработать эмпирические модели, адекватно описывающие процессы миграции при многократном промывании почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения поставленных задач был заложен лабораторный опыт в полиэтиленовых колонках (воронках). Объектом изучения служила сероземно-оазисная почва (Irragric Anthrosols – WRB, 2016), расположенная на территории Узбекистана. Почву отбирали из пахотного 0–30 см слоя. Почва характеризуется супесчаным гранулометрическим составом (содержание частиц <0.01 мм – 14.8%), содержание гумуса – 1.2%, pH_{H_2O} 7.8. Валовое содержание фтора – 500 мг/кг массы почвы, что близко к показателям, характерным для карбонатных почв, приведенным в работе [29]. Валовой химический состав представлен в табл. 1.

Методика исследования состояла в следующем: 300 г воздушно-сухой почвы, измельченной и просеянной через сито с отверстиями 1 мм, помещали в делительные воронки. Высота почвенного слоя в воронке 17 см. Плотность набивки 1.0–1.1 г/см^3.

В опыте сравнивали 2 способа заделки мелиорантов: в одном случае измельченный воздушно-сухой мелиорант тщательно перемешивали во всем объеме почвы, в другом – помещали его на дно воронки в качестве подпочвенного “экрана”. В каждую колонку вносили по 5 г известняковой

Таблица 2. Содержание водорастворимого фтора в промывных водах, мг/дм^3

Вариант	Сроки промывки								Количество вымытого фтора, мг
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	
Контроль	0.24 ± 0.01 / 0.03	0.46 ± 0.02 / 0.06	0.48 ± 0.03 / 0.06	0.32 ± 0.01 / 0.04	0.25 ± 0.02 / 0.03	3.88 ± 0.64 / 0.49	3.46 ± 0.58 / 0.43	0.50 ± 0.02 / 0.06	1.2
Фтор (150 мг/100 г почвы)	39.7 ± 5.8 / 4.96	69.1 ± 6.0 / 8.63	79.3 ± 4.9 / 9.91	75.6 ± 7.4 / 9.46	70.6 ± 9.1 / 8.83	41.6 ± 3.8 / 5.20	22.3 ± 1.8 / 2.79	15.8 ± 1.1 / 1.98	51.8
Фтор + ИМ 5 г (в почву)	0.60 ± 0.02 / 0.08	6.85 ± 0.90 / 0.86	1.79 ± 0.20 / 0.22	9.67 ± 1.00 / 1.22	12.1 ± 1.8 / 1.52	7.2 ± 0.9 / 0.90	9.0 ± 0.7 / 1.13	10.94 ± 1.2 / 1.37	7.28
Фтор + ФГ 15 г (в почву)	0.73 ± 0.09 / 0.09	2.36 ± 0.30 / 0.30	5.53 ± 0.90 / 0.69	17.1 ± 1.0 / 2.13	21.2 ± 1.9 / 2.64	12.3 ± 1.3 / 1.54	12.7 ± 0.9 / 1.59	12.5 ± 0.6 / 1.56	10.5
Фтор + ИМ 5 г (в подпочву)	2.93 ± 0.1 / 0.37	5.84 ± 0.70 / 0.73	2.36 ± 0.20 / 0.30	2.36 ± 0.40 / 0.30	2.27 ± 0.40 / 0.28	2.27 ± 0.20 / 0.28	2.38 ± 0.50 / 0.30	1.9 ± 0.1 / 0.24	2.80
Фтор + ФГ 15 г (в подпочву)	3.00 ± 0.80 / 0.38	3.86 ± 0.50 / 0.48	2.02 ± 0.30 / 0.25	1.52 ± 0.20 / 0.19	1.43 ± 0.15 / 0.18	1.84 ± 0.20 / 0.23	1.59 ± 0.30 / 0.20	2.82 ± 0.50 / 0.35	2.26

Примечание. Над чертой – мг/дм^3, под чертой – мг.

муки (**ИМ**), содержащей 51.5% CaO, или 15 г фосфогипса (**ФГ**) с содержанием CaO 40%. Все частицы мелиорантов проходили сквозь сито с диаметром отверстий 0.25 мм. Сравнение вели с вариантами без использования мелиорантов. Перед промыванием почву в воронке с поверхности искусственно загрязняли раствором NaF из расчета 150 мг F/100 г почвы. Схема опыта приведена в табл. 2.

Провели 8 промываний каждой колонки. Суммарный объем просочившейся влаги – 1.0 дм^3 (125 мл для каждого промывания). Элюаты после каждого промывания собирали и устанавливали в них содержание фтора. Повторность опыта (количество колонок в каждом варианте опыта) шестикратная.

Содержание фтора в промывных водах определяли с помощью фторселективного электрода. Математическую обработку данных проводили согласно [30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные табл. 2 свидетельствуют, что промывание почвы приводило к удалению фтора за пределы пахотного слоя. Минимальное количество фтора присутствовало в фильтратах контрольного варианта (без загрязнения). Изменения концентраций фтора в фильтратах этого варианта во всем промежутке изучения варьировали от 0.24 до 3.88 мг/дм^3. По мере проведения эксперимента до 6 срока наблюдений концентрация фтора в промывных водах нарастала. В фильтрате 8 срока установлено резкое уменьшение содержания фтора. На этом опыт был прекращен. Всего за 8 промываний было удалено 1.2 мг фтора. Полного удаления фтора в результате промачивания достигнуто не было.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания фтора в контрольном варианте имеет следующий вид:

$$y_1 = -0.245 + 0.32t, \quad (1)$$

где t – сроки (условное время).

Средняя скорость изменения содержания фтора в фильтратах во всем промежутке наблюдений, рассчитанная по угловому коэффициенту, равна: $v_1 = 0.32$ мг/дм^3.

Эмпирическая модель (1.1) статистически значима на уровне значимости 20% (статистика F принимает величину $F = 2.13$ при критической величине $F(0.8, 1.6 = 2.07)$ коэффициент детерминации $R^2 = 0.26$. График модели (1) приведен на рис. 1.

Добавление в почву растворимого соединения NaF многократно усиливало миграцию элемента. Во всех порциях фильтратов концентрация фтора

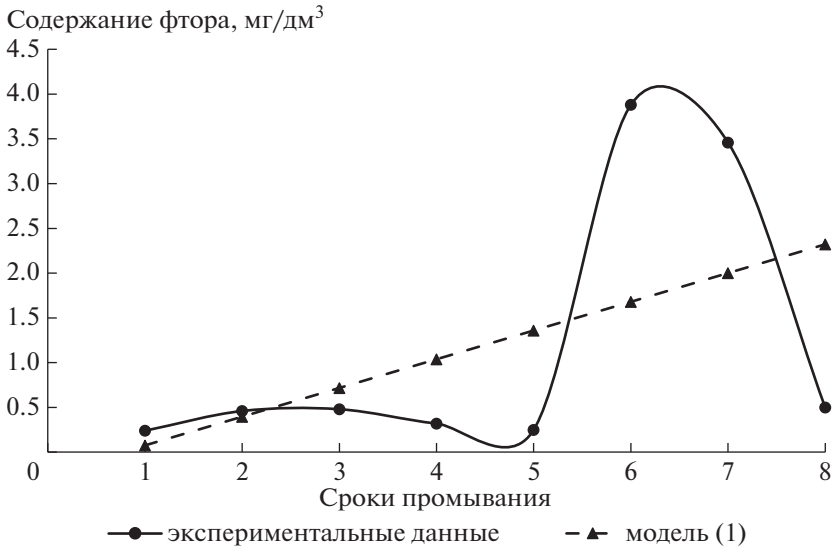


Рис. 1. Эмпирическая модель вымывания фтора в контрольном варианте опыта.

значительно превосходила уровень ПДК (1.5 мг/л). Размах изменений концентрации фтора в отдельных фильтратах составил от 15.8 до 79.3 мг/дм^3. Это было в 9.7–18.4 раза больше его максимального содержания в элюатах контроля. Всего за 8 промываний колонок варианта с искусственным загрязнением фтором было удалено 51.8 мг фтора. Полученные данные убеждают в слабой фторудерживающей способности почвы, выбранной для исследования.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания фтора в варианте с искусственным загрязнением почвы имеет следующий вид:

$$y_{2.1} = 79.6 - 6.18t. \quad (2.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации фтора в фильтратах во всем промежутке наблюдений равна: $v_2 = -6.18$ мг/дм^3.

Эмпирическая модель (2.1) статистически значима на уровне значимости 11.5% (статистика F принимает величину $F = 3.45$ при критической величине $F(0.885, 1.6 = 3.39)$ коэффициент детерминации $R^2 = 0.365$. График модели (2.1) приведен на рис. 2.

Эмпирическая модель динамики содержания фтора (150 мг/100 г почвы) на основе многочлена четвертой степени имеет вид:

$$y_{2.2} = 6.27 + 35.3t + 0.39t^2 - 1.75t^3 + 0.15t^4. \quad (2.2)$$

Эмпирическая модель (2.2) статистически значима на очень высоком уровне значимости 1% (статистика F принимает величину $F = 61.2$ при критической величине $F(0.99, 4.3 = 28.7)$ коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$. График модели (2.2) приведен на рис. 2.

Мелиоранты способствовали снижению подвижности фтора. Концентрация фтора в элюатах варианта с использованием ИМ, равномерно перемешанной во всем объеме почвы, существенно снижалась. Минимальная концентрация установлена в фильтрате первого промачивания, максимальная – характерна для 5-го срока промывания. Таким образом, несмотря на отчетливо выраженную барьерную функцию ИМ, количество вымываемого фтора значительно превосходило его суммарное содержание в контроле.

Механизм связывания фтора карбонатом кальция описан в ряде работ. Например, в экспериментах [21] поглощение фтора суспензией $CaCO_3$ начиналось при концентрации фтора в растворе 4×10^3 ммоль/л. Существенно значимое количество фтора поглощал кальцит при концентрации фтора в растворе $>10^3$ ммоль/л. Сделан вывод, что имела место хемосорбция, при которой происходил обмен фтора на CO_3^{2-} с образованием CaF_2.

В опытах [15] экспериментально выявлено, что при обработке плоскостей спайности кальцита растворами HF с концентрацией от 1 до 50% происходило полное псевдоморфное замещение кальцита флюоритом, для чего требовалось меньше 1 сут. При этом тонкие верхние слои кристаллитов кальцита трансформировались в слои ориентированных кристаллитов флюорита так, что позиции кальцита почти не изменялись. Образовавшиеся микрослои флюорита были менее плотными, на долю пустот приходилось 33.5% объема этих микрослоев, что

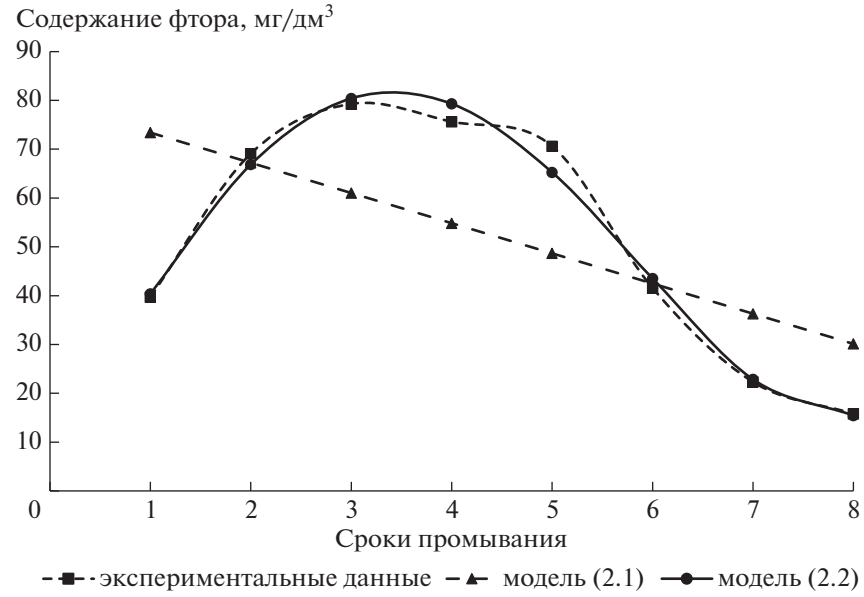


Рис. 2. Эмпирические модели динамики содержания фтора в варианте с искусственным загрязнением почвы.

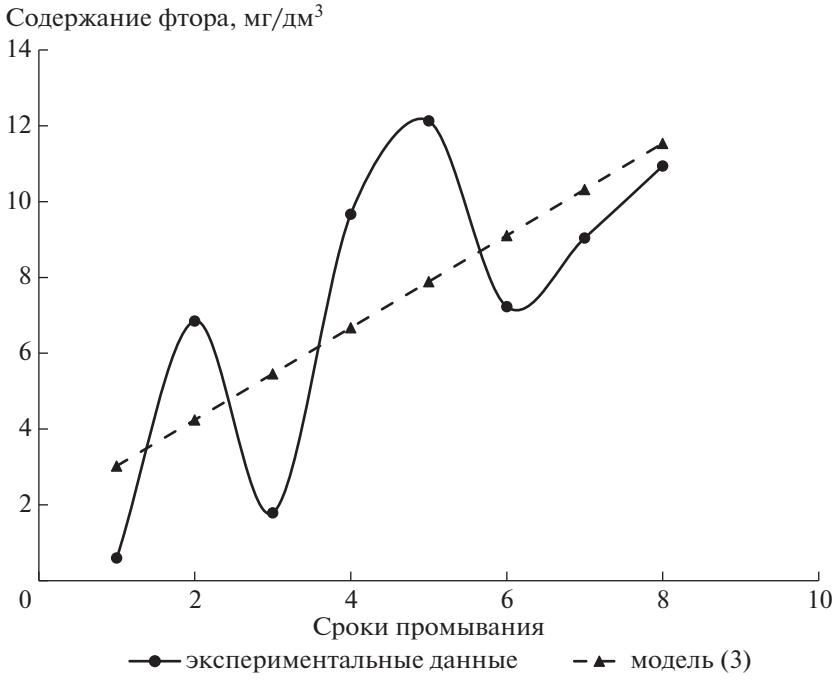


Рис. 3. Эмпирическая модель вымывания фтора в варианте фтор + ИМ 5 г в почву.

обеспечивало доступность всего образовавшегося флюорита действию воды. Следовательно, поскольку растворимость CaF_2 составляет от 2 до 8 мг/л [22], то образование флюорита не предохраняло грунтовые воды от загрязнения.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания фтора в варианте с добавлением в загрязненную почву ИМ можно представить в виде уравнения:

$$y_3 = 1.8 + 1.2t. \quad (3)$$

Средняя скорость изменения концентрации фтора в фильтратах во всем промежутке наблюдений равна: $v_3 = 1.2$ мг/дм^3.

Рис. 4. Эмпирическая модель вымывания фтора в варианте фтор + ФГ 15 г в почву.

Эмпирическая модель (3) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (статистика F принимает величину $F = 6.35$ при критической величине $F(0.95, 1.6 = 5.987)$ коэффициент детерминации $R^2 = 0.51$. График модели (3) приведен на рис. 3.

При перемешивании фосфогипса с почвой миграционные потери фтора также уменьшались Размах изменений концентраций в фильтратах во всем промежутке изучения укладывался в диапазон от 0.73 до 21.2 мг/дм^3. Так же, как и в варианте с ИМ, рост концентрации фтора в элюатах наблюдали до 5-го срока промывания. Далее количество вымываемого фтора снижалось и стабилизировалось на уровне 12 мг/дм^3. В большинстве фильтратов количество удаляемого фтора было больше, чем в аналогичных фильтратах с ИМ. Суммарное количество вымытого фтора в варианте с ИМ равнялось 7.28 мг, в варианте с ФГ – 10.5 мг, т.е. было больше в 1.45 раза.

Важно при этом подчеркнуть, что количество кальция, внесенного с ФГ, в 2.34 раза превосходило количество кальция, поступившего в почву с ИМ. Причина более высокой эффективности извести, по сравнению с фосфогипсом, до конца не ясна. В какой-то степени это можно объяснить наличием самого фтора в составе ФГ, количество которого составляет 2% от массы мелиоранта. Очевидно одно, что возможность связывания фтора кальцием с образованием труднорастворимого флюорита CaF_2 при данном способе размещения мелиорантов в почве полностью не реализовалась.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания фтора в варианте фтор + ФГ (15 г в почву) имеет следующий вид:

$$y_4 = 2.06 + 1.88t. \quad (4)$$

Средняя скорость изменения концентрации фтора в фильтратах во всем промежутке наблюдений равна: $v_4 = 1.88$ мг/дм^3.

Эмпирическая модель (4) статистически значима на уровне значимости 8.5% (статистика F принимает величину $F = 4.34$ при критической величине $F(0.915, 1.6) = 4.246$) коэффициент детерминации $R^2 = 0.42$. График модели (4) приведен на рис. 4.

Максимальная фторудерживающая способность мелиорантов установлена при их подпочвенном размещении. Концентрация вымываемого фтора в отдельных порциях фильтратов менялась от 1.43 до 3.86 мг/дм^3 и только в одном варианте с ИМ возросла до 5.8 мг/дм^3. Следовательно, и при данном способе размещения мелиорантов снизить концентрацию фтора до уровня меньше ПДК не удалось.

Суммарный объем вымытого фтора при подпочвенном размещении мелиорантов за весь период изучения мало отличался между вариантами: 2.80 и 2.26 мг соответственно. Некоторое количество просочившегося сквозь мелиоративный “экран” фтора обусловлено, по-видимому, рас-

Рис. 5. Эмпирическая модель вымывания фтора в варианте фтор + ИМ 5 г в подпочву.

творением самого флюорита, образующегося на границе почва–мелиорант.

Таким образом, использование мелиорантов существенно снижало миграционную способность фтора в загрязненной сероземно-оазисной почве. Максимальный мелиоративный эффект достигался при подпочвенном размещении кальцийсодержащих материалов. Однако, вне зависимости от вида и способа размещения мелиорантов в почве, полного осаждения фтора не происходило. Следовательно, кальциевый геохимический барьер не в состоянии полностью предотвратить вымывание фтора.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания фтора в фильтратах варианта с размещением ИМ в качестве подпочвенного “экрана” имеет следующий вид:

$$y_5 = 4.1 - 0.296t. \quad (5)$$

Средняя скорость изменения содержания фтора во всем промежутке наблюдений равна: $v_5 = -0.296$ мг/дм^3.

Эмпирическая модель (5) статистически значима на уровне значимости 14% (статистика F принимает величину $F = 2.94$ при критической величине $F(0.86, 1.6) = 2.89$) коэффициент детерминации $R^2 = 0.33$. График модели (5) приведен на рис. 5.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания фтора (фтор + ФГ 15 г в подпочву) имеет следующий вид:

$$y_6 = 2.97 - 0.16t. \quad (6)$$

Средняя скорость изменения концентрации фтора в фильтрате во всем промежутке наблюдений равна: $v_6 = -0.16$ мг/дм^3.

Эмпирическая модель (6.1) статистически значима на уровне значимости 28% (статистика F принимает величину $F = 1.46$ при критической величине $F(0.72, 1.6 = 1.41)$ коэффициент детерминации $R^2 = 0.195$. График модели (6) приведен на рис. 6.

Построенные линейные эмпирические модели показали, насколько по-разному проходил процесс миграции фтора в отдельных вариантах опыта. Их можно разбить на 2 группы.

В первую группу входят варианты: контроль, фтор + ИМ 5 г (в почву), фтор + ФГ (15 г в почву). Все перечисленные варианты характеризовались положительной динамикой вымывания фтора во всем отрезке времени опыта, т.е. концентрация фтора в отдельных порциях фильтрата по мере проведения эксперимента возрастала. Средняя скорость увеличения концентрации фтора в фильтратах составляла в вариантах 0.32, 1.2, 1.88 мг/дм^3 соответственно.

Рис. 6. Эмпирическая модель вымывания фтора в варианте фтор + ФГ 15 г в подпочву.

Во вторую группу входили варианты: фтор (150 мг/100 г почвы), фтор + ИМ (5 г в подпочву), фтор + ФГ (15 г в подпочву). Эти варианты характеризовались отрицательной динамикой для линейных моделей. По мере проведения эксперимента количество вымываемого фтора в отдельных порциях фильтрата уменьшалось. Средняя скорость снижения концентрации фтора для этих вариантов составляла –6.18, –0.296, –0.16 мг/дм^3 соответственно.

Для варианта фтор (150 мг/100 г почвы) удалось построить нелинейную эмпирическую модель на основе многочлена 4-го порядка с хорошими статистическими свойствами. Во всех остальных случаях статистически значимые нелинейные модели построить не удалось. Это связано с очень сложной нелинейной динамикой содержания фтора в элюатах остальных вариантов, включая контроль, и недостаточным количеством наблюдений для математического описания такой сложной динамики алгебраическими многочленами.

Таким образом, характер миграции фтора в опыте в зависимости от способа размещения мелиорантов существенно различался. При внесении мелиорантов в почву происходило увеличение концентрации фтора в отдельных порциях фильтратов в процессе проведения опыта. При подпочвенном размещении концентрация фтора в промывных водах отдельных элюатов снижалась по мере увеличения объема просочившейся влаги.

Проведенное исследование позволило сделать важный в практическом отношении вывод. Размещение мелиоранта в подпахотном слое почв, испытывающих техногенное загрязнение, позволяет связать бóльшую часть водорастворимого фтора в составе труднодоступных соединений и снизить уровень загрязнения грунтовых вод. Однако полного осаждения фтора с помощью приемов химической мелиорации достичь не удается. Концентрация фтора в просачивающейся влаге большинства фильтратов превышала ПДК, установленную для питьевых вод.

ВЫВОДЫ

1. При многократном промывании не загрязненной сероземно-оазисной почвы фтор обнаруживался во всех порциях фильтратов. Суммарные потери за 8 промачиваний составляли 1.2 мг. При искусственном загрязнении почвы фтором элювиальные потери многократно возрастали и были равны 51.8 мг.

2. Использование кальцийсодержащих материалов – известняковой муки (ИМ) и фосфогипса (ФГ) способствовало связыванию фтора в составе труднорастворимых соединений. Подвижность

фтора существенно снижалась. Наибольший эффект от применения мелиорантов был достигнут при их подпочвенном размещении. Однако полного осаждения водорастворимого фтора не происходило. В большинстве фильтратов выявлено значительное превышение ПДК фтора, установленной для питьевых вод.

3. В процессе эксперимента средняя скорость вымывания фтора (динамика изменения содержания фтора в отдельных порциях фильтрата во всем промежутке времени опыта) из мелиорируемой почвы при смешивании ИМ и ФГ во всем объеме почвы увеличивалась и составила для варианта с ИМ: $v = 1.2$ мг/дм^3, для варианта с ФГ: $v = 1.88$ мг/дм^3. Потери фтора при промачивании были равны 7.28 и 10.5 мг соответственно. При подпочвенном размещении мелиорантов средняя скорость вымывания фтора в фильтратах снижалась и составила в варианте с ИМ: $v = -0.296$, в варианте с фосфогипсом: $v = -0.16$ мг/дм^3. Количество удаленного фтора равнялось 2.8 и 2.26 мг соответственно.

4. Разработаны линейные эмпирические модели адекватно описывающие процесс миграции фтора без применения и с использованием мелиорантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Справ-к. Кн. 2. Главные *p*-элементы. М.: Недра. 1994. 303 с.
2. *Семендяева Н.В., Жеронкина Л.А.* Влияние фтора и фосфора на урожай и химический состав овса, возделываемого на солонцах // Агрохимия. 1988. № 4. С. 57–63.
3. *Потатуева Ю.А.* Влияние длительного применения фосфорных удобрений на накопление в почвах и растениях металлов и токсичных элементов // Агрохимия. 1994. № 11. С. 98–114.
4. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Фтор в системе почва–растения при применении в сельском хозяйстве средств химизации и загрязнении объектов природной среды техногенными выбросами // Агрохимия. 2002. № 2. С. 66–76.
5. *Weinstein L.H., Davison A.W.* Native plant species suitable as bioindicators and biomonitors for airborne fluoride // Environ. Pollut. 2003. V. 125. № 1. P. 3–11.
6. *Franzaring J.* Environmental monitoring of fluoride emissions using precipitation,dust, plant and soil samples // Environ. Pollut. 2006. V. 144. № 1. P. 158–165.
7. *Mirlean N., Roisenberg A.* Fluoride distribution in the environment along the gradient of a phosphate–fertilizer production emission (southern Brazil) // Environ. Geochem. Health. 2007. V. 29. № 3. P. 179–187.
8. *Mourad N.M.* Radioactivity and fluoride contamination derived from a phosphate fertilizer plant in Egypt // Appl. Radiat. Isotop. 2009. V. 67. № 7. P. 1259–1268.
9. *Tayibi H.* Environmental impact and management of phosphogypsum //J. Environ. Manag. 2009. V. 90. № 8. P. 2377–2386.
10. *Pérez-López R.* Dynamics of contaminants in phosphogypsum of the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): from phosphate rock ore to the environment // Appl. Geochem. 2010. V. 25. № 5. P. 705–715.
11. *Smidt G.A.* Heavy metal concentrations in soils in the vicinity of a fertilizer factory in Southern Brazil) // Landbauforschung. 2011. V. 61. № 4. P. 353–364.
12. *Kassir L.N., Lartiges B., Ouaini N.* Effects of fertilizer industry emissions on local soil contamination: a case study of a phosphate plant on the east Mediterranean coast // Environ. Technol. 2012. V. 33. № 8. P. 873–885.
13. *Dickman S.R., Bray R.H.* Replacement of adsorbed phosphate from kaolinite by fluoride // Soil Sci. 1941. V. 52. № 4. P. 263–273.
14. *Bower C.A., Hatcher T.* Adsorption of fluoride by soils and minerals // Soil Sci. 1967. V. 103. № 3, P. 151–154.
15. *Marion G.M., Henricks D.M., Dutt G.R., Fuller W.H.* Aluminium and silica solubility in soils // Soil Sci. 1976. V. 121. № 2. P. 76–85.
16. *Romo L.A., Roy R.* Studies of the substitution of OH^- by F^- in various hydroxylic minerals // Amer. Mineral. 1957. V. 42. P. 165–177.
17. *Samson H.R.* Fluoride adsorption by clay minerals and hydrated alumina // Clay Mineral. Bull. 1952. № 1. P. 266–271.
18. *Huang P.M., Jackson M.L.* Mechanism of reaction of neutral fluoride solution with layer silicates and oxides of soils // Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1965. V. 29. № 6. P. 661–665.
19. *Omueti J.A.I., Jones K.L.* Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1980. V. 44. № 2. P. 247–249.
20. *Shhabra R., Singh A., Abrol I.P.* Fluorine in sodic sols // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1980. V. 44. № 1. P. 33–36.
21. *Farrah H., Slavek J., Pickering W.F.* Fluoride sorption by soil components: Calcium carbonate, humus acid manganese dioxibe silica // Austral. J. Soil Res. 1985. V. 23. № 3. P. 429–439.
22. *Дубровина И.В., Корнблюм Э.А.* Природа поглощения почвами фтора удобрений и мелиорантов // Почвоведение. 1984. С. 23–29.
23. *Huang P.M. Jackson M.L.* Mechanism of reaction of neutral fluoride solution with layer silicates and oxides of soils // Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1965. V. 35. № 3. P. 454–457.
24. *Elrashidi M.A.* Chemical equilibria of fluorine in soils: a theoretical development // Soil Sci. 1986. V. 141. № 4. P. 274–280.
25. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта, М., 1966. 391 с.
26. *Филиппова Г.Р., Власов Н.А., Иванов А.В.* Водорастворимые формы галогенов в почвах водосборных площадей минеральных озер юго-восточного Забайкалья // Микроэлементы в биосфере и приме-

нение их в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, 1971. С. 102–106.

27. *Стрижова Г.П., Лисник Г.С., Крейдман Ж.Е.* Фтор в почвах поймы р. Прут // Исследование и использование почв Молдавии. Кишинев: Штиинца, 1977. С. 103–109.
28. *Кудзин Ю.К., Пашова В.Т.* О содержании фтора в почвах и растениях при длительном применении удобрений // Почвоведение. 1970. № 2. С. 74–79.
29. *Kabata-Pendias A., Pendias H.* Trace elements in soils and plants. London–N.Y.: CRC Press, 4th ed. 2011. 534 p.
30. *Bure V.M.* Methodology of statistical analysis of empirical data. St. Petersburg State University, 2007. 141 p.

Influence of Different Methods of Introduction of Meliorants into the Sierozems-Oasis Soil (Irragric Anthrosols) on the Intensity of Fluorine Migration (According to Laboratory Experience). Empirical Models of the Eluviation Process

A. V. Litvinovich[a,b,#], O. Yu. Pavlova[a], A. V. Lavrishchev[b], V. M. Bure[a, c], and E. Salnikov[d]

[a] *Agrophysical Research Institute*
Grazhdansky prosp. 14, St.-Petersburg–Pushkin 195220, Russia
[b] *Sankt-Petersburg State Agrarian University*
Petersburg highway 2, St.-Petersburg–Pushkin 196601, Russia
[c] *Sanct-Petersburg State University*
Universitetskaya nab., 7–9, St.-Petersburg, 199034, Russia
[d] *Soil Science Institute*
Teodora Drajzera 7, Belgrade 11000, Serbia
[#] *E-mail: avlavr@rambler.ru*

In the laboratory experiment on the columns, the scale of fluorine migration was established during repeated washing of serous-earth-oasis soil. It was shown that the soil in its natural state is characterized by the presence of a certain amount of water-soluble fluorine. The total losses for 8 washings with a total volume of leaked moisture of 1 l from non-fluorinated soil amounted to 1.2 mg F. When the soil was artificially contaminated with sodium fluoride, the number of migrating F increased many times (51.8 mg). The addition of limestone flour (LF) and phosphogypsum (FG) to the polluted soil resulted in a decrease in the mobility of fluorine, but its complete deposition was not observed. In most filtrates, the fluorine concentration exceeded the maximum permissible concentration (MPC) set for drinking water. It was revealed that the method of placement of meliorants had a significant impact on the migration losses of fluorine from the soil. When mixing LF and FG in the entire volume of the soil, the average rate of change in the content of fluorine in individual portions of the filtrate throughout the study interval was 1.20 in the variant with LF and 1.88 g/dm^3 in the variant with FG. The amount of washed fluorine for 8 washings was equal to 7.28 and 10.5 mg respectively. The greatest effect from the use of meliorants was achieved when they are placed as a “subsurface screen”. The average rate of change in the content of fluorine in individual portions of the filtrate in the variant with LF was equal to –0.296, in the variant with FG -0.16 mg/dm^3; the total losses in the variants were 2.80 and 2.26 mg F. the mechanisms of fluorine absorption by the solid phase of the soil are considered. Linear empirical models have been developed that adequately describe the process of fluorine migration from contaminated soil without the use of meliorants and with their application.

Key words: fluorine migration, chemical soil reclamation, limestone flour, phosphogypsum, empirical models.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 57–65

УДК 632.122.1:546.47: 577.122.3

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ЦИНКА В ПОЧВЕ НА АМИНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ БИОМАССЫ КОРМОВЫХ ТРАВ

© 2020 г. Г. Я. Елькина

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН
167982 Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия
E-mail: elkina@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 08.08.2019 г.
После доработки 30.10.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

Изучали влияние цинка на содержание аминокислот в однолетних кормовых культурах (горох и овес в смешанном посеве). Цинк в концентрациях 17.8–67.6 мг/кг (вытяжка 1М HCl) способствовал повышению содержания аминокислот в наземной массе гороха, при более высоком его содержании происходило ингибирование процессов. Более всего увеличилось содержание пролина и относительное количество (в % от суммы аминокислот) аспарагиновой кислоты. Изменения в составе белков овса были менее выражены. При оптимальном количестве цинка увеличился суммарный выход аминокислот, доля незаменимых кислот и количество сырого протеина в биомассе.

Ключевые слова: цинк, почва, аминокислотный состав, биомасса, кормовые травы.
DOI: 10.31857/S0002188120040043

ВВЕДЕНИЕ

Цинк, относясь к группе загрязнителей почв тяжелыми металлами (**ТМ**), является физиологически активным микроэлементом. Входя в состав ферментов, он оказывает влияние на белковый, липидный, углеводный обмен и другие процессы в растениях [1]. В оптимальных количествах цинк улучшает жизнедеятельность растений, при избытке ингибирует их рост и развитие [2, 3]. Подход к изучению его влияния на растения должен вестись с 2-х позиций: как необходимого элемента питания и как токсичного ТМ с регламентацией его количества.

Негативное действие элемента связано с его влиянием на метаболические процессы в растениях. Активация защитных ферментов, синтез металлсвязывающих соединений и стрессовых белков, повышающих устойчивость растений, приводят к изменениям в обмене азота в зависимости от концентрации элемента и фазы ответной реакции. В первой фазе идет усиление приспособительных функций, во второй – угнетение метаболических процессов [4–6].

В качестве ответной реакции в растениях активно синтезируется пролин, являющийся полифункциональным стресспротекторным соединением, направленным на поддержание метаболизма растительного организма на разных стадиях адаптационного процесса [5–8]. Специфической реакцией на воздействие ТМ является синтез металлсвязывающих соединений, обогащенных тиоловыми (–SH) группами – металлотионеинов и фитохелатинов, образованных с участием цистина [9].

Представленные выше изменения в содержании свободных аминокислот характерны для конкретного (тестируемого) периода развития растения. Определение аминокислотного состава белков кормовых трав в период уборки дает возможность оценить результаты сложных процессов метаболизма азота, выявить суммарный эффект воздействия элемента на синтез аминокислот с учетом изменений в развитии растений, а также охарактеризовать качество растительной продукции. Исследования по влиянию цинка, как и других металлов, на качество растительной продукции, ее кормовую ценность крайне незначительны. Показано увеличение содержания суммы аминокислот, главным образом за счет пролина, аспарагиновой и глутаминовой кислот, снижение количества незаменимых аминокислот в зерне ячменя при избытке кадмия [4]. Загрязнение кадмием приводило к росту содержания азота и аминокислот в составе белков, увеличению доли глутаминовой кислоты в белках биомассы гороха, аспарагиновой кислоты – в белках биомассы овса,

снижение доли пролина в растениях обоих видов [10]. Медь в оптимальном для растений количестве увеличивала суммарный выход аминокислот, сбор незаменимых кислот и сырого протеина. В растениях гороха была более высока доля пролина, аспарагиновой кислоты. Избыток меди ингибировал процессы азотного обмена [11].

В ранее проведенных исследованиях по изучению поведения цинка в системе почва–растение на подзолистых почвах в оптимальном количестве элемент повышал биомассу трав и улучшал их микроэлементный состав, при избытке его содержания продуктивность снизилась, наблюдали избыточное накопление элемента в растениях [3].

Цель работы – изучение действия возрастающего содержания цинка в почве на содержание азота и аминокислотный состав наземной массы однолетних кормовых трав (овес и горох в смешанном посеве), оценка питательной ценности белков.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Растения были культивированы в микрополевом опыте в пригороде г. Сыктывкара на легкосуглинистой пахотной подзолистой почве в условиях искусственного загрязнения. Разные по содержанию цинка образцы почвы были получены в результате смешивания ранее загрязненной почвы с почвой контрольных делянок. Почву (10 кг) помещали в полиэтиленовые сосуды без дна (диаметр – 20, высота – 30 см), которые зарывали в траншеи. Эксперимент выполняли в четырехкратной повторности. В качестве тестовых культур использовали овес и горох в смешанном посеве. В каждый сосуд высевали по 15 семян гороха и овса, оставляя впоследствии по десять растений каждого вида. Отбор растительных проб осуществляли при учете продуктивности в фазе образования бобов гороха и фазе колошения овса. Поскольку цинк оказывал влияние на прохождение фенологических фаз и развитие репродуктивных органов, срок уборки и отбора проб устанавливали по развитию растений в контроле.

Определение азота и аминокислот выполняли отдельно для гороха и овса. Для анализов использовали наземную массу растений (стебли, листья, цветы и плоды).

Азот определяли методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-0). Относительная погрешность анализа при содержании азота 0.5–2.6% составляла 18.0%, при содержании 2.6–20% – 6.7%. Содержание аминокислот, входящих в состав белков растений, определяли методом жидкостной хроматографии на аминокислотном анализаторе ААА Т 339 М. Относительная погрешность анализа конкретных аминокислот (при $P = 0.95$) приведена в табл. 2. Гидролиз белков осуществляли в концентрированном растворе серной кислоты в запаянной ампуле при 110°С. Анализы выполняли в экоаналитической лаборатории Института биологии. Методы анализа растительных и почвенных образцов на содержание цинка и условия проведения эксперимента приведены в [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Действие микроэлемента на растения определялось содержанием цинка в почве. Валовое его количество в эксперименте изменялось с 33.8 до 219 мг/кг, повышаясь от невысокого в почве контроля до превышающего ОДК (110 мг/кг) для кислых суглинистых почв, начиная с пятого варианта эксперимента. С ростом валового содержания увеличилась подвижность элемента. Количество цинка, экстрагируемого 1М HCl, изменялось от 5.7 до 108 мг/кг (табл. 1). Более подробно изменения в содержании разных форм элемента приведены в [3].

Влияние цинка на рост и развитие растений во многом определяла специфика культур. Наибольший положительный эффект установлен в отношении бобовых растений. С ростом содержания цинка до 49.3 мг/кг (1М HCl) наблюдали устойчивое увеличение продуктивности гороха. Максимальная биомасса бобовых растений была установлена при содержании цинка 37.8–49.3 мг/кг, она превышала массу в контроле до 6-ти раз. При более высоком содержании цинка в почве продуктивность гороха постепенно снизилась: предел максимально возможного положительного действия цинка в условиях эксперимента был преодолен, стимулирующий эффект сменился на ингибирующее действие. При этом в пределах изученных концентраций цинка биомасса растений была больше контроля.

Продуктивность овса изменялась менее существенно, наиболее высокие показатели были получены при содержании кислоторастворимого цинка в почве от 29.1 до 37.8 мг/кг. При концентрации более 67.6 мг/кг биомасса снизилась до уровня контроля. Благоприятный интервал в содержании цинка для роста и развития злаковой культуры был меньше, чем бобовой.

В изученном диапазоне концентраций растения испытали как стимулирующее, так и ингибирующее действие микроэлемента. При этом растения, особенно горох, больше реагировали на недостаток элемента, чем на его избыток. В пре-

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

Вариант	Цинк, мг/кг почвы (1М HCl)	Масса одного растения (воздушно-сухая, г)		Выход сырого протеина на одно растение, мг	
		горох	овес	горох	овес
Контроль	5.7	0.36± 0.05*	0.40 ± 0.04	29.3	34.0
1	17.8	0.62 ± 0.12	0.40 ± 0.03	62.0	31.1
2	21.8	1.25 ± 0.13	0.46 ± 0.04	133	36.8
3	29.1	1.46 ± 0.13	0.52 ± 0.05	177	39.6
4	34.0	1.80 ± 0.12	0.54 ± 0.04	237	42.2
5	37.8	2.34 ± 0.14	0.53 ± 0.04	293	48.6
6	44.3	2.44 ± 0.15	0.49 ± 0.04	336	45.0
7	49.3	2.41 ± 0.14	0.45 ± 0.03	317	43.2
8	67.6	2.14 ± 0.15	0.41 ± 0.04	260	39.3
9	77.7	1.85 ± 0.15	0.41 ± 0.04	232	40.3
10	108	1.71 ± 0.13	0.39 ± 0.04	208	37.1

*± – стандартное отклонение.

делах стимулирующих концентраций (5.7–67.6 мг/кг, вытяжка 1 М HCl), установлена тесная корреляция между содержанием элемента и продуктивностью гороха ($r = 0.85$, $P < 0.001$), во всем диапазоне концентраций связи были менее тесные ($r = 0.52$, $P < 0.001$). Для овса положительная корреляция ($r = 0.85$, $P < 0.001$) обнаружена лишь в пределах содержания цинка от 5.7 до 44.3 мг/кг.

Обогащение почвы цинком вызвало интенсивное поступление элемента в растения: в надземной массе гороха содержание цинка повысилось с 34 до 443, овса – с 22 до 245 мг/кг (табл. 2), коррелируя с количеством подвижных форм (1М HCl) ($r = 0.86–0.89$, $P < 0.001$).

Влияние цинка положительно сказалось на азотном обмене бобовой культуры. Содержание азота в надземной биомассе (стебли, листья, цветы и бобы) увеличилось с 1.3 в контроле до 1.6–2.2%. Максимум в содержании азота пришелся на растения, выросшие при концентрации микроэлемента в почве, равной 44.3 мг/кг почвы, содержание цинка в горохе при этом составило 315 мг/кг. При более высоком содержании цинка в почве произошло незначительное снижение количества азота в горохе, при этом оно оставалось намного больше, чем в контроле. Синтез соединений, обогащенных азотом, активировал продукционный процесс. Биомасса бобового растения тесно коррелировала с содержанием в ней азота ($r = 0.92$, $P < 0.001$).

При низких концентрациях цинка количество азота в злаковой культуре мало отличалось от контроля (1.36%), но, начиная с варианта 5, оно увеличилось от 1.48 до 1.53% (табл. 2).

Интенсификация азотного обмена и высокая продуктивность гороха при обогащении почв цинком способствовали увеличению выхода сырого протеина, различия с контролем в зависимости от количества цинка в почве составили от 2.1 до 11.5 раза (табл. 1). Максимальные показатели (317–336 против 29.3 мг/растение в контроле) были получены в вариантах с наиболее высокой биомассой и высоким содержанием азота в растениях при наличии в почве кислоторастворимого цинка в количестве 44.3–49.3 мг/кг. Выход сырого протеина в биомассе овса изменился не столь существенно. Наиболее высокие показатели соответствовали содержанию цинка 34.0–49.3 мг/кг, при его превышении качество растительной продукции снизилось.

С ростом количества азота и протеина в наземной биомассе трав изменилось содержание практически всех аминокислот. Суммарное количество аминокислот в горохе увеличилось с 4.49 до 8.46–8.87 г/100 г биомассы (табл. 2). Наиболее продуктивные варианты отличались более высоким их содержанием. Сумма аминокислот положительно коррелировала с продуктивностью ($r = 0.82$, $P < 0.001$), с содержанием азота ($r = 0.84$, $P < 0.001$) и цинка ($r = 0.76$, $P < 0.001$) в растениях.

Для злаковой культуры наиболее высокая сумма аминокислот (5.83–6.29 г/100 г) отмечена в вариантах 4 и 5 (табл. 2). При более высоком содержании цинка синтез аминокислот снизился. Сумма аминокислот соответствовала продуктивности растений ($r = 0.70$, $P < 0.001$). Отсутствие кореляции между содержанием азота и суммарным количеством аминокислот возможно было

Таблица 2. Влияние цинка на аминокислотный состав биомассы кормовых культур

Аминокислота	Варианты											Погрешность, %
	Контроль	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
						Горох						
Аспарагиновая	0.51/11.3	1.00/13.3	1.03/13.1	0.93/11.9	1.00/12.7	1.05/12.4	1.07/12.6	1.13/12.7	1.15/13.0	0.93/11.3	0.82/10.6	16
Треонин	0.23/5.1	0.34/4.6	0.36/4.5	0.32/4.0	0.33/4.2	0.35/4.1	0.35/4.1	0.40/4.5	0.37/4.2	0.36/4.3	0.32/4.2	16
Серин	0.26/5.8	0.38/5.1	0.38/4.9	0.40/5.1	0.38/4.8	0.39/4.7	0.43/5.0	0.46/5.2	0.46/5.2	0.43/5.3	0.42/5.5	14
Глутаминовая	0.55/12.3	0.84/11.3	0.91/11.6	0.89/11.4	0.88/11.1	0.92/10.8	0.92/10.8	0.94/10.6	0.93/10.5	0.91/11.0	0.85/11.1	13
Пролин	0.33/7.5	0.92/12.3	1.02/13.0	1.05/13.4	0.92/11.7	1.24/14.7	1.27/15.1	1.21/13.6	1.25/14.1	1.17/14.3	1.08/14.1	31
Глицин	0.27/6.1	0.43/5.8	0.43/5.5	0.44/5.6	0.44/5.6	0.43/5.0	0.42/4.9	0.45/5.1	0.45/5.1	0.45/5.4	0.41/5.3	16
Аланин	0.30/6.7	0.41/5.5	0.46/5.8	0.45/5.7	0.44/5.6	0.50/5.9	0.50/5.9	0.51/5.7	0.49/5.6	0.50/6.0	0.49/6.4	19
Цистин	0.00/0.0	0.01/0.1	0.01/0.1	0.01/0.2	0.01/0.2	0.01/0.2	0.02/0.2	0.01/0.1	0.01/0.1	0.01/0.1	0.01/0.1	
Валин	0.31/6.9	0.43/5.7	0.44/5.6	0.43/5.5	0.47/5.9	0.47/5.6	0.47/5.5	0.49/5.5	0.47/5.3	0.47/5.7	0.46/5.9	14
Метионин	0.01/0.1	0.01/0.1	0.02/0.2	0.01/0.2	0.01/0.2	0.02/0.2	0.02/0.2	0.01/0.1	0.01/0.1	0.01/0.1	0.01/0.1	
Изолейцин	0.22/5.0	0.31/4.1	0.33/4.2	0.32/4.1	0.33/4.1	0.35/4.1	0.34/4.0	0.34/3.9	0.35/4.0	0.29/3.6	0.30/3.9	12
Лейцин	0.39/8.6	0.59/7.9	0.63/8.0	0.65/8.3	0.64/8.1	0.66/7.8	0.66/7.8	0.67/7.6	0.67/7.6	0.61/7.4	0.56/7.3	13
Тирозин	0.23/5.2	0.43/5.7	0.45/5.7	0.44/5.6	0.45/5.7	0.48/5.7	0.47/5.5	0.50/5.7	0.49/5.6	0.47/5.7	0.43/5.6	20
Фенилаланин	0.21/4.6	0.34/4.6	0.36/4.6	0.35/4.4	0.38/4.8	0.38/4.4	0.38/4.5	0.41/4.6	0.40/4.5	0.38/4.6	0.34/4.4	16
Гистидин	0.09/1.9	0.13/1.7	0.13/1.7	0.15/1.9	0.15/1.9	0.14/1.7	0.15/1.7	0.15/1.7	0.15/1.7	0.15/1.8	0.14/1.8	19
Лизин	0.36/7.9	0.53/7.0	0.56/7.2	0.60/7.7	0.67/8.5	0.66/7.8	0.62/7.4	0.71/8.0	0.70/7.9	0.64/7.8	0.61/8.0	16
Аргинин	0.22/5.0	0.38/5.0	0.34/4.3	0.39/5.0	0.38/4.9	0.41/4.9	0.40/4.7	0.49/5.5	0.47/5.4	0.45/5.5	0.43/5.6	19
Сумма	4.49	7.47	7.85	7.81	7.88	8.46	8.45	8.87	8.83	8.22	7.66	
Содержание азота, %	1.30	1.59	1.70	1.94	2.10	2.00	2.20	2.10	1.95	2.00	1.95	6.7
Содержание цинка, мг/кг	34	199	206	208	227	288	315	389	456	441	443	20

Таблица 2. Окончание

Аминокислота	Варианты											Погрешность, %
	Контроль	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Овес											
Аспарагиновая	0.83/15.0	0.86/15.4	0.83/15.1	0.89/15.9	0.87/14.9	0.93/14.8	0.86/14.1	0.81/14.6	0.80/14.0	0.63/12.0	0.67/13.1	16
Треонин	0.23/4.1	0.22/3.9	0.22/3.9	0.25/4.4	0.24/4.1	0.25/4.0	0.23/3.7	0.22/3.9	0.24/4.2	0.21/4.0	0.21/4.1	16
Серин	0.23/4.2	0.23/4.2	0.23/4.1	0.26/4.6	0.25/4.3	0.28/4.4	0.28/4.6	0.23/4.2	0.25/4.5	0.22/4.1	0.22/4.3	14
Глутаминовая	0.66/11.9	0.70/12.6	0.75/13.4	0.74/13.2	0.78/13.4	0.82/13.0	0.75/12.3	0.72/13.0	0.76/13.3	0.68/12.9	0.67/13.1	13
Пролин	0.89/16.0	0.78/13.9	0.77/13.8	0.79/14.1	0.77/13.3	0.88/14.0	0.93/15.3	0.86/15.5	0.87/15.3	0.82/15.6	0.79/15.4	31
Глицин	0.24/4.4	0.26/4.6	0.25/4.5	0.23/4.0	0.29/5.0	0.30/4.7	0.28/4.6	0.25/4.4	0.26/4.6	0.25/4.7	0.24/4.7	16
Аланин	0.36/6.5	0.38/6.8	0.36/6.5	0.34/6.0	0.38/6.6	0.43/6.9	0.42/6.9	0.37/6.7	0.38/6.8	0.36/6.8	0.34/6.6	19
Цистин	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	
Валин	0.36/6.5	0.32/5.8	0.33/6.0	0.29/5.1	0.34/5.8	0.37/5.9	0.37/6.0	0.33/5.9	0.34/6.0	0.32/6.1	0.31/6.0	14
Метионин	0.01/0.2	0.01/0.2	0.01/0.1	0.01/0.2	0.01/0.2	0.01/0.1	0.01/0.2	0.02/0.3	0.02/0.3	0.02/0.3	0.02/0.4	
Изолейцин	0.19/3.4	0.21/3.8	0.23/4.1	0.19/3.3	0.22/3.7	0.26/4.1	0.25/4.0	0.21/3.8	0.22/3.9	0.21/4.0	0.20/3.9	12
Лейцин	0.39/6.9	0.41/7.4	0.40/7.2	0.38/6.8	0.39/6.7	0.38/6.0	0.41/6.6	0.39/7.0	0.37/6.5	0.38/7.3	0.35/6.8	13
Тирозин	0.27/4.9	0.27/4.9	0.25/4.5	0.29/5.1	0.29/4.9	0.29/4.5	0.30/4.9	0.25/4.5	0.27/4.7	0.27/5.2	0.24/4.7	20
Фенилаланин	0.25/4.4	0.24/4.3	0.22/3.9	0.25/4.4	0.28/4.7	0.30/4.8	0.28/4.6	0.26/4.7	0.27/4.7	0.24/4.6	0.24/4.7	16
Гистидин	0.08/1.5	0.10/1.9	0.10/1.7	0.08/1.5	0.09/1.6	0.11/1.7	0.10/1.6	0.09/1.5	0.09/1.6	0.09/1.7	0.07/1.4	19
Лизин	0.31/5.6	0.33/5.9	0.33/5.9	0.35/6.2	0.35/5.9	0.37/5.9	0.37/6.0	0.32/5.8	0.32/5.6	0.30/5.6	0.31/6.0	16
Аргинин	0.26/4.6	0.25/4.5	0.30/5.3	0.29/5.2	0.29/4.9	0.31/4.9	0.26/4.3	0.23/4.1	0.24/4.2	0.26/5.0	0.26/5.0	19
Сумма	5.55	5.56	5.54	5.62	5.83	6.29	6.09	5.54	5.69	5.24	5.13	
Содержание азота, %	1.36	1.24	1.29	1.21	1.24	1.48	1.48	1.54	1.52	1.58	1.53	18
Содержание цинка, мг/кг	22	87	89	126	173	158	182	164	266	293	245	20

Примечание. Воздушно-сухая масса, аминокислоты: над чертой – г/100 г, под чертой – относительное содержание в %.

связано в злаке с наличием азота в составе небелковых соединений.

С увеличением содержания цинка в почве биомасса гороха обогатилась пролином. Значимые по сравнению с контролем изменения в содержании пролина начались при наличии цинка в почве в количестве 17.8 мг/кг. Количество пролина в растениях при содержании цинка в почве от 37.8 до 67.6 мг/кг было в 3.5 раза больше, чем в контроле.

Значительнее, чем в среднем, в биомассе гороха увеличилось содержание аспарагиновой кислоты, тирозина, лизина и аргинина. С продуктивностью бобовой культуры наиболее тесно было связано содержание пролина, лизина, аланина, валина ($r = 0.84–0.88$, $P < 0.001$), гистидина, аргенина и серина ($r = 0.78–0.79$, $P < 0.001$). Существенно повысилось также содержание метионина, но в виду неустойчивости этой аминокислоты к кислотному гидролизу при высокой температуре можно говорить лишь о тенденции к изменению. При превышении зоны оптимального количества цинка в почве для бобовой культуры появились начальные признаки ингибирования процессов белкового обмена. Суммарное содержание аминокислот несколько снизилось, при этом изменения совпали с небольшим уменьшением биомассы по сравнению с максимальной.

В надземной биомассе овса при концентрации цинка в почве 34.0–49.3 мг/кг (1М HCl) хоть и не так существенно, как в биомассе гороха, увеличилось содержание большинства аминокислот, суммарное их количество превышало контроль на 10–15%. Значимые различия установлены в отношении глутаминовой кислоты в диапазоне концентрации цинка в почве 21.8–67.6, изолейцина и фенилаланина в диапазоне 34.0–44.3, гистидина, лизина и аргенина при содержании цинка 34.0–49.3 мг/кг (1М HCl).

Избыток цинка негативно отразился на синтезе овсом большинства аминокислот, их сумма при содержании элемента в почве >77.7 мг/кг была меньше контроля. Количество аспарагиновой кислоты при превышении этого порога значимо снизилось на 18.0–24.5%. Содержание глутаминовой кислоты при этом осталось бóльшим, чем в контроле. С продуктивностью овса наиболее тесно было связано содержание глутаминовой кислоты ($r = 0.78$, $P < 0.001$), менее тесными были связи с количеством фенилаланина, изолейцина, серина, аланина и лизина ($r = 0.63–0.68$, $P < 0.001$). Как и в бобовой культуре на фоне увеличения содержания цинка в почве было больше содержание цистина.

Показанная динамика содержания аминокислот не в полной мере отражала изменения в составе белков. Относительное их количество (в % от суммы) позволило в большей мере судить об участии аминокислот в синтезе белков, оценить аминокислотный состав растений, а также определить роль отдельных аминокислот в составе белков и других соединений, связанных с адаптацией к экологическим условиям.

В бобовой культуре более всего с ростом концентрации цинка в почве изменилось относительное содержание пролина: в вариантах 4 и 5 его доля увеличилась с 6.45 (контроль) до 14.7–15.1%. Показатель положительно коррелировал с продуктивностью ($r = 0.78$, $P < 0.001$) и с содержанием цинка в растениях ($r = 0.78$, $P < 0.001$). При наличии цинка в почве в растениях была несколько больше также доля аспарагиновой кислоты. При этом относительное содержание глутаминовой кислоты на 1.0–1.5% было меньше, чем в контроле, доля ее в составе белков была отрицательно связана с продуктивностью ($r = -0.87$, $P < 0.001$) и количеством цинка в растении ($r = -0.84$, $P < 0.001$).

Белки биомассы овса в контроле по сравнению с горохом более богаты аспарагиновой кислотой и особенно пролином. Об этом свидетельствовало как абсолютное, так и относительное их количество. Доля пролина в белках овса была в 2 раза больше, чем в составе белков гороха. По содержанию остальных аминокислот злаковая культура уступала бобовой.

Под влиянием цинка в диапазоне его содержания 17.8–37.8 мг/кг участие пролина в белках овса снизилось с 16 до 13.8–14.0%. Более низкий уровень аминокислоты был характерен для более высокопродуктивных растений, со снижением биомассы доля пролина возвращалась к контролю. При содержании цинка >67.6 мг/кг (1М HCl) также уменьшилась доля аспарагиновой кислоты.

В составе белков злакового растения при превышении уровня цинка в почве >21.8 мг/кг обнаружен цистин. В бобовой культуре он был установлен при концентрации 17.8 мг Zn/кг, при этом доля его была больше, чем в злаковой. В контрольных растениях аминокислота не была выявлена. Несмотря на однонаправленный характер изменений, неустойчивость цистина к кислотному гидролизу позволила судить лишь о тенденциях к более интенсивному синтезу важной с точки зрения адаптации растений к повышенным концентрациям металлов аминокислоты.

Важным показателем качества растительной продукции является наличие в белках незамени-

мых аминокислот, к которым относятся валин, изолейцин, лейцин, лизин, метеонин, треонин, триптофан, фенилаланин. Сумма незаменимых аминокислот в бобовой культуре под действием цинка увеличилась в 1.5–1.7 раза. При этом их доля в общей сумме аминокислот уменьшилась с 38 (в контроле) до 34–36%. Однако с учетом продуктивности растений сумма незаменимых аминокислот в биомассе гороха возросла от 2 до 11 раз (с 0.01 до 0.02–0.07 г/растение) с максимумом в вариантах 5–7. Наиболее высокая сумма всех аминокислот (0.20–0.21 г/растение) также была в этих вариантах: анализируемый показатель превышал контроль в 12–13 раз. Из незаменимых аминокислот в горохе наиболее значительно (в 1.9 раза) увеличилось содержание лизина и фенилаланина. Доля их в белках при этом не снизилась, а осталась на уровне контроля.

В злаковой культуре значительных изменений в абсолютном содержании незаменимых аминокислот не происходило, но в вариантах 4 и 5 оно было больше на 10–15% в сравнении с контролем, относительное содержание оставалось равным во всех вариантах. По обеспеченности незаменимыми аминокислотами овес уступал гороху. В последнем в большем количестве содержались изолейцин и лизин: абсолютное их количество было больше, чем в злаке в 1.2 раза, относительное – в 1.5 раза. При обеспечении цинком содержание практически всех незаменимых аминокислот в бобовом растении было более высоким, чем в злаковом. В смешанном посеве культуры дополняли друг друга. Внесение микроэлемента в оптимальном количестве увеличило продуктивность, повысило сбор сырого протеина и не ухудшило пищевую ценность кормовых трав.

В действии цинка на физиологические процессы в растениях следует выделить 3 этапа ответной реакции: недостаток элемента, его оптимальное количество и избыток. В пределах смоделированных концентраций бобовая культура в большей мере реагировала на недостаток цинка, на что указывал значительный рост вегетативной массы, аминокислотной ее составляющей.

Реакция овса на цинк была менее выражена, это связано с меньшей потребностью в нем злаковых культур. Кроме того, дополнительным фактором сдерживания роста и развития растений овса могла быть конкуренция за освещенность и элементы питания с горохом, который превышал злаковое растение как по массе, так и по высоте побегов. Влияние затенения при этом явилось не прямым, а косвенным фактором подавления роста овса, возникшим под влиянием микроэлемента.

Стимулирующее действие цинка было обусловлено низким содержанием элемента в подзолистой почве. По количеству цинка, извлекаемого ацетатно-аммонийным буфером (0.55 мг/кг) почва опыта относится к первой – очень низкой – группе обеспеченности [3].

Благоприятное действие цинка на бобовую культуру определено его важной физиологической ролью. С цинком тесно связан азотный обмен, при его дефиците нарушается синтез белка, содержание его в растениях уменьшается [1, 2, 4]. За счет активации физиологических процессов при обеспечении потребности растений в цинке наблюдали рост содержания азота в растениях и в настоящем эксперименте. Однако при превышении оптимума в бобовой культуре отмечены незначительные признаки ингибирования метаболических процессов, исследованные показатели были меньше максимальных величин.

Высокой продуктивности гороха способствовала лучшая обеспеченность азотом за счет деятельности клубеньковых бактерий. Визуальный осмотр корней выявил большее количества клубеньков, более значительный их размер и более интенсивную окраску при оптимальных для культуры концентрациях цинка.

Изменения в аминокислотном составе под действием ТМ связаны с экспрессией генов в ответ на стресс, в результате которого в растениях активизируется синтез стрессовых белков и металлсвязывающих соединений, повышающих устойчивость и адаптацию растений [2, 5, 6]. Наряду с этим при высоких концентрациях металлов отмечено ингибирование азотного обмена [4, 5]. Начало ингибирования синтеза аминокислот в бобовом растении установлено при концентрации цинка 77.7–108 мг/кг, тогда же отмечено уменьшение биомассы. Некоторый рост количества аминокислот в злаковом растении в период адаптации сменился на его снижение при избытке цинка в почве. Аналогичные изменения в белковом обмене кормовых трав наблюдали при избыточном поступлении кадмия и меди в растения [10, 11]. Увеличение суммы аминокислот и пролина под действием ТМ происходило и в зерне ячменя на дерново-подзолистой почве [4].

Менее значительные изменения относительного содержания преобладающей части аминокислот по сравнению с абсолютными величинами обусловлены генетической стабильностью аминокислотного состава белков. Вместе с тем под действием микроэлементов, оказывающих влияние на синтез адаптационных белков и соединений, изменялось содержание свободных аминокислот, которые так же, как и аминокислоты, входящие в состав белков, переходят в гидролизат

под действием кислоты и высокой температуры и впоследствии анализируются как их сумма.

Кроме того, ускоренное фенологическое развитие гороха под действием цинка изменило структуру урожая: количество репродуктивных органов по сравнению с контролем утроилось, а соотношение между числом сформировавшихся бобов и количеством цветков к моменту уборки возросло с 0.5 до 1.8–2.3. При избытке микроэлемента в почве, наряду с уменьшением биомассы растений, снизилось и количество бобов [3]. Различия между фракциями белков в составе бобов, стеблей и листьев и изменившиеся соотношения между органами также сказались на структуре белков и аминокислотном составе растений [12].

Нестабильность в содержании пролина обусловлена тем, что свободный пролин, являясь одним из компонентов общих клеточных защитных систем, активно синтезируется в клетках растений в ответ на разные стрессовые воздействия, в т.ч. и ТМ [5, 7, 8]. С этим скорее всего было связано отмеченное увеличение содержания этой аминокислоты в бобовой культуре. Уменьшение доли пролина в составе белков овса могло быть результатом ингибирования синтеза аминокислоты при избыточной транслокации цинка в органы растений. Факт снижения синтеза свободного пролина в листьях ячменя с ростом концентрации ТМ в почве приведен в работе [13]. При низких концентрациях металла наблюдали рост содержания пролина. Разнонаправленные изменения связывали с фазами ответа растительного организма на стресс (фазой адаптации и фазой повреждения).

Нарушение баланса между количеством свободного пролина и пролином в составе белков, между синтезом и деструкцией аминокислоты в результате ответных реакций на возрастающее содержание цинка в растениях и привело к непропорциональному снижению его количества в злаковой культуре при высоких концентрациях элемента в почве. В горохе подобные изменения лишь наметились при максимальной транслокации цинка в органы растений. Возможно, что с более высоким содержанием пролина в составе белков бобового растения в какой-то мере связана бóльшая его толерантность по отношению к цинку. Высокопродуктивные растения отличались более высоким содержанием пролина в составе белков. Подобная зависимость установлена и при воздействии кадмия и меди [10, 11].

Увеличение доли аспарагиновой кислоты в бобовом растении на этапе адаптации обусловлено тем, что она, как и глутаминовая кислота, участвует в реакциях переаминирования, являясь источником азота для синтеза новых аминокислот, входящих в состав белков и соединений, способствующих интоксикации ТМ [14]. В частности, биосинтез пролина осуществляется из глутамина, им же завершается и его деструкция [7, 15]. Усиленный синтез глутаминовой кислоты в злаковом растении мог осуществляться за счет возросшей под действием ТМ активности глутаминсинтетазы [16]. Более высокий уровень содержания аминокислоты сохранялся при разных концентрациях цинка в почве.

Отмеченная тенденция к возрастанию синтеза цистина при наличии цинка в почве обусловлена тем, что ТМ в растениях могут связываться с цистеином, содержащим тиоловые (–SH) группы [17]. Цистеин в свою очередь образуется при восстановлении цистина. Синтез металлсвязывающих соединений с тиоловыми группами – металлотионеинов и фитохелатинов в ответ на воздействие ТМ металлов является одним из наиболее специфических механизмов поддержания гомеостаза в растительной клетке [9].

Следует отметить, что в реакции растений на возрастающее содержание цинка в почве так же как и в качестве растительной продукции, в том числе и содержании незаменимых аминокислот, отразились специфические особенности растений. Незаменимые аминокислоты не синтезируются в организме человека и животных, поэтому важно обеспечить их поступление в организм животных с кормами [14]. Бобовые растения характеризовались более высокими показателями качества растительной продукции. Даже при некотором снижении доли незаменимых кислот, суммарное их количество в биомассе гороха, так же, как и суммарное содержание всех аминокислот, и сбор сырого протеина, под влиянием цинка существенно увеличились.

Анализ аминокислотного состава белков однолетних трав позволил оценить результаты сложных процессов метаболизма азота, выявить суммарный эффект воздействия цинка на синтез аминокислот с учетом изменений в развитии растений, а также охарактеризовать качество продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Действие цинка на азотный обмен однолетних кормовых трав определялось концентрацией элемента в почве и спецификой культуры, реакция овса была менее выражена. Изменения в метаболизме бобового растения в большей мере вызывались недостатком элемента. При оптимальном количестве цинка в почве в биомассе гороха значительно увеличилось содержание азота и большинства аминокислот, при превышении оптимума началось ингибирование процессов. В большей мере возросло как абсолютное, так и относительное содержание пролина. На этапе

адаптации наблюдали также рост относительного количества аспарагиновой кислоты.

Под действием цинка существенно увеличился суммарный выход аминокислот, в т.ч. и незаменимых, и сбор сырого протеина с биомассой бобовой культуры, что улучшило качество растительной продукции.

При определении потребности в цинксодержащих удобрениях следует руководствоваться не только влиянием микроэлемента на рост и развитие растений, но учитывать также показатели качества продукции растениеводства. Определение границ между недостатком, оптимумом и избытком элемента, приводящим к снижению продуктивности, ухудшению качества продукции и загрязнению окружающей среды является чрезвычайно важным для решения вопросов стабильности агроэкосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Школьник М.Я.* Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука, 1974. 323 с.
2. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
3. *Елькина Г.Я.* Поведение цинка в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2009. № 11. С. 57–64.
4. *Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 5. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. 148 с.
5. *Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф.* Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2007. 172 с.
6. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2014. 194 с.
7. *Кузнецов В.В., Шевякова Н.И.* Пролин при стрессе: биологическая роль, метаболизм, регуляция // Физиология растений. 1999. Т. 46. № 2. С. 321–336.
8. *Серёгин И.В., Иванов В.Б.* Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
9. *Серегин И.В.* Фитохелатины и их роль в детоксикации кадмия у высших растений // Усп. биол. химии. 2001. Т. 41. С. 283–300.
10. *Елькина Г.Я.* Влияние разных уровней загрязнения почвы кадмием на содержание аминокислот в растениях // Агрохимия. 2014. № 5. С. 72–78.
11. *Елькина Г.Я.* Содержание аминокислот в растениях при разных уровнях содержания меди в почве // Агрохимия. 2018. № 12. С. 88–96.
12. *Измайлов С.Ф.* Азотный обмен в растениях. М.: Наука, 1986. 320 с.
13. *Селезнева Е.М., Гончарова Л.И., Белова Н.В.* Влияние кадмия на некоторые морфофизиологические и биохимические показатели ячменя // Агрохимия. 2008. № 4. С. 82–86.
14. *Власюк П.А., Шкварук Н.М., Сапатый С.Е., Шамотиенко Г.Д.* Химические элементы и аминокислоты в жизни растений и человека. Киев: Наукова думка, 1974. 220 с.
15. *Wang Z., Yuan Y., Ou J., Lin Q., Zhang C.* Glutamine synthetase and glutamate dehydrogenise contribute differentially to proline accumulation in leaves of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings to different salinity // J. Plant Physiol. 2007. V. 164. P. 695–701.
16. *Astolfi S., Zuchi S., Passera C.* Effect of cadmium on the metabolic activity of *Avena sativa* plants grown in soil or hidroponic culture // Biol. Plant. 2004. V. 48. № 3. P. 413–418.
17. *Дубинина Ю.Ю., Дульцева Г.Г., Палесский С.В., Скубневская Г.И.* Изучение химической природы защитной реакции растений на избыточное содержание кадмия в почве // Экол. химия. 2003. № 12. С. 41–46.

Influence of Different Zinc Content in Soil on Amino Acid Composition of Fodder Grass Biomass

G. Ya. Elkina

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

It was studied the effect of zinc on the content of amino acids in annual forage crops (peas and oats in mixed seeding). Zinc in concentrations of 17.8–67.6 mg/kg (extract 1M HCl) contributed to an increase in the content of amino acids in the ground mass of peas, with a higher content of its processes were ingested. Most of all, the content of proline and the relative amount (in % of the amount of amino acids) of aspartic acid increased. Changes in the composition of oat proteins were less pronounced. With an optimal amount of zinc, the total yield of amino acids, the proportion of essential acids and the amount of raw protein in the biomass increased.

Key words: zinc, soil, amino acid composition, biomass, forage grasses.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 66–75

УДК 631.45:552.313

ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПЕПЛЫ КАМЧАТКИ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК УЛУЧШЕНИЯ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ПОЧВ

© 2020 г. Л. В. Захарихина[1,*], Ю. С. Литвиненко[2], В. В. Гайнатулина[3], Н. Ю. Аргунеева[3], М. А. Макарова[3], О. В. Бредун[4], Н. И. Ряховская[5]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт цветоводства и субтропических культур
354002 Сочи, Краснодарский край, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, Россия
[2] ООО ЭкоГеоЛит
Москва 119330, ул. Мосфильмовская, 17б, Россия
[3] Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
684033 с. Сосновка, Елизовский р-н, Камчатский край, ул. Центральная, 4, Россия
[4] ФГУП "Сосновское"
684033 с. Сосновка, Елизовский р-н, Камчатский край, ул. Центральная, 3, Россия
[5] Российский университет кооперации, Камчатский филиал
683003 Петропавловск-Камчатский, Камчатский край, ул. Ключевская, 11, Россия
**E-mail: zlv63@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22.07.2019 г.
После доработки 05.11.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

Впервые в международной практике проведены сельскохозяйственные опыты по внесению вулканических пеплов Камчатки в сочетании с традиционными минеральными удобрениями в охристые вулканические почвы (Andosols Acroxic). В результате в разных вариантах полевого опыта были получены прибавки урожайности относительно фона: картофеля в 2014 г. – на 31–63, в 2017 г. – на 7–19, в 2018 г. – на 14–31%; тимофеевки луговой в 2015 г. – на 21–50%. Производственный опыт по выращиванию однолетних кормовых трав в 2016 г. показал увеличение урожайности на 32%. После снятия урожая в почвах установлено увеличение содержания подвижного фосфора (по Кирсанову) на 7–21%, подвижного калия – на 16–77%, отмечен рост степени насыщенности почв основаниями на 9–27%. Относительно фона установлено увеличение содержания подвижных (ацетатно-аммонийная вытяжка) форм Co (на 32%), Mn (на 29%), S (на 20%), Zn (на 23%) и Cu (на 8%). Кроме повышения урожайности агрокультур в кормовых травах отмечено увеличение содержания сырого протеина, в клубнях картофеля – содержания крахмала, улучшилась его устойчивость к заболеваниям.

Ключевые слова: вулканические пеплы, Камчатка, биопродуктивность почв, урожайность, агроценозы.

DOI: 10.31857/S0002188120040134

ВВЕДЕНИЕ

Повышение биопродуктивности экосистем при поступлении продуктов вулканической деятельности связывают с наиболее очевидной и часто обсуждаемой причиной – привносом дополнительных элементов питания минерального происхождения с вулканическими пеплами [1–4]. Однако при достаточно обширных сведениях о благоприятных свойствах вулканических пеплов специфика изменений свойств экосистем при поступлении в них свежих продуктов вулканической деятельности и механизм повышения биопродуктивности почв до настоящего времени остаются мало изученными.

Цель работы – в полевых и производственных опытах исследовать эффективность применения вулканических пеплов при выращивании агрокультур и провести анализ механизмов повышения биопродуктивности почв.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые опыты проводили в 2014–2018 гг. в центральном районе южной почвенной провинции Камчатки [5, 6] на опытных полях Камчат-

ского научно-исследовательского института сельского хозяйства (**КНИИСХ**). Земли КНИИСХ (юг Камчатки, долина р. Авача) располагаются в типичных условиях южной сельскохозяйственной зоны полуострова. Производственный опыт выполняли в этом же районе на полях сельскохозяйственного предприятия “Сосновское”. Для района характерны охристые вулканические почвы, относящиеся по классификации почв России (2004 г.) к стволу синлитогенных почв, к отделу вулканических [7]. В соответствии с мировой коррелятивной базой почвенных ресурсов [8] данные почвы являются Andosols Acroxic.

Территории опытных полей КНИИСХ заняты агрогенно-преобразованными почвами – вулканическими агроохристыми гетерогенными. Почвы характеризуются высоким содержанием органического вещества. Потери при прокаливании в поверхностных грубогумусовых горизонтах составляют ~53–80%. Содержание гумуса в органоминеральных горизонтах высокое – до 7–10%. Реакция среды в почвах кислая и слабокислая. Степень насыщенности основаниями низкая, в среднем 30–40%. Наиболее насыщены основаниями поверхностные грубогумусные горизонты (40–60%). Для почв, за исключением охристого (срединного) суглинистого горизонта BAN, характерен супесчаный гранулометрический состав. Содержание фракций <0.01 мм составляет от 5.6 до 7.7% в органогенных и от 10 до 14.5% – в пепловых горизонтах. Почвы отличаются низкой плотностью <0.9 г/см^3 и хорошей водоудерживающей способностью [5, 9–11].

По данным Камчатского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, вегетационный период 2014 г. на Камчатке был теплее обычного (сумма $t > 10$°C на 23% выше средней многолетней). При этом общее количество осадков за летне-осенний период 2014 г. было меньше среднемноголетней нормы на 24%. Самым неблагоприятным по климатическим условиям был 2015 г., который отличался обилием осадков (на 36% выше среднемноголетних показателей) и самыми низкими температурами. 2016 и 2017 гг. по температурному режиму были близки к теплому 2014 г. (сумма $t > 10$°C на 18 и 22% выше среднемноголетней нормы соответственно), однако количество осадков в эти годы было существенно больше, чем в 2014 г., и превышало среднемноголетнюю норму. Повышенная влажность отмечена как в начале вегетационного периода, так и в конце лета–начале осени при созревании агрокультур. В сравнении с 2016 и 2017 гг. 2018 г. был несколько холоднее, но близким по количеству осадков.

В почвы вносили свежевыпавшие вулканические супесчаные пеплы средне-основного состава извержений вулканов Шивелуч и Безымянный.

Учеты и наблюдения были проведены в соответствии с общепринятыми методиками [12]. Для оценки существенности различий изученных показателей в вариантах опытов устанавливали наименьшую существенную разность на 5%-ном уровне значимости ($\boldsymbol{НСР_{05}}$). Определяли ошибку разности $\boldsymbol{Sd}$ с учетом ошибки выборки $\boldsymbol{Sx_1}$, рассчитанной по данным всех повторений вариантов опыта с внесением пеплов, и величины $\boldsymbol{Sx_2}$, установленной по результатам повторений в фоновом варианте опыта без внесения пепла.

Полевые опыты заложены на участках, на которых за 4 года до проведения опыта в течение 3-х лет был чистый пар, а в предыдущий год перед экспериментом они были засеяны овсом. Средняя урожайность овса в вариантах опыта составила 26.6 т/га, отклонения от среднего в вариантах находились в интервале от –0.7 до +0.9 т/га. Расчет наименьшей существенной разности ($НСР_{05}$ = = 1.35 т/га) показал отсутствие статистически значимых различий урожайности овса в вариантах, что свидетельствовало о выравненности опытных площадок.

Опыт закладывали в 4-х повторениях. Размер опытных делянок в 2014 и 2015 гг. составлял 10, в 2017 и 2018 гг. – 25 м^2, размещение вариантов – систематическое, шахматным способом. Ширина торцевых защиток составляла 2 м, междуярусных полос – 1 м.

Под картофель пеплы вносили в количестве 2.5–7.5 т/га в сочетании с минеральными удобрениями. В качестве традиционной минеральной добавки использовали удобрения, содержащие основные элементы питания, – азот, фосфор, калий в дозах N120P120K120. В 2017, 2018 гг. исследовали действие вулканических пеплов на урожайность картофеля как на фоне минеральных удобрений, так и без их внесения.

При выращивании тимофеевки исследовали влияние вулканических пеплов на урожайность трав на фоне минеральных удобрений (N90P90K90) и без их применения. Дозы пепла и в первом и во втором случаях составляли 2.5–5.0 т/га.

Производственный опыт был реализован в 2016 г. также на агроохристых вулканических почвах на базе производственного сельскохозяйственного предприятия ФГУП “Сосновское” (п. Сосновка). Опыт заложили на площади 10 га для однолетних кормовых трав, представленных смесью овса (сорт Кречет яровой, посев 160 кг семян/га, доля 82.05%), вики сорта Льговская-22,

Таблица 1. Эффективность применения вулканических пеплов при выращивании картофеля

Вариант	Урожайность		Крахмал		Поражение клубней ризоктониозом		Лежкость картофеля		Экономическая эффективность
	т/га	± к фону,%	%	± к фону, %	%	± к фону, %	здоровые клубни, %	±, %	тыс. руб./га
2014 г.									
Без удобрений (контроль)	6.2	–	11.0	–	14.5	–	–	–	–
(NPK)120 (фон 1)	11.8	–	10.2	–	9.25		66.1	–	–
Фон 1 + пепел$_с$ 2.5 т/га	15.6	+32.0	10.5	+2.94	12.0	+2.8	77.7	+11.6	50.0
Фон 1 + пепел$_с$ 5.0 т/га	15.5	+31.0	11.0	+7.84	8.0	–1.3	85.0	+18.9	–
Фон 1 + пепел$_с$ 7.5 т/га	16.3	+38.0	10.2	+0.00	10.75	+1.5	70.9	+4.8	–
$НСР_{0.5}$	1.2			0.52			6.6		–
(NPK)60 (фон 2)	10.5	–	11.2	–	14.5		63.0		–
Фон 2 + пепел$_с$ 2.5 т/га	16.5	+57.0	11.5	+2.68	7.5	–7.0	71.8	+8.8	262.4
Фон 2 + пепел$_с$ 5.0 т/га	17.1	+63.0	11.0	–1.79	7.0	–7.5	84.3	+21.3	242.5
Фон 2 + пепел$_с$ 7.5 т/га	17.2	+63.0	10.7	–4.46	8.5	–6.0	67.5	+4.5	197.5
$НСР_{05}$	1.2			0.67			8.2		
2017 г.									
Без удобрений (контроль)	9.3	–	10.6	–	2.7	–	95.6	–	–
(NPK)120 (хозяйственный контроль)	23.2	–	10.7	–	3.7	–	94.7	–	–
(NPK)90 (фон 1)	22.7	–	10.3	–	3.9	–	87.4	–	–
Фон 1 + пепел$_с$ 2.5 т/га	23.3	+2.6	11.1	+7.8	3.2	–17.9	92.1	4.7	–
Фон 1 + пепел$_с$ 5.0 т/га	23.1	+1.8	11.0	+6.8	3.5	–10.3	89.0	1.6	–
Фон 1 + пепел$_б$ 2.5 т/га	24.2	+6.6	11.0	+6.8	3.6	–7.7	92.4	5.0	33.3
Фон 1 + пепел$_б$ 5.0 т/га	26.9	+18.5	11.0	+6.8	3.7	–5.1	94.1	6.7	118.3
Пепел$_с$ 2.5 т/га	10.5	12.9	10.6	–	5.0	–	94.1	6.7	–
Пепел$_с$ 5.0 т/га	8.4	-9.7	10.2	–	3.7	–	91.0	3.6	–
(NPK)60 (фон 2)	21.8	–	10.5	–	1.8	–	93.2		–
Фон 2 + пепел$_с$ 2.5 т/га	22.1	+1.4	10.7	+1.9	4.3	+139	93.7	0.5	–

Таблица 1. Окончание

Вариант	Урожайность		Крахмал		Поражение клубней ризоктониозом		Лежкость картофеля		Экономическая эффективность
	т/га	± к фону,%	%	± к фону, %	%	± к фону, %	здоровые клубни, %	±, %	тыс. руб./га
Фон 2 + пепел$_с$ 5.0 т/га	22.5	+3.2	10.7	+1.9	2.4	+33.3	93.6	0.4	–
Фон 2 + пепел$_б$ 2.5 т/га	23.7	+8.7	10.7	+1.9	2.3	+27.8	94.8	1.6	–
Фон 2 + пепел$_б$ 5.0 т/га	22.1	+1.4	10.7	+1.9	3.3	+83.3	94.7	1.5	–
$НСР_{05}$	1.4			0.7				4.2	
				2018 г.					
Без удобрений (контроль)	9.8	–	9.7	–	3.0	–	–	–	–
(NPK)120 (хозяйственный контроль)	17.7	–	9.9	–	5.4	–	–	–	–
(NPK)90 (фон 1)	16.8	–	9.9	–	6.8	–	–	–	–
Фон 1 + пепел$_с$ 2.5 т/га	19.5	16.1	10.2	+3.0	6.4	–5.9	–	–	93.3
Фон 1 + пепел$_с$ 5.0 т/га	18.9	12.5	10.6	+7.1	5.3	–22.1	–	–	13.3
Фон 1 + пепел$_б$ 2.5 т/га	20.2	20.2	10.3	+4.0	4.6	–32.4	–	–	128.3
Фон 1 + пепел$_б$ 5 т/га	21.9	30.4	10.1	+2.0	3.8	–44.1	–	–	163.3
Пепел$_с$ 2.5 т/га	11.0	12.2	9.6	–1.0	8.7	190	–	–	–
Пепел$_с$ 5.0 т/га	11.8	20.4	10.4	+7.2	5.5	83.3	–	–	–
Пепел$_б$ 2.5 т/га	11.4	16.3	10.3	+6.2	3.5	16.7	–	–	–
Пепел$_б$ 5.0 т/га	12.6	28.6	10.2	+5.2	2.8	–6.7	–	–	–
(NPK)60 (фон 2)	13.7	–	10.2	–	2.1		–	–	–
Фон 2 + пепел$_с$ 2.5 т/га	15.6	13.9	10.3	+1.0	3.8	81.0	–	–	53.3
Фон 2 + пепел$_с$ 5.0 т/га	17.2	25.5	10.6	+4.0	2.2	4.8	–	–	83.3
Фон 2 + пепел$_б$ 2.5 т/га	17.4	27.0	10.3	+1.0	3.5	66.7	–	–	143.3
Фон 2 + пепел$_б$ 5.0 т/га	17.9	30.7	10.2	+0.0	4.2	100	–	–	118.3
$НСР_{05}$	1.2			0.67					

Примечания. 1. Пепел$_с$ – свежий пепел вулкана Шивелуч, пепел$_б$ – пепел вулкана Безымянный (извержение 1956 г). То же в табл. 2–5. 2. Прочерк – нет данных. 3. Для полевых опытов все данные приведены как среднее в 4-х повторностях. То же в табл. 2

гороха сорта Аксайский усатый-55, ячменя сорта Ач (посев по 10 кг семян/га, доли по 5.13%) и ярового рапса сорта Лагонда (посев 5 кг семян/га, доля 2.56%). Пепел вносили в почву разбрасывателем минеральных удобрений МВУ-5 до применения минеральных удобрений, которые вносили позже в дозе N90P90K90. Заделку удобрений в почву выполняли вместе с пеплами перед посевом трав.

Для анализа химического состава вулканических пеплов и агроохристых почв в них определяли подвижные формы 65 элементов. Анализировали ацетатно-аммонийную вытяжку (pH 4.8) методами ICP-MS- и ICP-AES-анализов без разложения образцов по аттестованной методике НСАМ № 500-МС “Определение элементного состава азотнокислых и ацетатно-аммонийных вытяжек из почв методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой”. Отношение твердая фаза : раствор = 1 : 10. Необходимо уточнить, что на основе названной методики применяли технологию совместного использования ICP-MS- и ICP-AES-методов, которая расширяет спектр определяемых химических элементов и позволяет дополнительно устанавливать ICP-AES-методом содержание Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Fe, Si, P и S [13].

Определение содержаний 69 химических элементов в растениях (клубнях картофеля) выполняли также с использованием количественных методов анализа ICP-MS и ICP-AES, по аттестованной методике НСАМ № 512/МС “Определения элементного состава пробы растительного происхождения атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами анализа”.

В почвах оценивали следующие показатели: pH водной и солевой вытяжки (ГОСТ 26483-85), гидролитическую кислотность по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91), содержание обменных форм кальция и магния (комплексонометрическим методом, ГОСТ 26487-85), подвижных соединений фосфора и калия (методом Кирсанова, ГОСТ Р 54650-2011). В клубнях картофеля определяли содержание нитратов и крахмала (ГОСТ 7194-81). Учет урожая проводили сплошным методом. Весной 2015 и 2018 гг. установлены также параметры лежкости опытного картофеля, заложенного после снятия урожая в хранилища КНИИСХ осенью 2014 и 2017 гг. Проведен поштучный учет клубней картофеля, пораженных различными заболеваниями, и установлена доля здоровых клубней от общей массы картофеля в каждом варианте опыта.

Пеплы вулкана Шивелуч, использованные в эксперименте, представлены преимущественно супесчаным, пылевидным материалом последних современных извержений вулкана, отобранным из свежих наносов, снесенных водами к подножию вулканической постройки. Супесчаные пеплы вулкана Безымянный извержения 1956 г. отобраны из аэральных отложений на некотором удалении от вулкана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые опыты. В разных вариантах опыта в 2014 г. (только пепел вулкана Шивелуч) были получены прибавки урожайности картофеля относительно фонового варианта от 31 до 63%, в среднем 47%. В 2017 г. достоверные прибавки урожайности при внесении пеплов были меньше – от 6.6 до 18.5% (табл. 1). При этом более высокая урожайность отмечена в вариантах с внесением пеплов вулкана Безымянный.

В 2018 г. прибавка урожайности в разных вариантах опыта составила от 14 до 31%. Вновь подтвердился вывод о более эффективном действии на урожайность картофеля пеплов вулкана Безымянный. При применении вулканических пеплов без внесения минеральных удобрений прибавка урожая относительно фона без внесения удобрений была также существенной – от 16 до 29%. Однако абсолютная величина урожайности в этом варианте была низкой – от 1.1 до 1.3 т/га.

Наряду с повышением урожайности отмечено улучшение лежкости картофеля. Для урожая 2014 г. статистически достоверное количество здоровых клубней картофеля к весне следующего года увеличилось относительно фона на 8.8–21.3%, для урожая 2017 г. – на 4.7– 6.7%.

При дозе минеральных удобрений (NPK)60 в 2014 г., (NPK)90 в 2017 и 2018 гг. при внесении пеплов отмечено снижение показателя поражения клубней ризоктониозом. Во все годы эксперимента фактически во всех вариантах опытов с пеплом отмечен достоверный рост содержания крахмала в клубнях картофеля.

В опыте с тимофеевкой луговой в 2015 г. при применении вулканических пеплов вулкана Безымянный, без добавок минеральных удобрений статистически значимые прибавки урожайности относительно фона были получены при максимальной дозе пепла 5 т/га – на 29.4%, при дозе 2.5 т/га – на 23.5% (табл. 2). Внесение в почву только свежих вулканических пеплов вулкана Шивелуч фактически не привело к существенному положительному эффекту. Необходимо отметить, что как и в эксперименте с картофелем, во всех вариантах с применением одних вулканических пеплов абсолютная урожайность тимофеевки луговой была также довольно низкой – до 8.8 т/га. В то время как урожайность этой кормовой куль-

Таблица 2. Эффективность применения вулканических пеплов при выращивании тимофеевки (2015 г.)

Вариант	Урожайность, т/га	± к фону, т/га	± к фону, %	Экономическая эффективность, тыс. руб./га
Без удобрений (контроль)	6.8	–	–	–
Пепел$_б$ 2.5 т/га	8.4	1.6	23.5	–
Пепел$_б$ 5.0 т/га	8.8	2.0	29.4	–
Пепел$_с$ 2.5 т/га	7.0	0.2	2.9	–
Пепел$_с$ 5.0 т/га	6.8	0.0	1.0	–
$НСР_{05}$		1.9		
(NPK)90 (фон)	16.5			–
Фон + пепел$_б$ 2.5 т/га	21.3	4.8	29.0	105.52
Фон + пепел$_б$ 5.0 т/га	24.7	8.2	49.6	165.68
Фон + пепел$_с$ 2.5 т/га	20.9	4.4	26.6	92.56
Фон + пепел$_с$ 5.0 т/га	20.0	3.5	21.4	13.4
$НСР_{05}$		2.0		

туры в вариантах опыта с внесением пеплов совместно с минеральным удобрением достигала 24.7 т/га. Таким образом, установлено, что применение исследованных вулканических пеплов самостоятельно, без добавок традиционных минеральных удобрений, нельзя рассматривать как эффективный прием повышения урожайности.

При внесении в почву пеплов как вулкана Безымянный, так и вулкана Шивелуч, в сочетании с минеральными удобрениями в дозе N90P90K90 урожайность тимофеевки луговой увеличилась существенно относительно фона. Прибавки урожайности составили 29–50% при внесении пеплов вулкана Безымянного и 21–27% при внесении пеплов вулкана Шивелуч.

Производственный опыт. В 2016 г. применение пеплов с минеральными удобрениями в дозе N90P90K90 на поле однолетних кормовых трав показал прирост их урожайности на 32.2% (табл. 3). В зеленой массе трав отмечено повышение относительно фона содержания общего азота (на 25.8%), фосфора (на 50%), сырого протеина (на 12%).

Повышение продуктивности агроценозов при проведении опытов 2014–2018 гг. по использованию вулканических пеплов в сельском хозяйстве можно связывать с двумя возможными факторами:

– улучшением физических свойств почв, обусловленным поступлением дополнительного минерального вещества;

– изменением химического состава почв при внесении вулканических пеплов.

Внесение пеплов никак не могло повлиять на улучшение физических свойств почв, имеющих механический состав (супесчаный), близкий к составу примененных пеплов. Водоудерживающая способность почв, зависящая от их гранулометрического и минералогического составов, содержания гумуса, структурного состояния, пористости и плотности, также не может меняться при внесении свежих пеплов. Последние не способны существенно изменить перечисленные показатели и без того рыхлых, пористых, с высокой водоудерживающей, но низкой водоподъёмной способностью вулканических почв [5, 9–11], всегда содержащих в большем или меньшем количестве вулканические пеплы более древних извержений.

Таблица 3. Влияние минеральных удобрений и пепла вулкана Шивелуч на урожай и качество зеленой массы однолетних кормовых трав (производственный опыт 2016 г.)

Показатели урожайности и качества кормовых трав		Варианты	
		(NPK)90 (фон)	фон + пепел$_с$ 2.0 т/га
Урожайность	т/га	15.6	19.5
	± к фону %	–	32.2
Азот	%	9.02	11.4
	± к фону, %	–	25.8
Фосфор	%	0.08	0.12
	± к фону, %	–	50.0
Сырой протеин	%	3.9	4.37
	± к фону, %	–	12.0
Экономическая эффективность, тыс. руб./га		–	196.39

Таблица 4. Изменение свойств почв при внесении вулканических пеплов при выращивании картофеля (2014 г.) и кормовых трав (2016 г.)

Вариант	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	Гидролитическая кислотность	Сумма обменных оснований	Степень насыщенности почв основаниями		P_2O_5		K_2O	
							подвижный (по Кирсанову)			
			мг-экв/100 г абсолютно сухой почвы		%	±, %*	мг/кг	±, %	мг/кг	±, %
2014 г.										
Без удобрений – контроль	4.9	5.4	3.26	4.07	55.5	–	164	–	104	–
N120P120K120 (фон 1)	4.7	5.6	4.14	3.13	43.1	–	180	–	150	
Фон 1 + пепел$_c$ 2.5 т/га	4.7	5.7	3.26	4.07	55.5	+12.4	174	–3.5	204	+36.3
Фон 1 + пепел$_c$ 5.0 т/га	4.6	5.2	3.87	8.7	69.2	+26.2	218	+21.1	230	+53.6
Фон 1 + пепел$_c$ 7.5 т/га	4.6	5.2	3.96	9.10	69.7	+26.6	207	+14.8	265	+76.8
N60P60K60 (фон 2)	4.6	5.2	3.96	4.65	54.0	–	157	–	123	–
Фон 2 + пепел$_c$ 2.5 т/га	4.7	5.7	3.56	5.10	58.9	+4.9	175	+11.3	175	+42.2
Фон 2 + пепел$_c$ 5.0 т/га	4.9	5.2	3.12	7.10	63.3	+9.3	168	+6.9	158.3	+28.6
Фон 2 + пепел$_c$ 7.5 т/га	4.7	5.7	3.05	6.90	69.3	+15.3	138	–12.4	142.3	+15.6
2016 г.										
N90P90K90 (фон)	4.0	4.3	22.6	3.13	12.2	–	113	–	115	–
Фон + пепел$_c$ 2.0 т/га	4.1	4.3	28.3	8.76	23.6	+11.4	271	+140	167	+45.2

* Относительно фона.

Полученные результаты позволили говорить о повышении биопродуктивности почв за счет изменения их химического состава при внесении пеплов. После снятия урожая картофеля в опыте 2014 г., несмотря на связанный с этим естественный вынос из почв элементов питания, в большинстве вариантов с внесением пепла установлено увеличение содержания подвижного фосфора на 7–21% и подвижного калия на 16–77% (табл. 4). Кроме того, в сравнении с фоном наблюдали снижение гидролитической кислотности, рост содержания суммы обменных оснований и соответственно увеличение такого важного для почвы показателя, как степень насыщенности почв основаниями при фактически неизменном pH. В производственном опыте по применению пеплов на однолетних кормовых травах наблюдали схожие изменения обсуждаемых показателей, а увеличение содержания подвижного фосфора достигало 140%.

В почвах после снятия урожая в вариантах с применением пеплов установлено увеличение относительно фона содержания подвижных форм Co (на 32%), Mn (на 29%), S (на 20%), Zn (на 23%) и Cu (на 8%) (табл. 5).

Отмечено также увеличение содержания в клубнях картофеля крахмала, повышалась его устойчивость к заболеваниям за счет лежкости клубней, снижения их зараженности ризоктониозом (табл. 1).

Аналогичный эффект при внесении пеплов был отмечен при проведении по нашей инициативе вегетационного опыта с кукурузой в Кубанском аграрном университете [14]. На фоне увеличения в фазе трубкования высоты растений кукурузы, листостебельной массы, объема корневой системы при внесении пепла отмечали также повышение потребления растениями минерального азота (на 20–36%) и фосфора (на 25–43) из почвы вегетационных сосудов.

В целом внесение вулканических пеплов в почву не вызывало увеличения содержания химических элементов в клубнях картофеля (табл. 5). Напротив, содержание большинства из них в кар-

Таблица 5. Изменения содержания (мг/кг) подвижных форм (ацетатно-аммонийная вытяжка, pH 4.8) химических элементов в почвах и химического состава клубней картофеля (мг/кг) при внесении пепла вулкана Шивелуч с минеральными удобрениями в сравнении с фоновым вариантом (2014 г.)

Элемент	Почва			Клубни картофеля			Элемент	Почва			Клубни картофеля		
	N60P60K 60 (фон)	фон + пепел$_c$ 5.0 т/га	±, %*	N60P60K60 (фон)	фон + пепел$_c$ 5.0 т/га	±, %*		N60P60K 60 (фон)	фон + пепел$_c$ 5.0 т/га	±, %*	N60P60K 60 (фон)	фон + пепел$_c$ 5.0 т/га	±, %*
Li	–**	–	–	0.011	0.011	0.0	Cd	0.04	0.04	+13.9	0.025	0.020	–20.0
Be	0.031	0.026	–16.1	–	–	–	Sn	–	–	–	0.054	0.047	–13.0
B	–	–	–	8	6.9	–13.8	Sb	–	–	–	0.004	0.003	–17.9
Na	23	21	–8.7	38	33	–13.2	Cs	0.031	0.034	–8.8	0.04	0.02	–35.1
Mg	21	18	–14.3	1100	870	–20.9	Ba	21	18	–14.3	1.5	1.2	–20.0
Al	950	800	–15.8	130	140	+7.7	La	0.260	0.260	0.0	0.0098	0.0082	–16.3
Si	110	90	–18.2	89	69	–22.5	Ce	0.450	0.450	0.0	0.0180	0.0160	–11.1
P	16	19	18.8	1500	1200	–20.0	Pr	0.065	0.065	0.0	–	–	–
S	55	66	+20.0	1900	1300	–31.6	Nd	0.280	0.280	0.0	0.0096	0.0074	–22.9
K	210	200	–4.8	23000	19000	–17.4	Sm	0.080	0.078	–2.5	–	–	–
Ca	800	600	–25.0	130	130	0.0	Eu	0.019	0.019	0.0	0.0009	0.0008	–4.7
Ti	0.92	0.80	–13.0	2.7	2.7	0.0	Gd	0.085	0.084	–1.2	0.0026	0.0022	–15.4
V	0.11	0.11	0.0	0.14	0.14	0.0	Tb	0.012	0.012	0.0	–	–	–
Cr	0.13	0.10	–23.0	0.34	0.29	–14.7	Dy	0.059	0.056	–5.1	0.0026	0.0021	–19.2
Mn	17	22	+29.4	15	14	–6.7	Ho	0.014	0.014	0.0	–	–	–
Fe	68	67	–1.5	46	41	–10.9	Er	0.038	0.037	–2.6	0.0016	0.0017	6.2
Co	0.091	0.120	+31.9	0.1	0.087	–13.0	Tm	0.0043	0.0043	0.0	–	–	–
Ni	0.25	0.25	0.0	0.53	0.33	–37.7	Yb	0.027	0.027	0.0	0.0015	0.0013	–13.3
Cu	0.91	0.98	+7.7	4.6	3.3	–28.3	Lu	0.0037	0.0038	–2.6	–	–	–
Zn	2.6	3.2	+23.1	12	8.5	–29.2	Hf	0.013	0.011	–15.4	0.0024	0.0017	–29.2
Ga	0.03	0.028	–6.7	0.034	0.031	–8.8	Ta	–	–	–	0.0022	0.0011	–50.0
Se	–	–	–	0.049	0.054	10.2	W	–	–	–	0.0120	0.0074	–38.3
Rb	0.25	0.24	–4.0	10	6.8	–32.0	Hg	–	–	–	0.0180	0.0140	–22.2
Sr	4.7	4.3	–8.5	0.95	0.085	–91.1	Tl	0.014	0.013	–7.1	0.0076	0.0057	–25.0
Y	0.39	0.39	0.0	0.014	0.011	–21.4	Pb	0.083	0.083	0.0	0.0780	0.0750	–3.8
Zr	0.33	0.27	–18.2	0.049	0.041	–16.3	Bi	0.0008	0.0009	–11.0	–	–	–
Nb	–	–	–	0.0027	0.018	–33.3	Th	0.017	0.017	0.0	0.0020	0.0012	–40.0
Mo	–	–	–	0.14	0.14	0.0	U	0.039	0.036	–7.7	0.0018	0.0012	–33.3

*Относительно фона.
**Прочерк – содержание в обоих вариантах опыта ниже предела обнаружения анализа.

тофеле в вариантах опыта с внесением пеплов снижалось относительно фонового варианта за счет увеличения урожая и связанного с этим поглощения химических элементов из почв бóльшим количеством биомассы.

Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01, допустимые уровни содержания токсичных элементов в заданной массе (объеме) свежего картофеля составляют (мг/кг): Pb – 0.5, As – 0.2, Cd – 0.03, Hg – 0.02. Концентрации этих элементов в картофеле в опыте с внесением вулканических пеплов в почвы составили (фон/с пеплом, мг/кг): Pb – 0.078/0.075, As –< 0.01/<0.01, Cd – 0.025/0.020, Hg – 0.018/0.014 (табл. 6). Таким образом, содержание в исследованном картофеле токсичных элементов как в фоновом варианте, так и в вариантах с внесением вулканического пепла не превышало установленных норм.

Для оценки экономической эффективности (Э) применения вулканических пеплов при выращивании агрокультур выполнены расчеты этого показателя с использованием следующей формулы:

$$Э = (С_б - С_н) + (Ц_н - Ц_б) \times n;$$

где $С_б$, $С_н$ – производственные затраты на 1 га (тыс. руб.) в базовом и новых вариантах; $Ц_н$, $Ц_б$ – стоимость валовой продукции с 1 га (тыс. руб.) в новых и базовом вариантах; n – площадь посадок, 1 га. При расчетах использованы следующие характеристики: базовые затраты на выращивание на 1 га: картофеля при применении (NPK)120 – 778.7 тыс. руб., при внесении (NPK)60 – 766.1 тыс. руб., однолетних трав при применении (NPK)90 – 49.423 тыс. руб., многолетних трав при внесении (NPK)90 – 35.688 тыс. руб., дополнительные затраты на внесение 1 т вулканических пеплов – 20.0 тыс. руб. Стоимость 1 т валовой продукции картофеля – 50.0 тыс. руб., однолетних трав – 40.1 тыс. руб., многолетних трав – 32.4 тыс. руб.

Анализ полученных данных показал, что значительный экономический эффект (196.4 тыс. руб./га) может быть получен при выращивании однолетних кормовых трав при внесении вулканического пепла в дозе 2.0 т/га на фоне традиционной для региона дозы минеральных удобрений (NPK)90 (табл. 3). В опыте с многолетними кормовыми травами самый высокий экономический эффект установлен для вариантов с применением пепла вулкана Безымянного в дозах 2.5 и 5.0 т/га (105.5 и 165.7 тыс. руб./га соответственно) на фоне минеральных удобрений в дозе (NPK)90 (табл. 2).

Различия экономической эффективности применения пепла при выращивании картофеля очевидно обусловлены существенными отличиями климатических показателей 2014–2018 гг. (табл. 1). Наименьшая экономическая эффективность была установлена для 2018 г. – наиболее благоприятного и редкого для региона по климатическим условиям. В 2018 г. урожайность картофеля была самой высокой, а прибавка урожайности и соответственно экономическая эффективность от внесения пеплов были самыми малозначительными. Существенная экономическая выгода (118.3 тыс. руб./га) при таких климатических условиях может быть получена только при внесении пепла вулкана Безымянный в дозе 5 т/га на фоне пониженной (относительно традиционной) дозы минеральных удобрений. В 2014 г., когда сумма активных температур была также выше средней многолетней, однако осадков за летне-осенний период было меньше среднемноголетней нормы, экономическая эффективность новой методики даже при применении менее продуктивного пепла вулкана Шивелуч была самой существенной за все годы опыта и составила 262.4 и 242.5 тыс. руб./га при внесении пепла в дозах 2.5 и 5.0. т/га соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесение в почву вулканических пеплов с обязательным применением минеральных удобрений повышало урожайность сельскохозяйственных культур. При этом отмечено усиление положительного эффекта от применения минеральных удобрений и улучшение качества продукции, когда происходило увеличение содержания сырого протеина в однолетних кормовых травах, повышение содержания крахмала в клубнях картофеля, увеличение устойчивости клубней картофеля к заболеваниям.

При любых климатических условиях внесение в почвы продуктов вулканической деятельности вулкана Безымянный на фоне пониженной (относительно традиционной) для картофеля и традиционной для кормовых трав дозы минеральных удобрений дало существенный экономический эффект (105–196 тыс. руб./га для трав и 118–262 тыс. руб./га для картофеля).

Положительные результаты, полученные в деляночных и производственном опытах по внесению вулканических пеплов Камчатки в почвы при выращивании картофеля и кормовых трав, позволяют рассматривать вулканические пеплы как потенциальный источник улучшения биопродуктивности почв и рекомендовать их для использования в сельском хозяйстве. Получен патент на изобретение, в котором приведена формула, описывающая способ улучшения питательного режима растений, предусматривающая внесение в почвы с минеральными удобрениями вулканических пеплов [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев В.И.* Положительный экологический эффект извержений вулканов и некоторых природных и техногенных аналогов (обрушений) // Мат-лы регион. конф., посвящ. Дню вулканолога. Вулканизм и связанные с ним процессы. г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 9–12.
2. *Louder R.* Volcanic ash may be helping vegetation growth. Reykjavik: Grapevine, 2010. P. 24.
3. *Seward W., Edwards B.* Testing hypotheses for the use of Icelandic volcanic ashes as low cost, natural fertilizers // Geophys. Res. Abstr. 2012. P. 178.
4. *Wink M.* Introduction: biochemistry, role and biotechnology of secondary metabolites. Functions of plant secondary metabolites and their exploitation in biotechnology // Annu. Plant Rev. 1999. № 3. P. 1–16.
5. *Захарихина Л.В.* Особенности почвообразования и геохимии почв в условиях активного вулканизма (на примере Камчатки). Дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2010. 310 с.
6. *Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Почвенные провинции Камчатки и их геохимическая характеристика // Вестн. Камчат. регион. организации “Учебно-научный центр”. Сер. Науки о Земле. 2008. № 11. С. 98–112.
7. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И.* Классификация почв России М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2004. С. 57–61.
8. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps // World Soil Resources Reports. № 106. FAO, Rome.
9. *Зонн С.В., Карпачевский Л.О., Стефин В.В.* Лесные почвы Камчатки. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 182–198 .
10. *Карпачевский Л.О., Алябина И.О., Захарихина Л.В., Макеев А.О., Маречек М.С., Радюкин А.Ю., Шоба С.А., Таргульян В.О.* Почвы Камчатки. М.: Недра, 2009 г. 223 с.
11. *Соколов И.А.* Вулканизм и почвообразование. М.: Наука, 1973. 224 с.
12. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Колос, 1985. 351 с.
13. *Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А.* Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Завод. лаборатория. Диагностика мат-лов. № 1. 2007. Т. 73. С. 12–22.
14. *Минаев Н.С., Филипенко А.С., Лебедовский И.А.* Об использовании вулканического пепла в качестве природного минерального удобрения // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сб. ст. по мат-лам IX Всерос. конф. молод. ученых. 2016. С. 45–46.
15. *Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С.* Способ улучшения питательного режима растений путем внесения в почвы вулканических пеплов: А.с. 2637319 (РФ) // Б.И. 2017. № 34.

Kamchatka Volcanic Ash as a Potential Source of Improving Soil Bioproductivity

L.V. Zakharikhina[a,#], Y.S. Litvinenko[b], V.V. Gainatulina[c], N.Yu. Arguneeva[c], M.A. Makarova [c], O.V. Bredun[d], and N.I. Ryakhovskay[e]

[a] *The Russian Research Institute of Floriculture and Subtropical Crops ul. Jana Fabritiusa 2/28, Krasnodar region, Sochi 354002, Russia*

[b] *LLK “Ecogeolit” ul. Mosfilmovskaya 17B, Moscow 119330, Russia*

[c] *Kamchatsky Research Institute of Agriculture ul. Tsentralnaya 4, Kamchatka territory, Yelizovsky district, s. Sosnovka 684033, Russia*

[d] *Federal state unitary enterprise “Sosnovsky” ul. Tsentralnaya 3, Kamchatka territory, Yelizovsky district, s. Sosnovka 684033, Russia*

[e] *Russian University of Cooperation, Kamchatka Branch ul. Klyuchevskaya 11, Kamchatka territory, Petropavlovsk-Kamchatsky 683003, Russia*

[#] *E-mail: zlv63@yandex.ru*

For the first time in international practice, agricultural experiments were carried out on the introduction of volcanic ash from Kamchatka in combination with traditional mineral fertilizers in ochreous volcanic soils (Andosols Acroxic). As a result, in different versions of the field experience, yield increases were obtained relative to the background: potatoes in 2014 – by 31–63, in 2017 – by 7–19, in 2018 – by 14–31%; Timothy meadow in 2015 – by 21–50%. Production experience in growing annual forage grasses in 2016 showed an increase in yield by 32%. After harvesting, the soils showed an increase in the content of mobile phosphorus (according to Kirsanov) by 7–21%, mobile potassium – by 16–77%, and an increase in the degree of soil saturation with bases by 9–27%. Relative to the background, an increase in the content of mobile (acetate-ammonium extract) forms of Co (by 32%), Mn (by 29%), S (by 20%), Zn (by 23%) and Cu (by 8%) was found. In addition to increasing the yield of agricultural crops in forage grasses, an increase in the content of raw protein was noted, in potato tubers – the content of starch, and its resistance to diseases improved.

Key words: volcanic ash, Kamchatka, soil bioproductivity, yield, agrocenoses.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 76–84

Экотоксикология

УДК 631.81:631.811.1:632.122.2

РОЛЬ УДОБРЕНИЙ В АЗОТНОМ ПИТАНИИ РАСТЕНИЙ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПОЧВЫ НЕФТЬЮ

© 2020 г. В. М. Назарюк[1], Ф. Р. Калимуллина[1,*]

[1] Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 8/2, Россия
**E-mail: fliura.kalimullina@yandex.ru*

Поступила в редакцию 11.06.2019 г.
После доработки 09.09.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

На серой лесной почве среднесуглинистого гранулометрического состава нефтяное загрязнение в полевых условиях в размере 2 т нефти/га особенно интенсивно снижало содержание нитратного азота в первый год проведения исследования. За этот период уменьшилось содержание нитратного азота с 6.5 до 3.8 и легкогидролизуемого – с 41 до 3.8 мг/кг. Количество аммонийного, трудногидролизуемого и негидролизуемого азота, напротив, существенно возросло. Загрязнение почвы нефтью привело к снижению продуктивности растений овса с 316 до 83 кг/га, выноса азота биомассой – с 31.6 до 10.6 кг/га. Также снизилось накопление белка биомассой овса с 198 до 66.3 кг/га. Изучение баланса азота в почве показало, что применение органических и минеральных удобрений на фоне нефтеносного загрязнения делало его положительным.

Ключевые слова: органические и минеральные удобрения, почва, нефть, азот, зерновые культуры.

DOI: 10.31857/S0002188120040092

ВВЕДЕНИЕ

Высокая техногенная нагрузка на агроэкосистемы вызывает различные нарушения почвенных процессов [1–3], что создает определенные трудности в оптимизации минерального питания растений. К числу наиболее опасных почвенных загрязнителей относится нефть и нефтепродукты [4, 5]. При таком загрязнении происходят существенные изменения в химическом составе, свойствах и структуре почвы [6], что отражается на продукционном процессе растений [7] и устойчивости экологически безопасного функционирования экосистем [8]. Выявлено, что под влиянием нефти ухудшается биологическая активность почвы, состояние и рост растений [9], повышаются энергозатраты в экосистемах на создание адаптированных и более устойчивых организмов к негативным воздействиям, затрудняется возможность сохранения биоразнообразия [10].

В последние годы помимо традиционных технологических приемов разрабатываются новые, менее затратные и достаточно эффективные подходы к восстановлению почвенно-экологических условий. Для ускорения окисления углеводородов используют активные, неадаптированные для зоны гипергенеза вещества в виде пероксидов металлов и пероксида водорода [11], эффективность последнего соединения возрастает при передаче электронов, когда реакции окисления осуществляются на основе ионов Fe^{2+} и Fe^{3+}. В анаэробных условиях с дефицитом кислорода в качестве акцепторов электронов пытаются приспособить специфику действия Fe^{3+}, сульфатов и диоксида углерода [12]. Несмотря на значительные успехи в приемах ремедиациии нефтезагрязненых территорий все же основное внимание уделяется более выгодным и доступным агрохимическим приемам, среди которых применение минеральных и органических удобрений. Особое место занимает использование потенциала генотипа растений [13, 14]. Их применение позволяет быстрее восстановить функции почв, особенно с нарушенными физико-химическими свойствами. Выявлено, что загрязнение серой лесной почвы нефтью с отношением C : N = 370 : 1 вызывало снижение урожайности зерновых культур в течение 3 лет [15]. Особенно сильное негативное воздействие на развитие растений оказывает нефть в первый год. Внесение макро- и микроудобрений позволяет существенно улучшить минеральное питание и тем самым активизировать продукционный процесс растений. Принятие научно обоснованных решений требует *in situ* дать интеграль-

ную оценку экологического состояния природных и агроэкосистем [16, 17]. В этой связи разработка мероприятий, направленных на ускорение процессов восстановления пищевого режима почв и увеличения продуктивности растений в условиях неблагоприятного антропогенного воздействия на агроценоз является актуальной задачей.

Цель работы – изучение возможности активизации биологических процессов ремедиации путем оптимизации азотного режима почвы, загрязненной нефтью, в результате внесения органических и минеральных удобрений под зерновые культуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение возможностей улучшения азотного фонда серой лесной почвы, загрязненной нефтью, проводили в течение 2009–2013 гг. В период исследования осуществляли чередование зерновых культур по следующей схеме: овес (сорт Ровесник), ячмень яровой (сорт Ача), пшеница (сорт Новосибирская 22), ячмень (сорт Ача) в микрополевых опытах, в четырехкратной повторности. Учетная площадь делянки 0.35 м^2. Вносили на каждую делянку в виде органических удобрений перегной, исходя из расчета 10 т/га и минеральные удобрения (NPK)60 в виде $N_{аа}$, $P_{сг}$ и K_x. В качестве загрязняющего фона была внесена разовая доза нефти Верх-Таркского месторождения Западно-Сибирского региона в пахотный слой каждой делянки, исходя из расчета 2 т/га. Такая доза нефти принята на основе экспериментальных исследований. При более высокой дозе токсичность ее оказывается слишком высокой, и удобрения, особенно минеральные, могут оказаться бесполезными. В этом случае нужны другие методы рекультивации почв.

Нефть Верх-Тарского месторождения характеризуется высоким качеством сырья, с минимальным количеством примесей, малопарафинистая, малосернистая. Содержание азота равно, по нашим данным, 0.2%, содержание углерода – 74%.

Почва опытного участка – серая лесная среднесуглинистая, слабо обогащена гумусом, имела среднее содержание подвижного фосфора и низкое – обменного калия, pH_{H_2O} 7.2. Почву каждой делянки опыта оборачивали полиэтиленовой пленкой на глубину пахотного слоя, не разделяя верхний горизонт от нижнего. Этот объем почвы перемешивали с нефтью и удобрениями и после этого высевали семена зерновых культур.

Почвенные образцы отбирали весной и осенью, растительные – при уборке урожая. Содержание гумуса в почве определяли по методу Тюрина, общий азот – колориметрическим методом по Несслеру, легкогидролизуемый азот – в 0.5 н. и трудногидролизуемый – в 5 н. H_2SO_4, негидролизуемый – по разности между валовым содержанием азота и трудногидролизуемым. Потенциальную нитрификационную способность загрязненной нефтью почвы определяли при ее компостировании в течение 1 мес. при комнатной температуре 23–24°C. Подвижный фосфор определяли по Чирикову, обменный калий – по Масловой, pH – потенциометрическим методом. В растениях также определяли азот после мокрого озоления по Кьельдалю, фосфор – колориметрическим методом на КФК-3, калий – методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В многолетнем опыте с зерновыми культурами на загрязненной серой лесной почве выявлено, что содержание минеральных форм азота зависело от факторов природного и техногенного происхождения (табл. 1). В послеуборочный период меньше всего азота в аммонийной форме, содержание которого обычно снижается к уборке, содержалось в контрольном варианте в первый год исследования. Добавление минеральных удобрений в дозе N60P60K60 по-разному сказалось на содержании этой формы азота: наблюдали некоторое увеличение его содержания по сравнению с контролем, а также снижение и отсутствие заметного изменения в аккумуляции аммония. Внесение на этом фоне минеральных и органических удобрений приводило к разнообразным результатам: увеличению, снижению и отсутствию изменений в накоплении аммонийной формы азота. Небольшие отклонения в содержании аммония в почве связаны с обоснованными дозами органических и минеральньных удобрений, несмотря на экологически неблагоприятное воздействие токсиканта на микробоценоз почвы. Поэтому злаковые растения были способны практически полностью усвоить азот, находившийся в их распоряжении.

Содержание нитратного азота практически во всех случаях было более высоким, чем аммонийного. Загрязнение почвы нефтью на уровне 2 т/га в первый год проведения эксперимента вызвало уменьшение величины этого показателя. В дальнейшем содержание нитратов в контрольном варианте и с загрязнением почвы нефтью было практически одинаковым, что свидетельствовало

Таблица 1. Содержание минеральных форм азота в почве, загрязненной нефтью, при применении органических и минеральных удобрений в послеуборочный период, мг/кг

Вариант	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	Средние за 5 лет
			$N\text{-}NH_4$			
Контроль	0.8	0.4	2.0	1.7	2.8	1.5
Нефть (фон)	1.7	0.3	2.1	1.5	2.2	1.6
Фон + N60P60K60	1.9	2.5	2.1	1.8	1.4	1.9
Фон + N60P60K60 + ОУ*	2.4	0.9	2.1	2.2	2.6	2.0
HCP_{05}	0.6	0.2	0.08	0.1	0.2	
			$N\text{-}NO_3$			
Контроль	6.5	8.4	8.0	7.6	7.3	10.6
Нефть (фон)	3.8	8.0	8.0	7.3	8.6	10.0
Фон + N60P60K60	4.6	9.6	13.4	7.7	11.3	11.3
Фон + N60P60K60 + ОУ	5.3	10.0	11.7	12.8	13.4	12.5
HCP_{05}	0.5	0.9	0.8	1.9	1.5	

*ОУ – органические удобрения. То же в табл. 2–5 и на рис. 1, 2.

о способности почвенной биоты нейтрализовать токсическое действие внесенного углеводорода. Среди изученных вариантов многолетнего опыта по накоплению нитратного азота выделялся вариант с применением органических удобрений на фоне нефтяного загрязнения.

Обеспечение растений азотом зависит в первую очередь от образования минеральных его форм, по интенсивности и направленности формирования которых можно судить о токсичности нефти в автоморфных условиях среды (рис. 1). Оперативно получить информацию и оценить темпы образования нитратного азота в присутствии токсиканта можно путем компостирования почвы при оптимальном гидротермическом режиме. Исследования показали, что на фоне загрязнения почвы нефтью значительно меняется содержание нитратного азота в пахотном слое. Например, в верхнем гумусовом горизонте накопилось доступных соединений азота в контроле больше примерно в 10 раз, чем в исходном варианте. Загрязнение почвы нефтью существенно снизило содержание нитратного азота, даже несмотря на то что образцы отбирали в конце первого вегетационного периода, когда ингибирование процессов нитратонакопления в значительной мере было ослаблено. Внесение N60 в сочетании с фосфором и калием практически полностью компенсировало негативное действие нефти. Добавление органического удобрения заметно активизировало процессы нитрификации и даже произошел заметный прирост в содержании нитратного азота в загрязненной нефтью почве. Это сказалось не только на пищевом режиме серой лесной почвы, но и на продукционном процессе растений.

Загрязнение почвы нефтью и внесение удобрений отразилось на содержание форм азота в пахотном слое неодинаково (табл. 2). Нефть относительно исходной формы вызывала снижение содержания минерального и легкогидролизуемого азота, но повысило количество трудногидролизуемой и негидролизуемой форм. Несмотря на имеющиеся изменения в содержании подвижных форм азота содержание валового азота осталось без изменений. Внесение минеральных удобрений способствовало восстановлению содержания форм азота в почве по сравнению с контролем, но существенные изменения произошли только в содержании трудногидролизуемой и негидролизуемой формы азота в случае применения органических удобрений на фоне минеральных. Отсюда видно, что загрязнение почвы нефтью отражалось в первую очередь на самых доступных формах азота, которые непосредственно связаны с функционированием микробоценоза и определяют экологическую устойчивость фитоценоза [18]. Повышение активности функционирования бактериального сообщества позволяет избежать длительного негативного воздействия на экосистему, быстрее восстановить биоразнообразие растительного компонента [19] и повысить тем самым устойчивость почвенно-экологических функций на неблагополучной территории.

По содержанию форм азота невозможно оценить актуальную доступность азотсодержащих

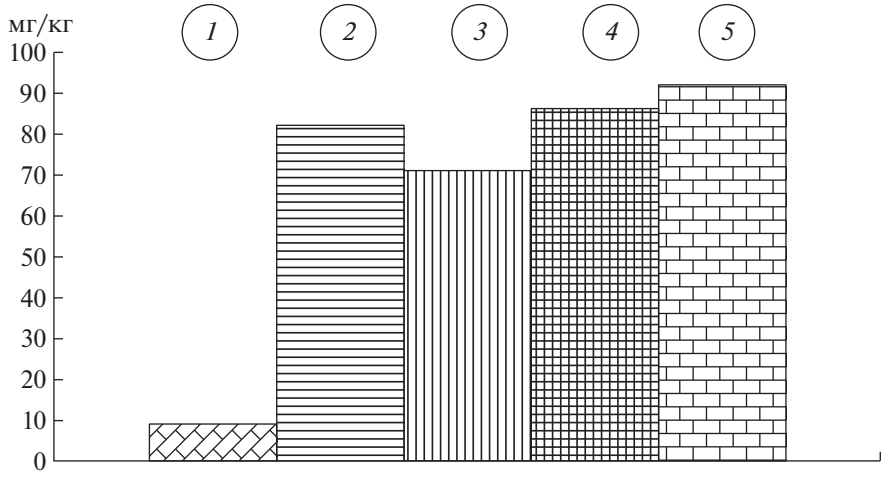


Рис. 1. Влияние удобрений на содержание нитратного азота при компостировании загрязненной нефтью почвы: *1* – исходное, *2* – контроль, *3* – нефть (фон), *4* – фон + NPK, *5* – фон + NPK + ОУ*.

соединений для зерновых культур в течение вегетационного периода. Более надежную информацию о состоянии фитоценоза можно получить на основе оценки продукционного процесса растений. Исследования показали (табл. 3), что самое большое снижение продуктивности растений наблюдали у овса в первый год проведения опытов, которое достигло для зерновой продукции 3.8 раза и вегетативной массы 3.4 раза. Негативное воздействие поллютанта отразилось также на накоплении общей биомассы и снижение относительно контроля составило 3.6 раза. Внесение минеральных удобрений в дозе N60P60K60 активизировало фотосинтетические процессы, что привело к возрастанию зерновой продукции, вегетативной и общей биомассы. Однако полностью компенсировать негативное воздействие нефтяного загрязнения не удалось. Использование органических удобрений в сочетании с минеральными позволило существенно повлиять на продуктивность растений овса. Это свидетельствовало о том, что органические удобрения являются мощным фактором в ремедиации почв, подверженных воздействию нефтеносного загрязнения.

На второй год (2010 г.) при выращивании ячменя в результате загрязнения почвы углеводородным поллютантом продуктивность зерна заметно снизилась, однако синтез надземной вегетативной массы за этот же период значительно возрос в 2.1 раза. Это, вероятно, связано с тем, что листовой аппарат и в целом надземная вегетативная масса реагируют на загрязнение почвы нефтью менее остро, чем репродуктивный орган – колос злака. Различия в продуктивности в контрольном варианте были связаны еще и с тем, что изменялись погодные условия, влияющие на азотминерализующую способность почвы [20], от которой во многом зависела активность фотосин-

Таблица 2. Содержание форм азота в почве, загрязненной нефтью, при использовании органических и минеральных удобрений под зерновые культуры, мг/кг

Вариант	Минеральный	Легкогидролизуемый	Трудногидролизуемый	Негидролизуемый	Валовой
2009 г.					
Исходный	15	45	101	844	1010
Контроль	12	41	90	949	1090
Нефть (фон)	11	38	114	1034	1200
Фон + N60P60K60	13	38	107	1073	1200
Фон + N60P60K60 + ОУ	14	48	112	1010	1180
$НСР_{05}$	0.5	3	74	80	90

Таблица 3. Урожайность зерновых культур при применении органических и минеральных удобрений на загрязненной нефтью почве

Вариант	Зерновая продукция	Вегетативная надземная масса	Общая биомасса	Прибавка урожая, %	Отношение зерновой продукции к вегетативной массе
	г/м^2				
Овес, 2009 г.					
Контроль	316	442	758	–	0.71
Нефть (фон)	83	130	213	–545	0.64
Фон + N60P60K60	280	373	653	–105	0.75
Фон + N60P60K60 + ОУ	336	403	739	–19	0.83
$НСР_{05}$	31	35	65	16	0.05
Ячмень, 2010 г.					
Контроль	201	167	368	–	1.20
Нефть (фон)	181	348	529	–20	0.52
Фон + N60P60K60	424	378	802	223	1.12
Фон + N60P60K60 + ОУ*	482	405	887	281	1.19
$НСР_{05}$	18	25	52	26	0.06
Пшеница, 2011 г.					
Контроль	141	246	387	–	0.57
Нефть (фон)	149	237	386	–6	0.63
Фон + N60P60K60	285	458	743	102	0.62
Фон + N60P60K60 + ОУ	318	552	870	125	0.58
$НСР_{05}$	44	57	60	43	0.04
Овес, 2012 г.					
Контроль	288	342	630	–	0.84
Нефть (фон)	336	402	738	48	0.83
Фон + N60P60K60	510	534	1040	222	0.95
Фон + N60P60K60 + ОУ	516	570	1090	228	0.90
$НСР_{05}$	44	29	110	18	0.06
Ячмень, 2013 г.					
Контроль	162	150	312	–	1.08
Нефть (фон)	144	150	294	–18	0.96
Фон + N60P60K60	432	432	882	270	1.00
Фон + N60P60K60 + ОУ	462	450	912	300	1.03
$НСР_{0.5}$	31	31	51	11	0.24

тетических процессов. Внесение минеральных удобрений или их сочетания с органическими привело к существенному увеличению урожайности ячменя. Значит, минеральное питание в условиях 2010 г. было фактором, лимитирующим продукционный процесс растений. В дальнейшем при выращивании зерновых культур тенденция к увеличению урожайности сохранилась. Отношение зерновой продукции к вегетативной массе изменялось в небольших пределах, за исключением условий 2010 г., когда значительно снизилась эта величина в варианте с нефтью.

Нефтяное загрязнение почвы и применение удобрений сказалось не только на продуктивности растений, но и на содержании в них азота (табл. 4). Наибольшие изменения произошли в зерне овса в первый год воздействия поллютанта на посев. Меньше всего азота содержалось в репродуктивном органе овса контрольного варианта, самое высокое – в варианте N60P60K60. Внесение органического удобрения в сочетании с минеральными не вызвало повышения аккумуляции этого элемента в зерне овса. В дальнейшем при выращивании ячменя в условиях 2010 г. законо-

Таблица 4. Влияние органических и минеральных удобрений на содержание и вынос азота зерновыми культурами при загрязнении почвы нефтью

Вариант	Содержание азота, %		Вынос N биомассой растений				
			кг/ га		на формирование 1 т урожая, кг		
	1	2	1	2	1	2	3
Овес, 2009 г.							
Контроль	0.95	0.12	31.6	5.3	10.0	1.7	11.7
Нефть (фон)	1.28	0.50	10.6	6.5	12.8	2.3	15.1
Фон + N60P60K60	1.46	0.32	40.9	11.9	14.6	4.2	18.8
Фон + N60P60K60 + ОУ*	1.21	0.23	33.9	9.3	10.1	2.8	12.9
$НСР_{05}$	0.09	0.04	2.4	0.6	0.9	0.2	0.9
Ячмень, 2010 г.							
Контроль	1.28	0.19	25.7	3.2	12.8	1.6	14.4
Нефть (фон)	1.27	0.25	23.0	8.7	12.7	4.8	17.5
Фон + N60P60K60	1.31	0.32	55.5	12.1	13.1	3.2	16.3
Фон + N60P60K60 + ОУ	1.44	0.27	69.4	10.9	14.4	2.3	16.7
$НСР_{05}$	0.09	0.04	2.3	0.6	0.8	0.2	0.8
Пшеница, 2011 г.							
Контроль	1.73	0.22	24.4	5.4	17.3	2.2	19.5
Нефть (фон)	1.96	0.18	29.2	6.9	19.6	2.9	22.5
Фон + N60P60K60	2.24	0.24	63.8	10.0	22.2	2.2	24.4
Фон + N60P60K60 + ОУ	2.45	0.17	77.9	9.4	24.5	1.7	26.2
$НСР_{05}$	0.16	0.02	3.3	0.7	1.5	0.14	1.6
Овес, 2012 г.							
Контроль	1.42	0.37	40.9	12.6	14.2	3.7	17.9
Нефть (фон)	1.34	0.24	45.0	9.6	13.4	2.4	15.8
Фон + N60P60K60	1.62	0.33	46.2	17.6	9.1	3.3	12.4
Фон + N60P60K60 + ОУ	1.30	0.39	41.3	20.2	8.0	3.5	11.5
$НСР_{05}$	0.04	0.02	3.7	1.1	0.9	0.2	0.9
Ячмень, 2013 г.							
Контроль	1.33	0.58	38.3	19.8	13.3	3.9	17.2
Нефть (фон)	1.05	0.60	35.3	24.1	10.5	2.6	13.1
Фон + N60P60K60	1.20	0.40	61.2	21.4	11.9	4.0	15.9
Фон + N60P60K60 + ОУ	1.23	0.43	63.5	24.5	12.3	4.3	16.6
$НСР_{05}$	0.12	0.13	3.2	1.8	0.7	0.3	0.9

Примечание. В графе 1 – зерно, 2 – вегетативная биомасса, 3 – надземная биомасса.

мерность в основном сохранилась, хотя контрольный вариант и загрязненный нефтью по содержанию азота в зерне выровнялись. Примерно такая же ситуация в распределении азота по репродуктивным органам сохранилась и в условиях 2011–2013 гг. при выращивании пшеницы, овса и ячменя.

Различия в содержании азота в вегетативных органах были существенно контрастнее. Например, у овса в первый год его возделывания содержание азота в контрольном и загрязненном вариантах отличалось в 4.2 раза. Большие различия отмечали и между другими вариантами, но только в первый год проведения опытов, на второй год различия в содержании азота в вегетативной надземной биомассе оказались значительно меньше. Отсюда видно, что самая сильная токсичность загрязнения нефтью на растения при применении органических и минеральных удобрений проявлялась в первый год и существенно меньше – во

Таблица 5. Баланс азота в загрязненной нефтью почве при применении органических и минеральных удобрений, кг/га

Вариант	Поступило в почву из различных источников азотного питания			Вынос азота биомассой растений	Баланс
	органические удобрения	минеральные удобрения	нефть		
Контроль	0	0	0	163.7	−163.7
Нефть (фон)	0	0	3.8	143.1	−139.3
Фон + N60P60K60	0	60	3.8	267.1	−203.3
Фон + N60P60K60 + ОУ*	60	60	3.8	286.0	−162.2

второй. В последующем контрастных различий в содержании азота в надземной биомассе не отмечали.

Значительные изменения в содержании азота в биомассе зерновых культур отразились на выносе азота как зерном, так и вегетативными органами. Самые большие отклонения в выносе этого элемента отмечали в первый год проведения опытов между загрязненным вариантом, контролем, вариантами с органическими удобрениями и NPK. Зерновые культуры больше всего усваивали азота при высоком уровне минерального питания, созданным за счет ежегодного внесения экзогенных питательных веществ и почвенных ресурсов. Созданный уровень минерального питания практически полностью удовлетворил потребность растений в азоте. Об этом можно судить по выносу азота в удобренных вариантах, который мало различался. Удельный расход азота на формирование 1 т урожая был несколько больше у пшеницы и заметно меньше у ячменя и овса. На формирование вегетативной массы зерновых культур расходовалось значительно меньше питательных элементов, чем зерновой продукции.

Под влиянием нефти и удобрений изменялись не только вынос макроэлементов надземной биомассой, но и баланс азота удобрений в почве. В контрольном варианте баланс имел отрицательную величину, от интенсивности и направленности которой зависел темп уменьшения плодородия почвы. Нефтяное загрязнение в большей степени стремилось стабилизировать потери азота за счет разложения органических веществ. Внесение N60 в сочетании с фосфором и калием не создало условия для положительного баланса этого элемента. Даже при внесении органических удобрений не удалось стабилизировать баланс азота в почве. Отсюда видно, что загрязнение почвы, если оно сопровождается внесением органических и минеральных удобрений, вызывает усиление синтеза биомассы растений. Поэтому в качестве обязательного агротехнического приема необходимо включать внесение органических и минеральных удобрений при возделывании зерновых культур на техногенно загрязненных почвах. В таких условиях поглощение питательных элементов растениями способствует мобилизации их из почвенных ресурсов и усвоению в течение всего периода вегетации.

Установлено, что применение минеральных удобрений в агроценозах позволило не только повышать урожайность зерновых культур, но и улучшать качество продукции [21]. Однако роль нефтяного загрязнения на фоне применения органических и минеральных удобрений в этом процессе мало изучена. Приведенные нами исследования показали, что качество зерна зависело от биологических особенностей культур, использования удобрений и условий года. Больше всего синтезировалось протеина в зерне пшеницы и ячменя, значительно меньше – овса, особенно в условиях 2009 г. В первый год загрязнения почвы нефтью характер накопления белка в семенах сильно отличался от последующих лет (рис. 2). Накопление белка в зерне овса, выращенного в этот период при загрязнении почвы нефтью, отличалось по сравнению с другими вариантами в 3.0–3.9 раза. Заметным было снижение накопления белка и на второй год. В дальнейшем при выращивании пшеницы и овса (2011–2012 гг.) наблюдали даже некоторую активизацию синтеза белка в зерновой продукции. В целом отмечен циклический характер накопления белка в товарной продукции, что, вероятно, связано не только с токсичностью нефтяного загрязнения, но и с различной активностью и направленностью процессов минерализации–иммобилизации азота в гетеротрофном азотном цикле в связи с меняющимся поведением растений и микробоценоза в загрязненной почве.

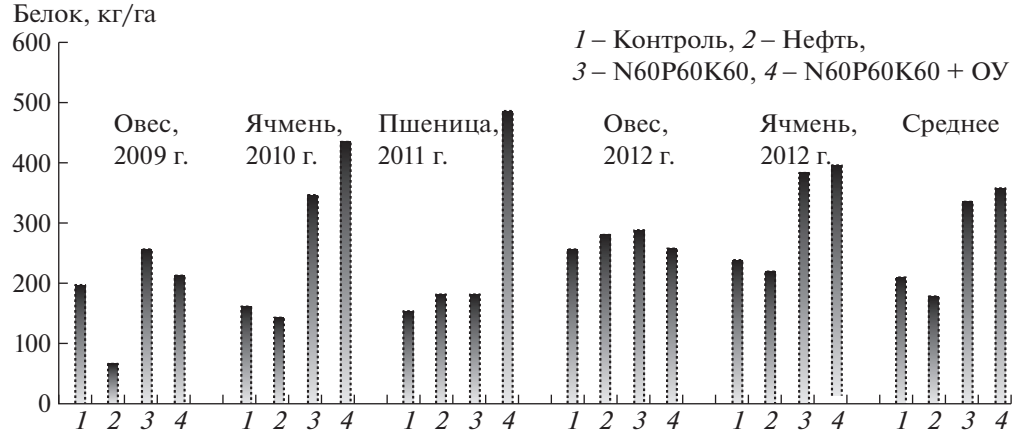


Рис. 2. Влияние нефти и удобрений на накопление белка в зерне злаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что загрязнение серой лесной почвы нефтью при внесении органических и минеральных удобрений уже на второй год активизирует микробиологические процессы, приводящие к повышенному накоплению нитратного азота, улучшению физиологического состояния растений, активизации ростовых процессов и более значительному накоплению биомассы зерновых культур. От складывающихся условий года зависело содержание минерального азота в почве и потребление его растениями в течении вегетационного периода. Меньше всего накапливалось в почве в конце вегетационного периода аммонийной формы азота, хотя и варьировало в значительных пределах. Нитратный азот, несмотря на то, что он легко усваивается корневой системой растений, в период уборки присутствовал относительно аммонийного азота в повышенном количестве. Весьма низкое содержание нитратного азота в период уборки отмечено в первый год проведения опытов. В дальнейшем нефтяная токсичность ослабевала и накопление этой формы азота выравнивалось между вариантами. Загрязнение почвы нефтью влияло не только на самые доступные растениям формы азота, но и на органические. Содержание легкогидролизуемого азота снижалось при нефтяном загрязнении, трудногидролизуемого и негидролизуемого, напротив, заметно повышалось. Изменения в азотном режиме приводили к соответствующему отклику растений в процессе формировании урожая и его качества. При загрязнении нефтью серой лесной почвы на уровне 2 т/га заметно сказывались изменения в накоплении биомассы, содержании и выносе азота в течение 2-х лет, особенно в первый год проведения исследования. На качество зерна также влияло нефтяное загрязнение, которое следует учитывать при проведении ремедиационных работ в агроценозах Западной Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никитишен В.И., Курганова Е.В.* Плодородие и удобрение серых лесных почв ополий Центральной России. М.: Наука, 2007. 367 с.
2. *Coulon F., Pelletier E., Louis R.S., Gourant L., Delille D.* Degradation of petroleum hydrocarbons in two subantarctic soils: Influence of an oleophilic fertilizer // Environ. Toxicol. Chem. 2004. V. 23. № 8. P. 1893–1901.
3. *Toy T.J., Foster G.R., Renard K.G.* Soil erosion processes: Prediction, measurement, and kontrol. N.Y.: Jonn Wiley and Sons, Inc., 2002. 338 p.
4. *Ланина Т.Д., Быков И.Ю., Андреев К.В., Автомонов С.Г.* Технологии полезной утилизации нефтепромышленных отходов применительно к нефтегазовому комплексу Тимано-Печерской нефтегазоносной провинции // Пробл. регион. экол. 2018. № 4. С. 46–53.
5. *Cozzarelli I.M., Baedeccer M.J., Eganhose R.P., Goerlitz D.F.* Geochemical evolution of low-molecular-weight organic acids derivod from degradation of petroleum contaminats in groundwater // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. V. 58. P. 863–877.
6. *Горникова С.В., Середина В.П.* Влияние нефти на физико-химические свойства почв нефтегазоносных районов Томского Севера. Томск, 1985. 34 с.
7. *Назарюк В.М.* Почвенно-экологические основы оптимизации питания растений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 364 с.
8. *Евсеева А.А.* Биоразнообразие растительного компонента как показатель стабильности лесных экосистем // Пробл. регион. экол. 2018. № 4. С. 11–16.
9. *Киреева Н.А., Мифтахова А.М., Салахова Г.М.* Рост и развитие растений яровой пшеницы на нефтезагрязненых почах при биоремедиации // Агрохимия. 2006. № 1. С. 85–90.

10. *Минникова Т.В., Колесников С.И., Денисова Т.В., Акименко Ю.В.* Интегральная оценка биологического состояния чернозема обыкновенного при ремедиации нефтезагрязнения // Пробл. агрохим. и экол. 2018. № 3. С. 56– 60.
11. *Водяницкий Ю.Н., Трофимов С.Я., Шоба С.А.* Перспективные подходы к очистке почв и почвенно-грунтовых вод от углеводородов (обзор) // Почвоведение. 2016. № 6. С. 755–764.
12. *Kong S., Watts R.J.* Treatment of petroleum soil using iron mineral catalyzed hydrogen peroxide // Chemosphere. 1998. V. 37. P. 1473–1482.
13. *Рахимова Э.Р., Гарусов А.В., Зарипова С.К.* Биологическая активность нефтезагрязненной почвы при засолении // Почвоведение. 2005. № 4. С. 481–485.
14. *Бородулина Т.С., Полонский В.И.* Влияние нефтезагрязнения почвы на физиологические характеристики растений пшеницы // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 5. С. 50–55.
15. *Илларионов С.А.* Экологические аспекты восстановления нефтезагрязненных почв. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 194 с
16. *Назарюк В.М., Кленова М.И., Калимуллина Ф.Р.* Роль минерального питания в повышении продуктивности растений и регулировании пищевого режима почвы, загрязненной нефтью // Агрохимия. 2007. № 7. С. 64–73.
17. *Kong S., Watts R.J.* Treatment of petroleum soil using iron mineral catalyzed hydrogen peroxide // Chemosphere. 1998. V. 37. P. 1473–1482.
18. *Арзамазова А.В., Кинжаев Р.Р., Гальцова А.Н., Хрептугова А.Н.* Влияние нефтезагрязнения на агрохимические свойства чернозема типичного и продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Пробл. агрохим. и экол. 2018. № 4. С. 21–25.
19. *Солнцева Н.Р.* Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.
20. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Гидротермический ресурс эродированных почв юга Западной Сибири // Плодородие. 2017. № 3. С. 35–39.
21. *Минеев В.Г., Павлов А.Н.* Агрохимические основы повышения качества зерна пшеницы. М.: Колос, 1981. 288 с.

Role of Fertilizers in Nitrogen Nutrition of Plants when Soil Is Contaminated with Oil

V. M. Nazaryuk[a] and F. R. Kalimullina[a,#]

[a] *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS*
prosp. Akad. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia
[#] *E-mail: fliura.kalimullina@yandex.ru*

On the gray forest soil of medium-loamy granulometric composition, oil pollution in the field in the amount of 2 tons of oil/ha especially intensively reduced the content of nitrate nitrogen in the first year of the study. During this period, the content of nitrate nitrogen decreased from 6.5 to 3.8 and easily hydrolyzed – from 41 to 3.8 mg/kg. Amount of ammonium, hardly hydrolyzed and non-hydrolyzed nitrogen, on the contrary, increased significantly. Oil contamination of the soil led to a decrease productivity of oat plants from 316 to 83 kg/ha, and nitrogen removal by biomass from 31.6 to 10.6 kg/ha. The accumulation of protein by oat biomass also decreased from 198 to 66.3 kg/ha. The study of the nitrogen balance in the soil showed that the use of organic and mineral fertilizers against the background of oil pollution made it positive.

Key words: organic and mineral fertilizers, soil, oil, nitrogen, grain crops.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 85–93

УДК 632.122.1:546.48:57.087

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ КАДМИЕМ АГРОЦЕНОЗА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2020 г. В. А. Четырбоцкий[1,*], А. Н. Четырбоцкий[2]

[1] Акционерное общество "Апатит", Центр инновации
119333 Москва, Ленинский просп., 55/1, стр. 1, Россия
[2] Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
690022 Владивосток, просп. 100 лет Владивостоку, 159, Россия
**E-mail: Chetyrbotsky@yandex.ru*

Поступила в редакцию 21.03.2019 г.
После доработки 18.04.2019 г.
Принята к публикации 13.01.2020 г.

Рассмотрены вопросы динамики накопления кадмия в почве и растениях сельскохозяйственного назначения, который относится к группе особо токсичных тяжелых металлов. Для их решения построена математическая модель этой динамики и установлена их адекватность экспериментальному материалу. В рамках модели показано, что динамика выноса кадмия определялась величинами биомассы растения и содержания Cd в ризосфере. На основании модели разработана методика оценки длительности периодов времени безопасного режима внесения в почву Cd-содержащих удобрений, который определяется моментом превышения предельно допустимой концентрации (ПДК). В качестве примера дана оценка времени загрязнения почв ряда экономически развитых стран. Приведена интерпретация полученных результатов.

Ключевые слова: кадмий, вегетационный период, математическая модель, вычислительные имитационные эксперименты.

DOI: 10.31857/S0002188120040031

ВВЕДЕНИЕ

Кадмий (Cd) входит в группу токсичных тяжелых металлов (**ТМ**), особенностью которого является накопление в почве и аккумуляция в растениях. По трофической цепочке он накапливается в организмах животных и человека, что создает техногенную угрозу жизни народонаселения [1]. Интенсивные выбросы промышленности, транспорта и использование различных химических средств (в том числе и удобрений) привели к накоплению ТМ на значительных территориях, что отрицательно влияет на почву, растения и другие живые организмы, и, как следствие, возрастает фоновый уровень содержания тяжелых металлов в биосфере [2].

Поступление Cd в почву определяют ее температурный режим и режим влажности, наличие в ней неорганических и органических веществ. Например, при снижении кислотности почвы с pH 7.0 до 5.5 содержание металла в корне райграса возрастает в 4 раза. Кроме того, способность растений к поглощению Cd во многом зависит от их видовых особенностей [3, 4]. В частности, среди культурных видов злаков в гораздо большей степени его поглощают рис, рожь и ячмень, и в меньшей степени – кукуруза и пшеница [5, 6].

Для снижения содержания доступного Cd в почве и растениях имеются специальные регламенты и контролируемые государством нормы. Они определяют предельно допустимые концентрации (**ПДК**) элементов в почве и растениях. В России, Европейском Союзе (**ЕС**) и других экономически развитых странах обсуждается его допустимое содержание в фосфорных минеральных удобрениях, т.к. Cd имеет тенденцию к преимущественному накоплению в фосфоритах. Номенклатура доз изменяется в зависимости от содержания кадмия: до 20 (слабо загрязненные), от 40 до 60 (средне загрязненные) и от 60 и более (сильно загрязненные) мг Cd/кг P_2O_5 [7, 8].

Для внедрения этих правил и норм требуются сведения о реакции системы почва–удобрение–растение в ответе на внесение удобрений с различным содержанием Cd. Интерес представляет его содержание в почве и растениях после окончания вегетационного периода [9]. Такие сведения могут оказаться доступными в 2-х случаях: 1 – когда уже имеется репрезентативный экспе-

риментальный материал, 2 – при наличии некоторого аппарата/механизма, посредством которого можно получить интересующий прогноз состояния этой системы при соответствующем на нее воздействии [10].

Интенсивность возделывания сельскохозяйственных культур обусловливает применение разнообразных минеральных удобрений, что может привести (и приводит) к фрагментарности и недостаточности экспериментального материала (случай 1). Поэтому актуальной является задача построения аппарата, при помощи которого реализуется случай 2. Для его построения требуется математическая модель совместной динамики биомассы и содержания в ней этих элементов питания.

В практике математического моделирования обычно постулируется логистический характер распределения биомассы растения и содержания в ней элементов питания. Однако при ее использовании как аппроксимации эмпирического распределения принимается допущение: удельный рост некоторой характеристики объекта определяется ее приростом и величиной самой характеристики, ограничивающей этот прирост. Так вот, если для содержания в растении элементов его питания принимается логистическое распределение, то получается следующее: находясь уже в самом растении, они сами себя и ограничивают. Но ведь это функция непосредственно растения и ризосферы, а не элементов питания, содержащихся в самом растении. Кроме того, их источник находится в ризосфере, а не в растении.

Согласно сказанному, актуальной представляется задача построения модели динамики элементов питания растений, оценка ее коэффициентов и оценка адекватности модели. Актуальна также задача проведения на основании моделей вычислительных экспериментов для оценки периода времени, при котором содержание тяжелого металла (**ТМ**) Cd в растении не превышает установленной нормы ПДК.

Цель работы – разработка методологии оценки длительности периодов времени безопасного (т.е. до момента превышения ПДК) режима внесения в почву содержащих Cd удобрений. Для ее выполнения построена модель совместной динамики биомассы растения и содержания Cd в его тканях, оценка коэффициентов и адекватности моделей, выполнение вычислительных имитационных экспериментов поступления Cd из ризосферы в растение совместно с удобрениями с различной степенью его содержания (загрязнения).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Все расчеты и вычислительные эксперименты выполняли на основании экспериментальных распределений, которые характеризуют влияние элементов питания растений (K, P, N, Ca, Mg, Cd) на рост яровой пшеницы сорта Ленинградская-97 на дерново-подзолистой почве. Структурированные цифровые распределения были сформированы на основании работ [11–14].

Объект изучения представлен распределениями биомассы надземной части растения и содержания в этой части элементов минерального питания. Методы обработки этого материала основаны на приемах математического моделирования и технологии решения задач нелинейного оценивания параметров средствами системы MATLAB.

В работе использовали экспериментальные распределения биомассы и соответствующие ей распределения выносов химических соединений элементов (K, P, N, Ca, Mg, Cd). Они были сформированы при экспериментальных исследованиях на яровой пшенице [15]. Методика их проведения состояла в следующем. На окультуренной дерново-подзолистой средне суглинистой почве выращивали яровую пшеницу сорта Ленинградская-97 (вегетационный период в зависимости от районов возделывания и погодных условий меняется от 85 до 110 сут [16]). Почва имела нейтральную реакцию среды, высокое содержание обменного калия и подвижного фосфора, низкое – содержание гумуса (1.5%), характеризовалась высокой насыщенностью основаниями и не нуждалась в известковании. При закладке опыта содержание кислорастворимых соединений Cd в почве было равно 0.5 мг/кг. Для повышения валового содержания ТМ и возможности оценки влияния большей концентрации на общий ценоз замкнутой системы в нее искусственно был внесен раствор сульфата кадмия из расчета 1 мг Cd/кг дерново-подзолистой почвы. В экспериментах рассматривали отклик системы на внесение различного количества калия, который применили в виде сульфата калия (K_2SO_4, 46% д.в. в дозах от K_{20} до K_{220}). Для обеспечения комплексного питания растений применяли азотные удобрения (сульфат аммония, 21% д.в. в дозе N_{150}) и фосфорные удобрения (P_c, 26% д.в. в дозе P_{100}).

В опытах использовали сосуды Кирсанова, где масса почвы составила 5.5 кг при ее влажности 50% (из чего следует, что сухая масса равнялась 2.25 кг) [17, 18]. Посев пшеницы производили проросшими семенами по 25 растений на сосуд. После прореживания в каждом сосуде было оставлено по 20 растений. Влажность почвы под-

Таблица 1. Регрессионные уравнения содержания Cd в системе растение–почва [22]

Почва	Ячмень	Вика
Дерново-подзолистая слабоокультуренная	$Y = 3.29 - 0.74X$	$Y = -0.049 + 1.85X$
Дерново-подзолистая среднеокультуренная	$Y = 5.17 + 0.74X$	$Y = 5.21 + 1.2X$
Чернозем типичный	$Y = 3.87 + 1.04X$	$Y = -0.34 + 1.5X$

держивали на оптимальном уровне (70% ПВ) за счет контролируемого полива, температуры – за счет специально отапливаемых тепличных помещений. Всего было 8 вариантов, где на каждый из них приходилось 9 временных точек отбора образцов растений пшеницы на 10, 14, 19, 24, 29, 37, 47, 57, 67-е сутки после посева. Отчет времени отбора начали с момента первых всходов. В опытах определяли сухую надземную массу растений, а также вынос этой частью растений как основных элементов питания (макроэлементов), так и микро- и мезоэлементов (включая такой элемент-антагонист как кадмий) по стандартной методике [19].

Модель динамики биомассы надземной части растений и динамики выноса элементов его питания. В практике изучения агроценозов широкое применение получили регрессионные уравнения [20, 21], где зависимой переменной выступает содержание ТМ в растении, а предикторами – их подвижные соединения в почве. В частности, для Cd в [22] приведены такие уравнения (табл. 1).

Проблемы использования этих уравнений для прогноза зависимости выноса Cd от его содержания в почве вызваны масштабом времени их корректного применения. Действительно, согласно им, внесение в почву удобрений сразу приводит к изменениям его содержания в растении, что уместно только для всего вегетационного периода. В связи с этим актуальна задача построения моделей, где реализован механизм динамики выноса для более адекватной оценки процессов в биогеоценозе.

При построении модели принимали такие допущения:

1 – удельный прирост в единицу времени биомассы $\{B_k, k = 1–8\}$ определяется ее естественным приростом, внутривидовой конкуренцией и текущим содержанием в ризосфере элементов питания растения;

2 – удельный прирост содержаний элементов питания $\{C_{i,k}\ i = 1–6, k = 1–8\}$ в растении пропорционален их текущим содержаниям в ризосфере (допускается влияние на этот прирост остальных элементов);

3 – коэффициенты уравнений не зависят от опытов,

4 – модель охватывает весь вегетационный период растения, где временной масштаб составляет 1 сут.

Согласно этим допущениям, запись модели совместной динамики биомассы растения и элементов его питания принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dB_k}{dt} = \left[a_{0,1} - a_{0,2}B_k + \sum\limits_{i=1}^{6}(a_{i,1}C_{i,k,0} - a_{i,2}C_{i,k}) \right] B_k, \\ \dfrac{dC_{i,k}}{dt} = \sum\limits_{j=1}^{6}(b_{i,j}C_{j,k,0} - d_{i,j}C_{j,k})B_k, \\ B_k(0) = B_{k,0} \quad \text{и} \quad C_{i,k}(0) = C_{i,k}^{(0)}, \end{cases} \tag{1}$$

где $i = 1–6$ и $k = 1–8$, $a_{0,1}$ – коэффициент естественного прироста, $a_{0.2}$ характеризует внутривидовую конкуренцию, $\{C_{i,k,0}, i = 1–6, k = 1–8\}$ – начальное содержание элементов питания в ризосфере, $\{a_{i,1}, a_{i,2}, i = 1–6\}$ характеризуют доступность элементов ризосферы и их динамику перехода из ризосферы в растение, $\{b_{i,j}, d_{i,j}, i, j = 1–6\}$ характеризует влияние элементов ризосферы на потребление растением элементов его питания, $\{B_{k,0}, k = 1–8\}$, $\{C_{i,k}^{(0)}, i = 1–6, k = 1–8\}$ – начальные показатели биомассы и содержаний в растении элементов питания.

Когда в ризосфере содержание элементов питания достаточно низкое или оно уже полностью израсходовано (выражение в круглых скобках равно нулю), кривая биомассы выходит на свой предельный уровень $a_{0,1}/a_{0,2}$.

Оценка параметров модели. Разностные схемы системы (1) линейны по коэффициентам. Поэтому для их нахождения можно применить метод наименьших квадратов (**МНК**). Подходящие для его применения разностные схемы принимают вид

$$\ln(B_k^{(t+1)}/B_k^{(t)}) = a_{0,1} - a_{0,2}B_k^{(t)} + \sum_{i=1}^{6}a_{i,1}C_{i,k,0} - \sum_{i=1}^{6}a_{i,2}C_{i,k}^{(t)}, \tag{2}$$

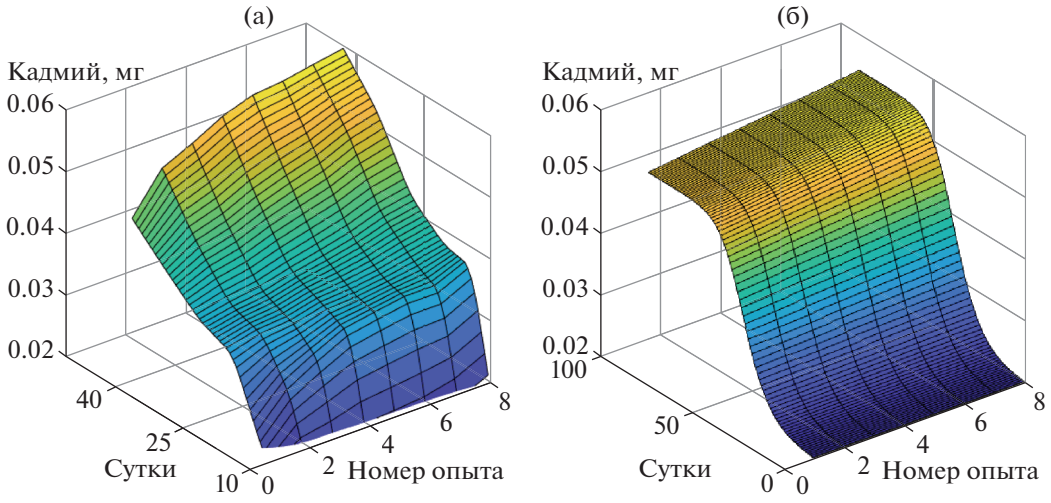


Рис. 1. Выборочные и модельные распределения биомассы и вынос Cd.

$$\frac{C_{i,k}^{(t+1)} - C_{i,k}^{(t)}}{B_k^{(t)}} = \sum_{j=1}^{6} b_{i,j} C_{j,k,0} - \sum_{j=1}^{6} d_{i,j} C_{j,k}, \qquad (3)$$

где t – текущие сутки и суточный шаг по времени.

Если в (2) ограничиться только первыми двумя членами его правой части, то вычисленные МНК доверительные интервалы коэффициентов принимают величины: $a_{0,1} = (1.546 \pm 0.101) \times 10^{-1}$ сут$^{-1}$ и $a_{0,2} = (-0.033 \pm 0.002) \times 10^{-1}$ (сут г)$^{-1}$.

Биомасса следует логистическому уравнению

$$B_k(t) = \frac{a_{0,1} B_{k,0}}{(a_{0,1} - a_{0,2} B_{k,0}) \exp(-a_{0,1} t) + a_{0,2} B_{k,0}}. \qquad (4)$$

Тогда к окончанию вегетационного периода (при больших t) биомасса растения близка к своей максимальной величине $B^* = a_{0.1}/a_{0,2}$.

На рис. 1 представлены распределения: а – сглаженное выборочное распределение, б – модельное распределение для всего вегетационного периода роста пшеницы Ленинградская-97 на дерново-подзолистой почве (как правило, 90 сут [23]). Актуальность построения модели распределения для всего вегетационного периода обусловлена важностью задач прогноза урожая. Для этого случая искомыми являются начальная величина биомассы $B_{k,0}$, $a_{0,1}$ и $a_{0,2}$. Их оценка следует решению задачи поиска минимума функционала, который выступает мерой отклонений выборочных и модельных распределений. Ее решение определяет такие доверительные интервалы: $B_{k,0} = 0.265 \pm \pm 0.034$ г, $a_{0,1} = 0.132 \pm 0.024$ сут$^{-1}$ и $a_{0,2} = (-0.054 \pm \pm 0.008) \times 10^{-1}$ (сут г)$^{-1}$.

Анализ выборочного распределения биомассы (рис. 1а) указывает независимость биомассы от схемы опытов. Действительно, для них практически совпадают первые и конечные уровни. Форма кривых отвечает логистической или сигмоидальной форме (4), особенность которых состоит в наличии точки перегиба и выходе этих кривых на плато. Распределения показывают высокое подобие модельных и выборочных кривых. Корреляция случаев (а) и (б) составляет 0.995, корреляция (в) и (г) – 0.994. При ее расчете использовали только те строки модельного массива, которые приходятся на сутки проведения выборочных экспериментов.

Если в (3) ограничиться членами только в одной круглой скобке правой части (которые отвечают только Cd), то оценка МНК приводит к таким доверительным интервалам: $b_{6,6} = (6.358 \pm \pm 0.532) \times 10^{-5}$ (сут мг)$^{-1}$ и $d_{6,6} = (-1.027 \pm 0.039) \times \times 10^{-3}$ (сут мг)$^{-1}$. Тогда корреляция между выборочным и модельным распределениями составляет 0.942. Для этого случая решение второго уравнения (1) принимает вид

$$C_{6,k}(t) = C_{6,k}^{(0)} \exp\left(-d_{6,6} \int_0^t B dt\right) + \frac{b_{6,6} C_{6,k,0}}{d_{6,6}} \left[1 - \exp\left(-d_{6,6} \int_0^t B dt\right)\right], \qquad (5)$$

где первое слагаемое отражает влияние начального распределения, а второе – механизм динамики выноса элементов. Соотношение (5) допускает предметную интерпретацию. Действительно, поскольку биомасса растения – монотонно возрас-

тающая функция, то при большом t показатель экспоненты стремится к $-\infty$, а сама экспонента – малое число. Тогда вынос элементов определяется их содержанием в ризосфере $C_{6,k,0}$ и соотношением между показателями доступности элементов питания из ризосферы и темпа их утилизации.

Для модели распределения Cd в течение его вегетационного периода следует определить коэффициенты $C_{6,k,0}$, $b_{6,6}$ и $d_{6,6}$. Их оценки следуют решению задачи поиска минимума меры отклонений экспериментальных и модельных распределений. Ее решение определяет доверительные интервалы: $C_6^{(0)} = 0.02 \pm 0.002$ мг, $b_{6,6} = (2.319 \pm \pm 0.251) \times 10^{-5}$ (сут мг)$^{-1}$ и $d_{6,6} = (-4.149 \pm 0.052) \times \times 10^{-3}$ (сут мг)$^{-1}$. Анализ выборочных и модельных распределений показывает их высокую степень подобия. Так, корреляция случаев (а) и (б) составляет 0.995, корреляция (в) и (г) – 0.994.

Вычислительные эксперименты. Постановка вычислительных экспериментов ставится следующим образом. При оптимальной для роста растения температуре и влажности сосуд радиуса 10 см заполнен окультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвой массой 5.5 кг [12, 15]. В его почве нет вредных примесей ТМ, т.е. при $t = 0$ $C_{i,k,0} = 0$. Принимается, что каждый год доза внесения P_2O_5 в посев составляет до 120 кг/га [18, 24]. Тогда для одного сосуда эта норма в среднем составляет 377 мг. Нормы загрязнения фосфорных удобрений определяются как слабо загрязненные (20 мг Cd/кг P_2O_5), средне загрязненные (40 мг Cd/кг P_2O_5) и сильно загрязненные (60 мг Cd/кг P_2O_5). В этом случае они равны 0.008, 0.016 мг и 0.024 мг Cd соответственно. Посев и сбор урожая выполняли раз в год без технических обработок (мелиорации, обработки удобрениями, классической, минимальной, нулевой обработками и т.п.). В почве ТМ закрепляются в верхнем почвенном слое гумусовыми веществами, глинистыми минералами, карбонатами и минералами с переменным зарядом [25]. В почве Cd сразу связывается в нерастворимые соли, либо адсорбируется на корнях растений. Выветривание, вымывание, а также испарение с поверхности почвы для ТМ практически отсутствуют. Такая имитация достигается наличием сосуда, где потери Cd имитируют природные процессы. Поэтому эта постановка эксперимента обеспечивает наиболее достоверную оценку содержания и действия кадмия (имитация изолированного лабораторного эксперимента) на биогеоценоз.

Вычислительный эксперимент поставлен таким образом: организуют цикл вычислений для определения года, когда содержание Cd в ризосфере окажется равным или превысит заданный уровень ПДК. Согласно модели (1), растение в течение отдельного года потребляет часть внесенного в почву Cd. Максимальное число итераций задано равным 600 годам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Случаи (а), (г) и (ж) характеризуют динамику аккумуляции Cd в ризосфере за период проведения экспериментов (600 лет); (б), (д) и (з) – динамику выноса Cd в конце вегетационного периода растений для каждого года эксперимента; (в), (е) и (и) – распределение Cd за вегетационный период в последний год эксперимента (за сезон 599–600 гг.). Форма кривых на рис. 2 показывает, что аккумуляция Cd в растении и ризосфере имеет нелинейный характер, который насчитывает 3 этапа: его линейная зависимость, постепенное снижение скорости накопления Cd в форме изгиба и стремление к постоянному уровню (плато), которое можно объяснить эффектом “насыщения”. Его интерпретация состоит в наличии такого момента, когда в растении “емкость” содержания элементов достигает предела и тем самым уравновешивает поступление элементов извне (внесение удобрений).

Таким образом, рост содержания Cd в почве и растениях прекращается и держится на постоянном уровне. Чем выше концентрация исходного элемента, тем быстрее наступает данный эффект. Такой результат подтверждается рядом авторитетных источников [3, 5, 20, 26].

Согласно расчетам для слабо загрязненных удобрений, содержание Cd в ризосфере достигнет ПДК России и Казахстана за 271 год, а для средне загрязненных и сильно загрязненных – за 89 и 55 лет соответственно. Токсичность растений в последнем варианте уже на первых итерациях на несколько порядков превосходит остальные. Такие изменения при применении удобрений с повышенным содержанием Cd будут губительным образом оказывать влияние для человека и животных, употребляющих данный продукт.

Для средне загрязненных удобрений вынос Cd к концу 599 года оказался в 2 раза больше предыдущего, а для сильно загрязненных удобрений повышение концентрации будет продолжать существенно загрязнять почву, поэтому уже на ранних стадиях необходимо будет прекратить всякое внесение удобрений и сконцентрировать все уси-

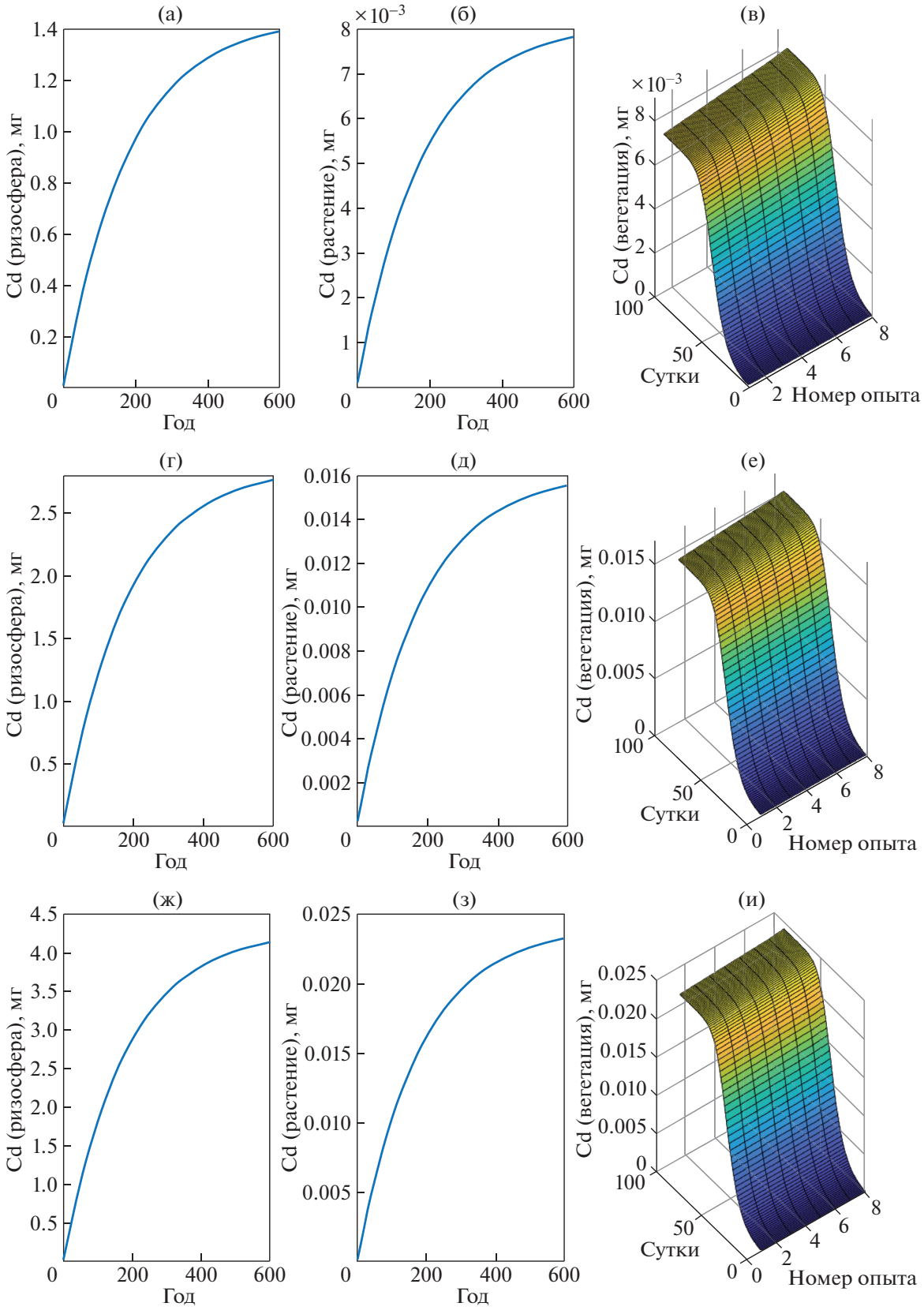


Рис. 2. Распределение Cd в экспериментах: (а–в) – слабо загрязненные удобрения, (г–е) – средне загрязненных удобрения, (ж–и) – сильно загрязненные удобрения.

Таблица 2. ПДК содержания кадмия в почве различных стран, мг/кг сухой массы

Страна	ПДК	Источник данных	Результаты экспериментов (время), лет		
			1	2	3
Австрия	5	[27]	–	–	–
Бразилия	1.3	[27]	–	–	205
Великобритания Германия	3	[27]	–	–	–
ЕС Китай Польша Финляндия	1	[27] [28] [27] [26]	–	275	133
Канада	1.4	[29]	–	–	237
Нидерланды	0.8	[30]	–	177	98
Казахстан Россия	0.5	[31] [32]	271	89	55
США	1.6	[27]	–	–	327

Примечание. В графе 1 – слабо загрязненные, 2 – средне загрязненные, 3 – сильно загрязенные удобрения.

лия на применении мероприятий, направленных на ремедиацию почв. Содержание Cd в растениях к концу рассматриваемого периода времени на несколько порядков больше, чем в остальных сценариях, что говорит о значительном повышении токсичности растений.

Следуя проведенным экспериментам, далее рассмотрен случай прогноза превышения ПДК в отдельных экономически развитых странах. Согласно табл. 2, для слабо загрязненных удобрений не наблюдается превышение допустимых норм в рамках заданных итераций (600 лет). Вариация элементов для средне загрязненных удобрений весьма значительна, а для сильно загрязненных удобрений не отмечено превышения только у исключительного ряда стран с высокими уровнями ПДК. Следует отметить, что в некоторых странах, таких как Австрия, Великобритания, Германия, ПДК значительно превышены по сравнению с другими странами, тогда как самые низкие пределы отмечены в Казахстане и России.

Понятно, что полученные результаты позволяют достаточно грубо оценить сценарии безопасной эксплуатации земель сельскохозяйственного направления. Если речь идет о проводимых экспериментах в сосудах, то вероятна ошибка измерений, связанная с большим различием процессов, которые происходят в реальных условиях в полях и вегетационных опытах в сосудах. К тому же испытания проводили всего за один период вегетации. В таком случае достоверность результатов может быть получена только на основании большой совокупности данных, полученных в полевых условиях с динамикой роста и развития растений, выноса элементов как минимум в несколько десятков лет.

На основании проведения подобных вычислительных экспериментов становится возможным оценить антропогенное влияние на среду в зависимости от определенного промежутка времени, при существенном снижении затрат на проведения полевых экспериментов. Стоимость таких работ варьирует от 500 тыс. до нескольких млн руб. за один полевой опыт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывало адекватность разработанной математической модели экспериментальному материалу. Действительно, если мерой адекватности выступает корреляция между модельными и экспериментальными распределениями, то их величины превышали 0.940.

В рамках модели показана достоверность положения о том, что количественно динамика выноса Cd в надземную часть растения определяется биомассой этой части и его текущим распределением в ризосфере. Динамика биомассы этой части растений следует логистическому уравнению.

На основании модели разработана методология оценки длительностей периодов безопасного режима внесения в почву содержащих Cd удобрений, где длительность периода определяется моментом превышения ПДК величиной содержа-

ния Cd. Методология опробована на оценке ПДК для почв экономически развитых стран.

Эта оценка показала, что удобрения с низким содержанием Cd (до 20 мг Cd/кг P_2O_5) практически не влияли на состояние почвы и растений, тогда как средне (от 40 до 60 мг Cd/кг P_2O_5) и сильно загрязненные (>60 мг Cd/кг P_2O_5) оказывали существенное влияние на биогеоценоз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Колесников В.А., Аветисян А.А.* Оценка содержания тяжелых металлов (свинец и кадмий) в семенах перспективных кормовых растений // Вестн. КрасГАУ, биол. науки. 2014. № 4. С. 10–14.
2. *Соколов О.А., Черников В.А.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 1. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. 164 с.
3. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
4. *Neng-Chang C., Huai-Man C.* Chemical behavior of cadmium in wheat rhizosphere // Pedosphere. 1992. V. 2. P. 363.
5. *Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В.* Влияние кадмия на некоторые физиологические показатели растений ячменя в зависимости от их возраста // Тр. Карел. НЦ РАН. 2010. № 2. С. 27–31.
6. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков): учеб. пособ. Петрозаводск: Ин-т биол. Карел. НЦ РАН, 2012. 55 с.
7. *Oosterhuis F.H., Brouwer F.M., Wijnants H.J.* A possible EU wide charge on cadmium in phosphate fertilisers: economic and environmental implications // Final report to the European Commission. Rep. E-00/02. April. 2000.
8. Proposal for a regulation of the European parliament and of the council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009. https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/10102/2016/EN/SWD-2016-64-F1-EN-MAIN-PART-2.PDF
9. *Ефремова М.А., Митрофанов В.В.* Исследование динамики накопления кадмия овсом в опытах с водной и почвенной культурами // Изв. СПбГАУ. 2018. № 50. С. 62–68.
10. *Bessonov N., Volpert V.* On a problem of plant growth // Patterns and waves / Eds. Abramian A., Vakulenko S., Volpert V. St. Peterburg, 2003. P. 323–337.
11. *Ефремова М.А., Губин А.Н., Сладкова Н.А. Занилов А.Х.* Взаимодействие фосфора и тяжелых металлов (цинка и кадмия) в системе торфяная низинная почва–растение // Сб. научн. тр. "Гумус и почвообразование". СПб.–Пушкин: СПбГАУ, 2009. С. 67–71.
12. *Ефремова М.А., Сладкова Н.А., Вяльшина А.С.* Динамика накопления кадмия и калия растениями пшеницы на дерново-подзолистой и торфяной низинной почвах // Агрохимия. 2013. № 11. С. 86–96.
13. *Ефремова М.А., Сладкова Н.А., Дубовицкая В.И.* Динамика накопления кадмия растениями пшеницы из торфяной низинной почвы // Изв. СПбГАУ. 2011. № 25. С. 34–39.
14. *Сладкова Н.А.* Распределение цинка и кадмия в системе торфяная почва–растение под влиянием фосфорных и калийных удобрений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2016. 22 с.
15. *Сладкова Н.А.* Распределение цинка и кадмия в системе торфяная почва–растение под влиянием фосфорных и калийных удобрений: Дис. ...канд. биол. наук. СПб., 2016. 187 с.
16. Растениеводство / Под ред. Посыпанова Л.А. М.: Колос, 1997. 447 с.
17. *Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А.* Почвоведение с основами геологии: учеб-к. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 362 с.
18. *Кидин В.В., Торшин С.П.* Агрохимия. М.: Проспект, 2015. 591 с.
19. *Дричко В.Ф., Изосимова А.А.* Методика определения удельных скоростей роста растений и выноса ими химических элементов из почвы. СПб.: АФИ, 2011. 24 с.
20. *Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г.* Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 396 с.
21. *Kersebaum K., Richter J.* Modelling nitrogen dynamics in a plant–soil system with a simple model for advisory purposes // Fertil. Res. 1991. V. 27. № 2–3. P. 273–281.
22. *Черных Н.А., Ладонин В.Ф.* Нормирование загрязнение почв тяжелыми металлами // Агрохимия. 1995. № 6. С. 71–80.
23. *Четырбоцкий В.А.* Математическое моделирование динамики минерального питания растений в системе удобрение–почва–растение (на примере азота, фосфора и кадмия) // Тр. конф. "Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные концепции и перспективы", 27–31 мая, 2019 г., Москва. М.: Изд-во МГУ, 2019. С. 408–411.
24. *Минеев В.Г.* Агрохимия. М.: Изд-во МГУ, 2006. 714 с.
25. *Violante A., Cozzolino V., Peremolov L., Caporale A.G., Pigna M.* Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments // J. Soil. Sci. Plant Nutr. 2010. № 10(3). P. 268–292.
26. *Водяницкий Ю.Н.* Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами. М.: Изд-во МГУ, 2017. 192 с.
27. *Gonçalves A.C., Nacke H., Schwantes D., Coelho G.F.* Heavy metal contamination in Brazilian agricultural soils due to application of fertilizers // Environmental risk assessment of soil contamination. Hernandez-Soriano: IntechOpen, 2014. № 3. https://doi.org/10.5772/57268
28. *Tiankui Li, Yi Liu, Sijie Lin, Yangze Liu, Yunfeng Xie.* Soil pollution management in China: A Brief introduction // Sustainability. 2019. V. 11. № 556. P. 15.

29. Canadian council of ministers of the environment. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Cadmium (1999). // Canad. Environ. Qual. Guidel. 1999. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment

30. *Никитина А.В., Жаткина Т.С., Курбатова А.И.* Некоторые аспекты нормирования загрязняющих веществ в почве // Вестн. РУДН. Сер. экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 5. С. 84–88.

31. Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ, вредных организмов и других биологических веществ, загрязняющих почву, утвержденные совместным приказом Министерства здравоохранения Республики Казахстан от 30 января 2004 г. № 99 и Министерства охраны окружающей среды Респ. Казахстан от 27 января 2004 г. Астана, 2004. № 21-П.

32. Постановление “О введении в действие гигиенических нормативов ГН”. РФ. М., 2006. 2.1.7.2041-06 от 23 января 2006 г.

Estimation of Cadmium Contamination of Agrocenosis by Mathematical Modeling Methods

V. A. Chetyerbotskiy[a,#] and A. N. Chetyerbotskiy[b]

[a] Joint stock company “Apatit”, Innovation Center
Leninsky prosp. 55/1, p. 1, Moscow 119333, Russia
[b] Far Eastern Geological Institute Feb RAS
prosp. 100 years of Vladivostok 159, Vladivostok 690022, Russia
[#] E-mail: Chetyrbotsky@yandex.ru

The article deals with the dynamics of cadmium accumulation in soil and agricultural plants, which belongs to the group of particularly toxic heavy metals. To solve them, a mathematical model of this dynamics is constructed and their adequacy to the experimental material is established. The model shows that the dynamics of cadmium removal was determined by the values of plant biomass and Cd content in the rhizosphere. Based on the model, a method has been developed for estimating the duration of the safe mode of applying Cd-containing fertilizers to the soil, which is determined by the moment when the maximum permissible concentration (MPC) is exceeded. As an example, the estimation of the time of soil pollution in a number of economically developed countries is given. The interpretation of the results obtained is given.

Key words: cadmium, vegetation period, mathematical model, computational simulation experiments.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 4, с. 94–96

ХРОНИКА

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “ГЛОБАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ: РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ, МОДЕЛИ, ПРОГНОЗЫ” (3–5 октября 2019 г., г. Воронеж)

DOI: 10.31857/S0002188120040080

В период 3–5 октября 2019 г. в г. Воронеже на базе Воронежского государственного университета состоялась международная научно-практическая конференция “Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы”. Конференция организована факультетом географии, геоэкологии и туризма ВГУ при поддержке и под патронажем Министерства науки и высшего образования РФ, Российского фонда фундаментальных исследований, Русского географического общества (Воронежское областное отделение), Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ, Института географии РАН и факультета географии МГУ им. М.В. Ломоносова.

В работе конференции приняли участие около 300 ученых из России, Казахстана, Беларуси, Азербайджана, Узбекистана, Украины, Сербии и Мексики. Активными участниками стали сотрудники Главной метеорологической обсерватории РФ, Института географии РАН, Института водных проблем РАН, Института фундаментальных проблем биологии РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, члены Российского метеорологического общества.

На конференции был рассмотрен широкий круг вопросов, посвященный обсуждению и анализу причин глобальных климатических изменений; региональных особенностей, происходящих в различных регионах России и мира, прогнозных моделей влияния климатических изменений на окружающую среду. Как подчеркнул научный руководитель Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ Р.М. Вильфанд: “Впервые в нашей стране такая значительная конференция по климату прошла за пределами Москвы и Санкт-Петербурга”. Он рассказал о создании Северо-Евразийского климатического Центра в нашей стране, который не только поставляет данные в мировой климатический центр в Норвегии, но является многофункциональным прогностическим центром. Цель Центра – мониторинг климата, создание общей модели циркуляции океана, прогнозирование, обучение. Выпускаемая продукция Центра – краткосрочные и долгосрочные прогнозы по климату. Первостепенные задачи – повышение разрешающей способности климатических моделей и повышение точности прогнозов, поскольку потребителей точных данных о климате становится все больше.

В приветственном слове первого вице-президента Русского географического общества, академика РАН Н.С. Касимова сказано, что на современном этапе важно всесторонне изучать климатические эффекты, поскольку климат оказывает влияние не только на макроуровнях, но в значительной степени – и на микроуровнях. Климатические факторы (температура и влажность) влияют на формы химических элементов, поэтому современный мониторинг должен отслеживать микро- и наночастицы в атмосфере. Заместитель директора Института географии РАН чл.-корр. РАН А.А. Тишков подчеркнул, что получила новый импульс к развитию такая отрасль как медицинская география. По существу, развивается новое направление в науке.

Работа участников конференции распределилась по нескольким крупным тематикам, среди которых такие как глобальные климатические тенденции, региональные особенности современных климатических изменений, закономерности трансформации почвенных, биотических компонентов ландшафтов, особенности климатических изменений в городах, социально-экономические и эколого-медицинские эффекты региональных изменений климата.

Пленарные доклады были посвящены возрастающей значимости климатической информации для различных сфер деятельности человека и проблеме повышения точности климатических прогнозов. Наблюдаемое в последние десятилетия изменение климата оказывает огромное влияние на многие стороны деятельности человека. Оно выражается в виде увеличения среднегодовой температуры, что уже привело к изменению ре-

жима температуры воздуха, осадков, стремительному росту числа экстремальных проявлений климата на региональном уровне.

Большое внимание участников было привлечено к теме, связанной с закономерностями трансформации почвенных ресурсов, биоты и ландшафтов в условиях современных климатических изменений и хозяйственной деятельности человека. В докладах участников было показано, что стратегия агропромышленного комплекса РФ должна предполагать разработку и освоение дифференцированных систем земледелия, максимально адаптированных к конкретным агроклиматическим, ландшафтным, экологическим, почвенным и социальным условиям территорий разных уровней.

В ряде сообщений было показано, что проблемы трансформации почвенных и биотических компонентов могут обостряться в связи с прогрессирующим потеплением климата. Глобальное потепление может усиливать процессы деградации окружающей среды, влиять на их социальные и экономические последствия. По данным ученых, прогнозируется дальнейшее повышение температуры на 1–2°С в зонах степи и лесостепи.

Устойчивое развитие сельского хозяйства в условиях изменяющегося климата, как подчеркивали докладчики, тесно связано с плодородием почвы, внесением минеральных и органических удобрений. В 2017 г. в областях, расположенных в центральной части России на 1 га посевов было внесено 85–150 кг д.в. минеральных удобрений и 4 т органических, что меньше необходимых норм. При этом отмечено, что полевые культуры весьма существенно различаются по их влиянию на процессы минерализации гумуса и почвообразования. Наибольшие среднегодовые потери гумуса наблюдали под чистым паром и пропашными культурами (1.5–2.5 т/га), средние – под зерновыми (0.4–1.0 т/га). Под многолетними травами запасы гумуса, напротив, увеличивались на 0.3–0.6 т/га. Посев злаково-бобовых трав был эквивалентен внесению минерального азота в дозах 100–150 кг/га. Многие докладчики подчеркивали известный постулат о том, что многолетние травы являются единственной группой сельскохозяйственных культур, способствующей расширенному воспроизводству органического вещества в почве; а это в условиях изменяющегося климата приобретает особое значение, т.к. вероятность сухих и засушливых лет на территории Центрального Черноземья может повышаться в ближайшие годы до 30%. Уже сейчас примерно один год из трех или четырех бывает засушливым. Засухи, как правило, сопровождаются суховеями – горячими и сильными ветрами, вызывающими над распаханными полями пыльные бури и гибель урожая. В таких условиях одностороннее увлечение экономически привлекательными, но постоянными культурами (подсолнечником, сахарной свеклой) приводит к нарушению севооборота, развитию негативных процессов деградации земель, ухудшению фитосанитарного состояния посевов.

Как отмечают ученые, в складывающихся условиях потепления климата предпочтительным было бы увеличить в структуре посевов зерновых культур долю озимой пшеницы, сорго (джигара) и проса, а среди технических культур повысить участие ярового рапса, сои и горчицы, что позволит снизить чрезмерную концентрацию посевов подсолнечника, истощающего почву.

Отмечено, что отдельные регионы России уже в ближайшие годы могут пережить кризисы, связанные с уменьшением урожайности из-за серий аномально засушливых лет. Потепление климата, как рекомендуют ученые, требует уже в настоящее время ряд мероприятий, противостоящих этому. Для смягчения жары и засушливых явлений накоплен бесценный опыт в области агролесомелиоративной науки и защитного лесоразведения. Лесные полосы и искусственные водохранилища, создаваемые в естественных ложбинах и балках путем задержания снеговых и дождевых вод, могут выполнять, как показывают многочисленные исследования, природоохранные функции. Несколько десятилетий назад была определена потребность иметь в России 14 млн га защитных насаждений разного целевого назначения, из них имеется пока около 3 млн га. Рационально используя имеющиеся ресурсы, можно смягчить негативное влияние климатических факторов.

Изменение климата носит неоднородный характер. Анализ изменений климата на юго-востоке Центрального Черноземья позволяет сделать вывод, что повышение температуры и некоторое увеличение осадков после прекращения активной вегетации растений создают более благоприятные условия для перезимовки озимой пшеницы в регионе. Однако при поздней вегетации сохраняется риск гибели посевов вследствие резких перепадов температур. Степная зона РФ скорее подвержена процессам аридизации. По аридному сценарию может пойти трансформация биогеоценозов северной части Юга России (Волгоградская и Воронежская обл.).

За последние 3 десятилетия наблюдают существенные изменения в экосистемах. Тренд потеп-

ления на территории нашей страны опережает глобальный, и процессы проявляются особенно ярко. Зафиксировано смещение фенологических явлений (ранние сроки вегетации, увеличение вегетационного периода, “размывание” теплого периода в целом, продвижение южных видов в высокие широты).

На огромной территории нашей страны климатические тренды проявляют неоднородность, поэтому изменения растительного покрова (сукцессии) носят мозаичный характер. В горных районах фиксируется смещение границ леса, на равнинных территориях сдвиг границы леса пока не наблюдается (возможно, запаздывает). По данным ученых, климат Москвы приблизился к климату Курска и Воронежа. Отмечаются некоторые признаки расширения зоны лесостепи. Хотя по результатам большинства прогнозных моделей в XXI веке не следует ожидать сдвига современных границ природных зон.

Опасным следствием потепления является внедрение чужеродных видов в экосистемы. В растительных сообществах усилилась агрессивность инвазий таких видов как амброзия (*Ambrosia artemisiifolia* L.) и золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.), вызывающих сильную аллергию человека.

На территории Российской Федерации глобальное потепление вызывает разнонаправленные изменения в выпадении осадков в различных регионах и, как следствие, мозаичность проявлений в экосистемах. Поэтому так важно, чтобы стратегия землепользования основывалась на возможно более точных климатических прогнозах для каждого региона. Только рациональное природопользование, основанное на прогнозируемых моделях, может обеспечить стабильность сельскохозяйственного производства.

О. А. Лучицкая, Н. Н. Зеленская