

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 9, 2020

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Влияние удобрений и способа обработки почвы на вынос азота урожаями озимой пшеницы и культур зернопропашного севооборота
В. А. Шевченко, А. И. Беленков 3
- Влияние приема биологизации на биологическое состояние органического вещества чернозема типичного
Н. А. Чуян, Г. М. Брескина 8
-

Удобрения

- Влияние минеральных удобрений на химический состав зерна кукурузы и вынос основных элементов питания в условиях лесостепи Среднего Поволжья
А. В. Сидоров, А. А. Моисеев, А. В. Ивойлов 18
- Влияние доз и сочетаний минеральных удобрений на формирование урожайности и качества зерна пивоваренного ячменя в Центральном Нечерноземье
А. Ю. Гаврилова, А. М. Конова, Н. Е. Самсонова 24
-

Пестициды

- Развитие исследований по формированию современного ассортимента фунгицидов
Л. Д. Гришечкина, В. И. Долженко, О. В. Кунгурцева, Т. И. Ишкова, С. Д. Здрожевская 32
-

Агроэкология

- Потоки диоксида углерода при разном режиме использования сенокоса на осушенной торфяной почве
А. Г. Молчанов, Г. Г. Суворов, Д. В. Ильясов, А. А. Сирин 48
- Оценка эколого-агрохимического состояния агроценоза с многолетним выращиванием мискантуса в Западной Сибири
С. Ю. Капустянчик, Н. В. Бурмакина, В. Н. Якименко 65
-

Экотоксикология

- Методические особенности исследования миграции тяжелых металлов и других веществ в почвенных колонках при загрязнении
А. С. Фрид, Т. И. Борисочкина 74
-

ОБЗОРЫ

- К вопросу о нормативно-правовом регулировании биостимуляторов
О. И. Яхин, А. А. Лубянов, И. А. Яхин 87
-
-

Contents

No. 9, 2020

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Influence of Fertilizers and Soil Treatment Methods on Nitrogen Removal by Winter Wheat and Crop Rotation Crops

V. A. Shevchenko, A. I. Belenkov

3

Estimation of Biological Quality of Organic Matter of Typical Chernozem while Using a Greening Practice

N. A. Chuyan, G. M. Breskina

8

Fertilizers

Influence of Mineral Fertilizers on the Chemical Composition of the Corn Grain and the takeaway of Basic Elements in the Conditions of Forest-Steppe of the Middle Volga Region

A. V. Sidorov, A. A. Moiseev, A. V. Ivoilov

18

Influence of Doses and Combinations of Mineral Fertilizers on Formation of Roductivity and Quality of Malting Barley Grain in the Central Non-Chernozem Region

A. Yu. Gavrilova, A. M. Konova, N. E. Samsonova

24

Pesticides

Development of Research on the Formation of Modern Assortment of Fungicides

L. D. Grishechkina, V. I. Dolzhenko, O. V. Kungurtseva, T. I. Ishkova, S. D. Zdrozhevskaya

32

Agroecology

Carbon Dioxide Fluxes under Different Haymaking Regime on Drained Peat Soil

A. G. Molchanov, G. G. Suvorov, D. V. Ilyasov, A. A. Sirin

48

Evaluation of the Ecological and Agrochemical State of Agrocenosis with Long-Term Growing of Miscantus in Western Siberia

S. Yu. Kapustyanchik, N. V. Burmakina, V. N. Yakimenko

65

Ecotoxicology

Methodical Peculiarity of Studying Migration of Heavy Metals and Other Substances in Soil Columns at Pollution

A. S. Frid, T. I. Borisochkina

74

REVIEWS

Regarding the Challenge of Biostimulants Legal and Regulatory Framework

O. I. Yakhin, A. A. Lubyaynov, I. A. Yakhin

87

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ И СПОСОБА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ НА ВЫНОС АЗОТА УРОЖАЯМИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И КУЛЬТУР ЗЕРНОПРОПАШНОГО СЕВООБОРОТА

© 2020 г. В. А. Шевченко¹, А. И. Беленков^{1,*}

¹ *Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия*

**E-mail: belenokaleksis@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.11.2019 г.

После доработки 22.01.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Результаты многолетних исследований показали, что решающим фактором при возделывании озимой пшеницы является уровень минерального питания и при применении интенсивной глубокой системы обработки почвы и высокого фона питания урожайность культуры возрастала. В годы с достаточным количеством осадков преимущество имела традиционная технология возделывания озимой пшеницы. Рассмотрены отдельные элементы биологизации земледелия в полевом опыте Центра точного земледелия, связанные с проведением пожнивного посева горчицы на сидерат после уборки озимой пшеницы под урожай картофеля будущего года, послеуборочным использованием соломы озимой пшеницы и ячменя, заделкой в почву растительных остатков всех культур зернопропашного севооборота.

Ключевые слова: севооборот, азотные удобрения, баланс азота, коэффициенты использования азота, дерново-подзолистая почва, зернопропашной севооборот, растительные остатки, сидерат, поступление и вынос элементов питания.

DOI: 10.31857/S0002188120090100

ВВЕДЕНИЕ

Накопление и содержание основных элементов питания в почвах зависит от многих сопутствующих факторов. Поэтому относительное содержание, прежде всего азота, в основной и побочной продукции озимой пшеницы, накопление сухого вещества имеют важное значение, поскольку дают возможность оценить общий вынос азота и оценить его баланс в системе почва–удобрение–растение [1, 2]. На основании данных, полученных в длительном стационарном опыте, заложенном в 1969 г. Б.А. Доспеховым в учхозе “Михайловское” Московской обл., интерпретировали сведения о характере поступления и дальнейшего использования азота почвы и удобрений. Цель работы – изучение влияния применения удобрений и способа обработки почвы на вынос азота урожаями озимой пшеницы и культур зернопропашного севооборота.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексные исследования провели в полевом опыте Центра точного земледелия (ЦТЗ), который был создан в 2007 г. в рамках инновацион-

ного общеобразовательного проекта РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева. Схема опыта включала 3 системы обработки почвы (традиционную, минимальную ресурсосберегающую и интенсивную глубокую) и 4 фона удобрений (естественный, умеренный, программируемый и высокий).

Варианты обработки почвы:

1 – традиционный (контроль), представленный лущением стерни, вспашкой на глубину 20–22 см, предпосевной обработкой РВК-3,6; 2 – минимальный ресурсосберегающий (без основной обработки, предпосевное фрезерование на глубину 8–10 см); 3 – интенсивный глубокий (трехъярусная вспашка раз в 3 года, предпосевное фрезерование на глубину 8–10 см).

Системы удобрения представлены 4-мя фонами питания: естественным (без удобрений), умеренным – NPK (N65P70K65), программируемым – 2NPK (N130P140 K130), высоким – Нав + 2NPK (навоз 11.7 т/га + N130P140 K130).

Почва опытного участка – дерново-подзолистая среднесуглинистая. Перед закладкой опыта пахотный слой характеризовался следующими показателями: содержание гумуса – 1.61%, обще-

Таблица 1. Относительное содержание азота в урожае озимой пшеницы (среднее за 5 лет), % на сухое вещество

Вариант обработки почвы	Вариант удобрения			
	Без удобрения	2NPK	Навоз + 2NPK	Среднее в вариантах обработки
Традиционная (контроль)	1.82	2.00	1.9	1.95
	0.63	0.8	0.88	0.84
Минимальная ресурсосберегающая	1.63	1.92	1.83	1.88
	0.50	0.74	0.86	0.80
Интенсивная глубокая	1.78	2.02	1.95	1.98
	0.5	0.73	0.79	0.76

Примечание. Над чертой – содержание в зерне, под чертой – в соломе.

го азота – 0.1%, подвижного фосфора – 4.0, обменного калия – 6.1 мг/100 г почвы, рН_{KCl} 5.0. Дважды было проведено известкование по полной гидролитической кислотности.

Основу Центра точного земледелия составляет полевой опыт общей площадью около 6 га по сравнительному изучению технологий точного и традиционного земледелия в четырехпольном зернопропашном севообороте с чередованием культур: викоовсяная смесь на корм – озимая пшеница с пожнивным посевом горчицы на сидерат – картофель – ячмень. В опыте изучают 2 фактора – технологии возделывания полевых культур (фактор *A*) и приемы основной обработки почвы (фактор *B*). В настоящей статье рассмотрен только фактор *B*. Схемой опыта предусмотрены следующие приемы основной обработки почвы: отвальная на глубину 20–22 см под все культуры севооборота, которую изучали в сравнении с нулевой (без обработки) под викоовсяную смесь и озимую пшеницу, и минимальная на глубину 12–14 см под картофель и ячмень. Культуры возделывали с применением минеральных комплексных удобрений (нитрофоски) с предпосевным внесением в дозе 300 кг/га под вику + овес, озимую пшеницу и ячмень, 1 т/га – под картофель в расчете на соответствующую планируемую урожайность. Помимо этого, под озимую пшеницу применяли 2 подкормки аммиачной селитрой в дозе N70 каждая [3–6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что содержание азота в основной и побочной продукции зависело от систем обработки почвы и от доз внесенных удобрений (табл. 1).

В варианте с минимальной ресурсосберегающей обработкой, в котором проводили только предпосевное фрезерование, отмечено заметное по сравнению с другими обработками снижение содержания азота в зерне озимой пшеницы. При-

чем эта закономерность была характерна как для удобренных, так и неудобренных вариантов. Если в вариантах традиционной и интенсивной глубокой обработок содержание азота в зерне составило соответственно 1.82 и 1.78%, то в варианте с фрезерованием оно было равно 1.63%. В среднем для 2-х фонов удобрения в варианте с минимальной ресурсосберегающей обработкой содержание азота в зерне снизилось на 3.7 и 5.3% по сравнению с контролем и интенсивной глубокой обработкой соответственно.

В соломе отмечено снижение содержания азота на фонах без удобрений и удобренном при замене ежегодной вспашки предпосевным фрезерованием с 0.63 до 0.5% и с 0.84 до 0.80% соответственно.

Установленная закономерность имеет принципиальное значение, т.к. свидетельствует об определенной направленности синтеза и минерализации азотосодержащих органических веществ при уменьшении глубины обработки почвы.

Более объективным показателем оптимизации условий питания растений является общий вынос урожая азота, а также его затраты на создание 1 т зерна и соответствующего количества соломы.

Общий вынос азота на естественном фоне питания в варианте с минимальной ресурсосберегающей обработкой составил в сумме за 5 лет 206 кг/га. Увеличение глубины и интенсивности обработки ускорило процесс минерализации органического вещества почвы, что выразилось в увеличении выноса азота в вариантах ежегодной отвальной обработки и сочетания трехъярусной вспашки с фрезерованием (табл. 2). Дополнительный вынос азота в этих вариантах на удобренном фоне составил 47 кг/га, на удобренном – соответственно 71 и 31 кг/га.

Фрезерование, улучшая водно-воздушный режим почвы, способствует усилению биологической активности и тем самым положительно влияет на мобилизацию элементов питания растений. Однако потребность в элементах питания озимой пшеницы осенью невелика, составляет порядка 7–10% от их максимального выноса. По-

Таблица 2. Вынос азота озимой пшеницей при разных технологиях возделывания, кг/га

Вариант обработки почвы	Фон питания		
	естественный	программируемый	высокий
Традиционная	51	102	126
Минимальная ресурсосберегающая	41	99	110
Интенсивная глубокая	51	102	110

Таблица 3. Нормативный вынос азота озимой пшеницей (среднее за 5 лет), кг/га

Вариант обработки почвы	Затраты азота на 1 т продукции, кг	Соотношение N : P : K		
		N	P	K
Традиционная	38.1	2.5	1.0	1.9
Минимальная ресурсосберегающая	34.2	2.1	1.3	1.7
Интенсивная глубокая	35.4	2.2	1.0	1.8

этому усвоить минеральный азот, накопленный почвой к осени, растения озимой пшеницы не могут. В весенне-летний период озимая пшеница росла и развивалась примерно в одинаковых усло-

виях во всех изученных вариантах обработки почвы. Кроме того, в варианте с минимальной ресурсосберегающей обработкой условия превращения органического вещества почвы были с отчетливо выраженной аккумуляционной направленностью.

Общий вынос элементов питания культурами – величина непостоянная. Поэтому для определения дозы удобрений под планируемый урожай, а также установления в ней элементов питания используют более стабильный показатель – вынос азота единицей основной и побочной продукции.

Данные, характеризующие зависимость затрат азота на создание 1 т зерна с соответствующим количеством побочной продукции, от доз удобрений и приемов обработки почвы, представлены в табл. 3. Озимая пшеница в среднем для 3-х фонов удобрения на создание 1 т зерна с соответствующим количеством соломы в варианте с традиционной обработкой затрачивала 38.1 кг N, при соотношении 2.5 N : 1.0 P : 1.9 K. В варианте с фрезерованием вынос азота снизился на 3.9 кг. В вариантах 2 и 3 на единицу усвоенного фосфора потребление азота и калия несколько снизилось. Таким образом, нормативные показатели выноса азота единицей основной и побочной продукции, а также соотношение N : P : K свидетельствовали о необходимости дифференцированного подхода при установлении доз удобрения для отдельных культур севооборота.

Таблица 4. Влияние технологии возделывания озимой пшеницы на урожайность (среднее за 5 лет), т/га

Вариант обработки почвы	Фон питания			
	естественный	умеренный	программируемый	высокий
Традиционная	2.49	3.46	4.02	4.74
Минимальная ресурсосберегающая	2.45	3.47	3.84	4.61
Интенсивная глубокая	2.60	3.62	4.14	4.44
Среднее для фонов питания	2.51	3.52	4.00	4.60

Таблица 5. Баланс азота в зернопропашном севообороте (среднее за ротацию), кг/га

Обработка почвы	Культура	Поступление, кг/га					Вынос с ОП+ПП, кг/га	Баланс, кг/га
		МУ	ПП	ПКО	ПС	Всего		
Отвальная	Викоовсяная смесь	32	77	43	–	152	116	+36
	Озимая пшеница	102	–	48	–	150	206	–56
	Картофель	160	21	30	15	226	226	0
	Ячмень	32	115	39	–	186	195	+10
За ротацию		326	213	160	15	714	744	–30
Минимальная	Викоовсяная смесь	32	76	49	–	157	133	+24
	Озимая пшеница	102	–	48	–	150	181	–31
	Картофель	160	37	41	12	250	197	+53
	Ячмень	32	115	49	–	186	208	+22
За ротацию		326	228	177	12	743	819	+24

Примечание. ОП – основная продукция, ПП – побочная продукция, МУ – минеральные удобрения, ПКО – пожнивно-корневые остатки, ПС – поживной сидерат.

Таблица 6. Поступление элементов питания с растительными остатками и их вынос урожаем культур севооборота (среднее за 2014–2018 гг.), кг/га

Культура	Обработка почвы	Азот		Фосфор		Калий	
		поступление*	вынос	поступление*	вынос	поступление*	вынос
Викоовсяная смесь	отвальная	125	133	35	36	108	112
	нулевая	120	116	27	31	80	104
Озимая пшеница	отвальная	159	206	26	31	69	104
	нулевая	57	181	18	53	58	115
Картофель	отвальная	106	226	25	72	164	139
	минимальная	90	197	22	66	137	120
Ячмень	отвальная	154	196	112	36	64	74
	минимальная	154	208	91	38	69	88

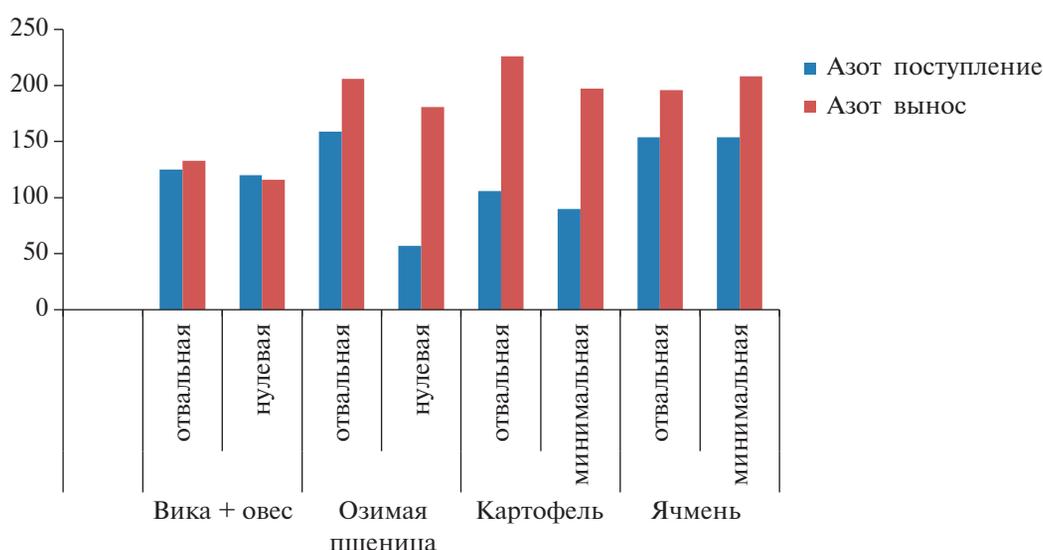
*Поступило в почву с растительными остатками культур севооборота, в т.ч. с сидератом под картофель [7].

Разнообразное сочетание технологических приемов возделывания озимой пшеницы оказало неодинаковое влияние на ее урожайность (табл. 4). Установлено, что характер баланса элементов питания в почве под культурами зернопропашного севооборота определялся дозами применения минеральных удобрений, количеством элементов питания, поступающих с побочной продукцией, количеством пожнивно-корневых остатков и сидерата в виде горчицы белой под картофель. Система обработки почвы (отвальная и минимальная) также оказывала влияние на баланс элементов питания через изменение скорости разложения органических остатков.

Внесение N32 в составе нитрофоски под ячмень и викоовсяную смесь в сочетании с дополнительным поступлением азота с растительными остатками после уборки предшественников в раз-

мере 196 и 116 кг N/га соответственно обеспечило слабо положительный баланс азота в почве под этими культурами. Увеличение дозы внесения азота до N102 под озимую пшеницу и поступление 48 кг N/га с поукосно-корневыми остатками предшествующей викоовсяной смеси на корм не в полном объеме обеспечили потребность растений, дефицит азота составлял 30 кг при отвальной обработке и 31 кг/га – при прямом посеве.

Внесение N160 с минеральными удобрениями и поступление 66 кг N/га с органическими остатками формировало нулевой баланс азота при возделывании картофеля в варианте вспашки и положительный баланс (+53 кг N/га) в варианте минимальной обработки (табл. 5). В вариантах отвальной обработки почвы на глубину 20–22 см в сумме за ротацию с различными компонентами (соломой, ботвой, пожнивно-корневыми остат-

**Рис. 1.** Поступление азота с растительными остатками и его вынос урожаем культур севооборота (среднее за ротацию), кг/га.

ками и минеральными удобрениями) поступало 714 кг N/га, отчуждалось – 744 кг/га, что формировало дефицитный баланс.

При минимальной обработке, включавшей дискование на глубину 12–19 см под ячмень и прямой посев однолетних бобово-злаковых трав и озимой пшеницы, вынос азота основной и побочной продукцией был на 3.3% меньше поступления, что характеризовало баланс как слабоположительный.

Важно было проследить количество поступивших с пожнивно-корневыми остатками полевых культур элементов питания в почву и определить их вынос урожаем (табл. 6). Следует отметить, что поступление азота с растительными остатками только для викоовсяной смеси превышало его вынос из почвы, для остальных культур севооборота отмечен дефицит азота как элемента питания, который покрывался за счет внесения перед посевом минеральных комплексных удобрений (рис. 1). Наибольший дефицит азота отмечен для картофеля, несмотря на заделку горчицы на сидерат с осени под культуру. В связи с этим под картофель вносили минеральные удобрения порядка 1 т/га, что позволило покрыть дефицит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетних исследований показали, что решающим фактором в технологиях возделывания озимой пшеницы является уровень минерального питания. Стабилизация урожайности озимой пшеницы существенно возрасла,

независимо от метеорологических условий, при применении интенсивной глубокой системы обработки почвы и высокого фона питания. Но в годы с достаточным количеством осадков преимущество имела традиционная технология возделывания озимой пшеницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земледелие: учебник / Под ред. Баздырева Г.И. М.: Колос, 2008. 416 с.
2. Матюк Н.С., Шевченко В.А. Баланс азота, фосфора и калия в зернопропашном севообороте // Докл. РАСХН. 2003. № 6. С. 19–22.
3. Беленков А.И., Железова С.В., Березовский Е.В., Мазиров М.А. Элементы технологии точного земледелия в полевом опыте РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева // Изв. ТСХА. 2011. Вып. 6. С. 90–100.
4. Беленков А.И., Полин В.Д., Железова С.В. Результаты полевого опыта Центра точного земледелия РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева // Нивы России. 2018. № 5 (160). С. 42–57.
5. Belenkov A., Mazirov M., Arefieva V. Theoretical and practical aspects of basic soil treatment in the conditions of modern soil management systems in Russia // Euras. J. Soil Sci. 2018. № 7(4). P. 300–307.
6. Беленков А.И., Березовский Е.В., Железова С.В. Совершенствование технологии возделывания картофеля в системе точного земледелия // Картофель и овощи. 2019. № 6. С. 30–34.
7. Малахов Н.В. Эффективность разноглубинной заделки пожнивного сидерата и соломы в повышении плодородия почвы и продуктивности севооборота в ЦР НЧЗ: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2019. 22 с.

Influence of Fertilizers and Soil Treatment Methods on Nitrogen Removal by Winter Wheat and Crop Rotation Crops

V. A. Shevchenko^a and A. I. Belenkov^{a, #}

^a Russian State Agrarian University–K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127550, Russia

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

The results of many years of research have shown that the decisive factor in the cultivation of winter wheat is the level of mineral nutrition, and when using an intensive deep system of soil treatment and a high background of nutrition, the crop yield increased. In years with sufficient precipitation, the traditional technology of winter wheat cultivation had an advantage. The individual elements of biological agriculture in a field experiment of Center for precision agriculture associated with conducting crop sowing of mustard for green manure after harvest of winter wheat for the crop of potatoes next year, post-harvest straw of winter wheat and barley, incorporation into the soil of crop residues of all crops grain crop rotation.

Key words: crop rotation, nitrogen fertilizers, nitrogen balance, nitrogen utilization coefficients, sod-podzolic soil, grain crop rotation, plant residues, siderate, intake and removal of nutrition elements.

УДК 631.417:631.445.41

ВЛИЯНИЕ ПРИЕМА БИОЛОГИЗАЦИИ НА БИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО

© 2020 г. Н. А. Чуян^{1,*}, Г. М. Брескина¹

¹ Курский федеральный аграрный научный центр
305021 Курск, ул. К. Маркса, 70б, Россия

*E-mail: Chuyan.6546@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.

После доработки 22.01.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Выявили эффективность использования побочной продукции культур на удобрение после предварительной поверхностной (8–10 см) заделки ее на поле в условиях зернопропашного севооборота сахарная свекла – ячмень – горох – озимая пшеница на черноземе типичном Курской обл. Дана оценка биологического состояния почвы при внесении растительных остатков в комплексе с различными дозами минеральных удобрений и извести (средние дозы N170P210K210 за севооборот и одинарная доза извести – 50 кг CaCO₃/т соломы). Прием положительно влиял на увеличение содержания углерода микробной биомассы и приводил к интенсивному росту целлюлозолитической активности почвы.

Ключевые слова: побочная продукция, минеральные удобрения, известь, целлюлозолитическая активность, микробная биомасса.

DOI: 10.31857/S0002188120090033

В настоящее время дозы внесения органических удобрений в переводе на подстилочный навоз составляют 1.1–1.2 т/га (не более 12–15% обеспеченности) [1]. Наряду с этим за последние десятилетия практически прекращена добыча торфа и сапропелей, из которых ранее производили ценные в агрономическом отношении компосты. В этих условиях для решения проблемы биологизации земледелия целесообразно полнее использовать все возможные источники органических веществ, в том числе солому, сидераты и т.п. [2].

В последние годы возрастает интерес к использованию на удобрение растительных остатков сельскохозяйственных культур, которые служат основным доступным энергетическим материалом, источником углерода и биогенных элементов, поэтому являются основным фактором, регулирующим микробиологическую деятельность в почвах [3–6]. Любые быстро и медленно разлагающиеся материалы, включая солому зерновых культур, благоприятствуют процессу обогащения почвы активным органическим веществом, используемым микроорганизмами, и повышению биологической активности почвы [7].

В литературе имеется недостаточное количество экспериментальных данных длительных опытов, позволяющих выявить изменения микробиологических процессов в динамике при многократном внесении соломы. Отсутствуют данные полевых опытов с чередованием соломы различных культур в условиях воздействия агротехнических нагрузок на биологические процессы в почве. Поэтому исследования, направленные на повышение эффективности использования побочной продукции культур на удобрение и определение оптимального уровня комплексного сочетания приема биологизации с агротехническими приемами, максимально влияющего на биологическую активность почвы, являются актуальными в условиях интенсификации сельскохозяйственного производства и сохранения устойчивости агроэкосистем.

Поскольку органические вещества в почве трансформируются и используются микроорганизмами, можно говорить о биологическом качестве почвенного органического вещества (ПОВ) [8]. Биологическое качество ПОВ в наиболее полном виде характеризует его активный биологически трансформируемый пул [9, 10]. Для оценки

состояния ПОВ важно знать содержание микробной биомассы почвы [11], т.к. микробный компонент почвы является важной функциональной частью почвенного органического углерода и характеризует степень биогенности почвы [12–14].

Кроме того, микробное сообщество почв в силу своей высокой чувствительности, реактивности и набору специализированных экологических групп позволяет быстро регистрировать изменения и характеристику среды в результате антропогенных влияний [15, 16], что дает возможность использовать их в качестве эффективных биоиндикаторов происходящих в почве процессов.

Наиболее активное разложение соломы идет в верхнем слое 0–10 см почвы, о чем свидетельствует ее связь с целлюлозолитическими микроорганизмами [17], т.к. к важнейшим, в том числе по массе, компонентам растительных остатков относится целлюлоза [18]. Как один из показателей биологической активности, целлюлозолитическая активность почвы может служить характеристикой трансформации органического вещества, вовлечения труднодоступных форм углерода в биологический круговорот и в конечном итоге определяет уровень почвенного плодородия и продуктивности биоты [19].

Закономерности функционирования микробного сообщества при разложении соломы остаются мало изученными [12], что связано с полифункциональностью микроорганизмов. Кроме того, на состав биологического комплекса реагирует и степень агротехнических нагрузок, что неоднозначно сказывается на содержании углерода микробной биомассы и интенсивность целлюлозоразрушающей активности.

Цель работы – оценка биологического качества чернозема типичного при использовании приема биологизации (соблюдение технологии поверхностной заделки побочной продукции сельскохозяйственных культур зернопропашного севооборота на удобрение) при разных уровнях удобренности (внесения различных доз минеральных удобрений и извести).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения исследования по изучению содержания углерода микробной биомассы и целлюлозолитической активности чернозема типичного был заложен полевой мелкоделяночный опыт (2006–2009 гг.), расположенный на опытном поле Курского федерального аграрного научного центра в Медвенском р-не Курской обл. на водораздельном плато. Почвенный покров участка представлен черноземом типичным малогу-

мусным тяжелосуглинистым на карбонатном лессовидном суглинке. Содержание гумуса – 5.34–5.56%, обменно-поглощенного кальция – 26.0–28.6 мг-экв/100 г почвы. Реакция среды – нейтральная или близкая к нейтральной: pH_{H_2O} составил 6.6–7.5, pH_{KCl} – 6.1–7.2, гидролитическая кислотность – 0.42–1.94 мг-экв/100 г почвы.

Анализ биологических показателей был проведен в севообороте сахарная свекла – ячмень – горох – озимая пшеница на фоне внесения побочной продукции с различными дозами минеральных удобрений и извести. Полнофакторная схема опыта включала 3 уровня доз извести (0, 1, 2) и 4 уровня доз минеральных удобрений (0, 1, 2, 3). Те же дозы минеральных удобрений и извести изучали параллельно и на фоне внесения растительных остатков. Одинарная доза минеральных удобрений под сахарную свеклу – N90P90K90, ячмень и озимую пшеницу – N40P40K40, горох – P40K40, одинарная доза извести – 0.15 т/га. Количество использованной на удобрение побочной продукции (соломы и ботвы) строго дозировали: сухое органическое вещество – 2 т/га (солома 3 т/га + ботва 15 т/га). Таким образом, сочетанию с одинарными и двойными дозами извести соответствовали соотношения 50 : 10 и 100 : 20 кг извести на 1 т соломы/ботвы. Общая площадь делянок – 20 м², учетная для культур сплошного сева – 11 м², для сахарной свеклы – 5.4 м², повторность четырехкратная, размещение делянок систематическое. Минеральные удобрения и известь вносили вручную.

Представленную схему опыта осуществляли на фоне основной обработки почвы – вспашки, для озимой пшеницы – поверхностной обработки, совмещенной с предпосевной. Побочную продукцию заделывали на глубину основной обработки почвы только после поверхностного компостирования на поле по технологии, разработанной в нашем центре [20].

Для выполнения поставленных задач были проведены полевые и лабораторно-аналитические исследования с использованием различных методов анализа. Образцы почв на определение микробной биомассы (МБ) отбирали на глубине пахотного слоя (0–20 см) в 2 срока: в период вегетации культур севооборота и в период их уборки. Для проведения анализа целлюлозолитической активности почвы на глубине пахотного слоя были заложены образцы хлопчатобумажной ткани, предварительно взвешенные и подготовленные в соответствии с методикой. Закладку полотен производили в 2 срока: после посева культур и перед

уборкой культур с экспозицией 1 мес. Представлены средние результаты данного показателя.

Лабораторно-аналитические исследования проводили по общепринятым рекомендованным методикам: определение микробной биомассы (МБ) в свежих почвенных образцах – регидратационным методом [21], целлюлозлитической активности почвы (ЦА) – по степени разложения хлопчатобумажной ткани (РТ) [22].

Экспериментальные данные обработаны методами дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализов с использованием программных средств Microsoft office EXCEL, STATISTIKA, STATGRAF.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микробная биомасса почвы является интегральной характеристикой качества почвы [23]. Изменения микробной биомассы почвы важны для заблаговременного прогнозирования влияния различных агротехнологий на содержание органического вещества. При относительно невысокой доле углерода микробной биомассы в общем содержании почвенного органического вещества (1–6%), она является источником формирования гумусовых веществ, поэтому может служить важным параметром, характеризующим биологическое состояние почв [24].

Установлено, что для поддержания стабильного и более высокого уровня биологических показателей почвы необходимо регулярное внесение соломы зерновых и зернобобовых культур в сочетании со средними дозами минеральных удобрений [25]. Согласно данным [26], поступление растительных остатков в почву сопровождалось ростом микробной биомассы в среднем на 30–65%. В исследовании [27] содержание микробной биомассы (МБ) при внесении соломы озимой пшеницы было в 1.2 раза больше контроля без удобрений. В работе [24] отмечено, что если минеральные удобрения вносили без соломы, то они не оказывали положительного влияния на содержание углерода МБ.

Показано, что использование соломы злаковых культур под сахарную свеклу совместно с различными дозами минеральных удобрений и известняковой муки обеспечило накопление наибольшего количества микробной биомассы во все сроки наблюдений при внесении низкой дозы извести (50 кг/т соломы) как отдельно, так и совместно со средней дозой минеральных удобрений N90P90K90 (табл. 1).

В вариантах с внесением повышенных (N180P180K180) и высоких (N270P270K270) доз минеральных удобрений количество МБ снижалось не только на фоне без внесения извести, но и при ее внесении в дозе и 50 и 100 кг/т соломы. При применении максимальной дозы азотного удобрения отмечено уменьшение эффективности использования микроорганизмами питательного субстрата в условиях несбалансированного питания, что снижало рост запасов углерода биомассы [28]. Это свидетельствовало о том, что при интенсификации процесса поверхностного компостирования соломы озимой пшеницы необходимо создавать благоприятные условия для развития микроорганизмов, участвующих в процессе трансформации энергии органического вещества, ограничиваясь средними дозами минеральных удобрений с низкой дозой извести.

Содержание микробной биомассы при использовании ботвы сахарной свеклы под ячменем было больше во всех вариантах внесения минеральных удобрений и извести, чем в тех же вариантах, но без внесения ботвы сахарной свеклы (на 40–240 мг/кг почвы или на 5–33% на фоне извести и на 3–17% на фоне без извести).

На активность микробиологических процессов влияют агрометеорологические условия вегетационного периода, особенно влагообеспеченность почвы [29]. Если учесть, что вегетационный период был жарким и сухим, то к уборке ячменя количество МБ в почве заметно уменьшилось и на фоне внесения растительных остатков с известью (с 728–967 до 393–528 мг/кг), и на фоне без внесения извести (с 697–884 до 333–499 мг/кг). Но закономерность оставалась той же: при внесении ботвы сахарной свеклы содержание МБ практически во всех удобренных вариантах с известью было больше на 11–21%, без внесения извести – на 10–14% по сравнению с фоном без растительных остатков. Это свидетельствовало о полезном влиянии растительных остатков на микроорганизмы почвы, несмотря на значительную антропогенную нагрузку (применение сельскохозяйственной техники и минеральных удобрений).

Результаты исследования [30] показали, что в период вегетации растений (с начала июня до начала августа) происходило закономерное увеличение содержания углерода микробной биомассы в слое 0–10 см почвы в среднем во всех вариантах опыта с 202 до 853 кг С/га в зернотравяном севообороте при внесении минеральных удобрений. Величина содержания МБ в период созревания гороха и его уборки свидетельствовала (табл. 1), что интенсивность накопления МБ при поверх-

Таблица 1. Влияние минеральных удобрений и извести при поверхностном компостировании (ПК) растительных остатков (РО) на содержание микробной биомассы в зернопропашном севообороте

Вариант	Микробная биомасса, мг/кг													
	Сахарная свекла		Ячмень				Горох				Озимая пшеница			
	вегетация	уборка	вегетация		уборка		вегетация		уборка		вегетация		уборка	
	РО		РО	без РО	РО	без РО	РО	без РО	РО	без РО	РО	без РО	РО	без РО
Контроль (без удобрений)	511	263	846	843	229	248	308	460	261	260	636	666	696	663
ПК РО 9/15* т/га (фон 1)	624	291	852	884	345	312	462	426	373	259	750	700	883	637
Фон 1 + N170P170K170**	989	312	915	780	372	337	452	437	434	273	784	752	881	762
Фон 1 + N340P340K340	874	298	718	697	416	364	447	380	473	285	693	754	857	778
Фон 1 + N510P630K630	833	327	728	780	386	362	756	708	586	337	706	720	936	757
ПК РО 9/15 т/га + известь 50 кг/т *** (фон 2)	1206	543	811	804	472	424	899	699	616	405	728	720	920	722
Фон 2 + N170P210K210	1052	493	853	780	502	499	766	439	632	544	765	715	934	785
Фон 2 + N340P420K420	837	416	936	896	528	437	706	646	685	591	683	754	868	704
Фон 2 + N510P630K630	986	387	926	926	478	333	551	501	643	597	759	741	903	782
ПК РО 9/15 т/га + известь 100 кг/т (фон 3)	768	416	801	802	393	354	585	337	693	664	772	792	929	799
Фон 3 + N170P210K210	971	372	811	751	416	415	533	358	675	508	699	680	950	812
Фон 3 + N340P420K420	896	368	967	727	456	439	806	581	655	585	682	750	894	815
Фон 3 + N510P630K630	736	284	905	842	412	408	580	570	680	536	768	720	982	809
НСР ₀₅ фактор А****			59		33		82		66		25		39	
фактор В			68		38		94		76		28		45	
фактор С			48		27		67		54		20		32	

*Над чертой – количество соломы за севооборот, под чертой – количество ботвы.

**Количество минеральных удобрений за севооборот.

***Количество извести за севооборот.

****Факторы: А – известь, В – минеральные удобрения, С – растительные остатки (период вегетации и уборки).

ностной заделке соломы ячменя была значительно больше во всех вариантах внесения минеральных удобрений и извести, чем без внесения соломы. Это превышение в период созревания гороха было максимальным при поверхностном компостировании соломы с фосфорно-калийными удобрениями в дозе Р40К40 совместно с известью в дозе 50 кг/т соломы (74 и 77% соответственно).

В период уборки гороха максимальное содержание МБ было при внесении полного минерального, фосфорно-калийного удобрения без извести и превышало фон без соломы на 59–74%. В остальных вариантах внесения удобрений и извести увеличение микробной биомассы меня-

лось, но было достоверным. В период уборки отмечено практически одинаковое содержание микробной биомассы во всех вариантах применения фосфорно-калийных удобрений и обеих доз извести с соломой ячменя (616–685 и 693–655 мг/кг почвы).

В период вегетации озимой пшеницы после гороха содержание МБ после применения растительных остатков, минеральных удобрений и извести в отдельных вариантах было более низким, чем в вариантах внесения минеральных удобрений и извести без соломы (варианты 4, 5, 8, 10, 12). При этом снижение содержания МБ было неодинаковым и изменялось от 14 до 71 мг/кг (от 2

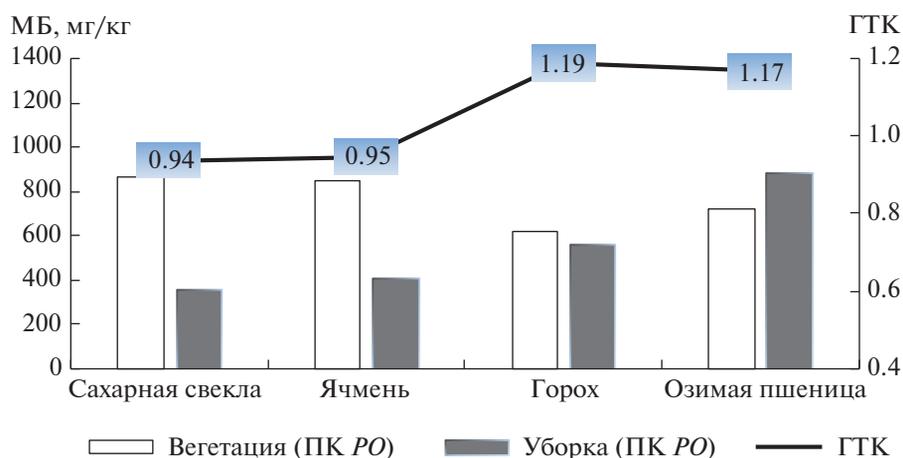


Рис. 1. Различия МБ почвы под культурами севооборота в зависимости от сроков отбора проб и гидротермических условий.

до 9%), и какой-либо закономерности выявить не удалось, что могло быть связано с резкими изменениями погоды (изменения температуры воздуха составляли до 20°C в отсутствии осадков).

Но к периоду уборки накопление МБ стабилизировалось, улучшились условия увлажнения, и солома гороха стала энергетическим материалом для микробиоты, что и отразилось на содержании микробной биомассы. При применении соломы гороха содержание микробной биомассы стало больше во всех вариантах внесения минеральных удобрений и извести по сравнению с фоном без соломы. В опыте [25] с внесением соломы наблюдали увеличение содержания углерода микробной биомассы до 6.2–6.5%, что было обусловлено более высокой обеспеченностью почвы легкоразлагаемыми биологически доступными фракциями органического вещества после применения соломы зерновых и зернобобовых культур севооборота на удобрение и свидетельствовало об иммобилизации углерода.

Для формирования урожая озимой пшеницы, вероятно, большое влияние оказало содержание микробной биомассы в период вегетации культуры. Поэтому и урожайность озимой пшеницы в вариантах внесения минеральных удобрений и соломы гороха с известью в дозе 100 кг/т была несколько больше, чем в тех же вариантах применения минеральных удобрений и извести без соломы.

На основе экспериментального материала было установлено, что содержание МБ в черноземе под разными культурами и в разные сроки (в среднем в опыте) подчинялось следующим закономерностям: 1 – величины содержания МБ под культурами в целом зависели от качества внесенных под них растительных остатков (соломы яч-

меня – С : N = 90, гороха – С : N = 22 и озимой пшеницы – С : N = 100) [31], 2 – содержание МБ в период уборки культур и его различия между сроками отбора зависели от погодных условий учетного периода, оцененные в данном случае гидротермическим коэффициентом по Селянинову. Например, в засушливых условиях вегетационного периода ячменя (ГТК = 0.95) отмечено снижение микробной биомассы к уборке культур в 2 раза (рис. 1).

Характер влияния агротехнических факторов (внесения растительных остатков, извести и минеральных удобрений) на содержание микробной биомассы в почве был одинаковым для зерновых культур зернопропашного севооборота. При поверхностной заделке побочной продукции наблюдали увеличение содержания МБ в течение вегетации культур в среднем на 50 мг/кг (8%), при уборке – на 100 мг/кг (19%) по сравнению с фоном без поверхностной заделки растительных остатков.

Сочетание известкования с минеральными удобрениями повышало МБ во время вегетации культур на 100 мг/кг (15%), как на фоне внесения побочной продукции на удобрение, так и без него. В период уборки культур положительный эффект от сочетания известкования с минеральными удобрениями, как при заделке растительных остатков, так и без нее, показатель МБ составил 200 мг/кг (увеличение на 40–50%). При этом характер нелинейной зависимости указывал на то, что при поверхностном компостировании растительных остатков (ПК РО) повышенные дозы минеральных удобрений не показали депрессирующего действия на МБ, как в случае без внесения растительных остатков [32] (рис. 2).

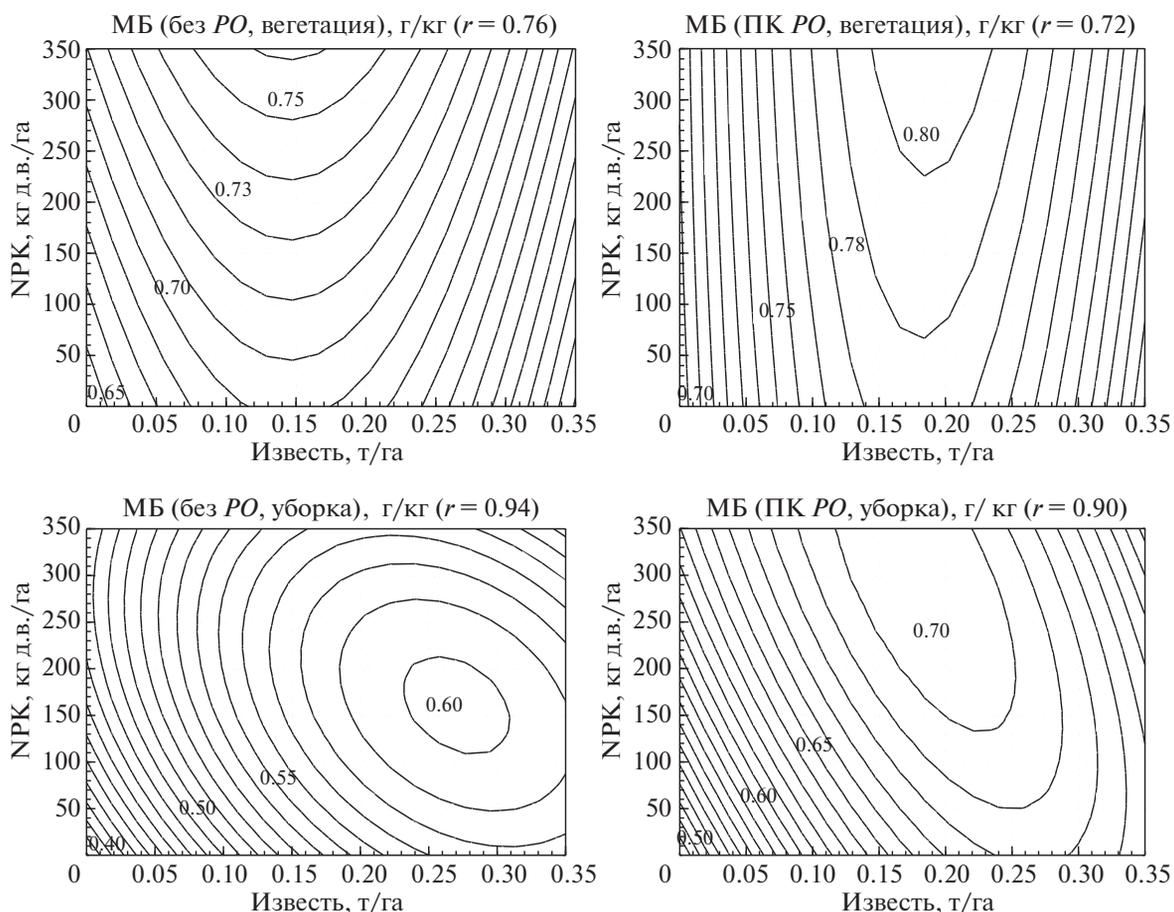


Рис. 2. Зависимость содержания микробной биомассы почвы (МБ, мг/кг) в посевах зерновых культур от минеральных удобрений, известкования и поверхностного компостирования растительных остатков (ПК РО) в периоды вегетации и уборки культур севооборота.

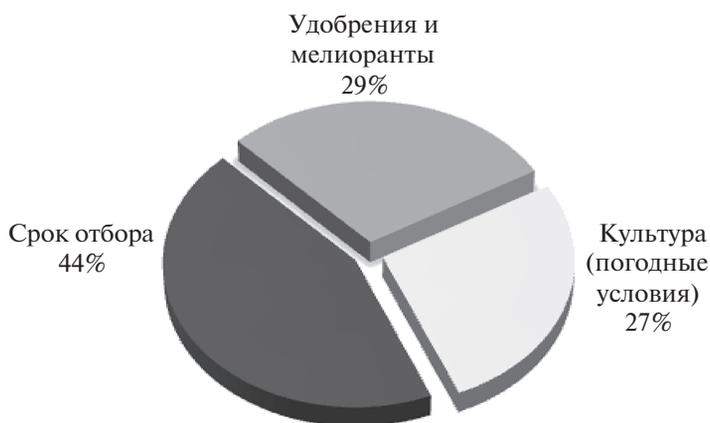


Рис. 3. Доля вклада агрогенных факторов в варьирование содержания микробной биомассы в черноземе типичном.

Данные, полученные при дисперсионном анализе, показали, что под посевами ячменя, гороха и озимой пшеницы наибольший эффект в варьирование содержания микробной биомассы в почве оказал срок отбора (44%), а влияние культуры

и удобрений было примерно равным (27 и 29% соответственно) (рис. 3).

Добавкой азота часто стимулируют минерализацию в достаточной степени доступных соединений углерода растительных остатков, бедных

Таблица 2. Изменение целлюлозолитической активности (ЦА) с известью и минеральными удобрениями в опыте с растительными остатками и без них, %

Известь, т/га	NPK, кг д.в./га	ЦА, %		Изменения ЦА, %		
		без PO	PO	без PO	PO	от PO
0	0	20.8	43.5	—	—	22.7
0	150	36.6	44.8	15.8	1.3	8.2
0	300	28.1	46.4	7.3	2.9	18.3
0	435	34.1	41.1	13.3	−2.4	7.0
0.15	0	31.2	48.9	10.4	5.4	17.7
0.15	150	33.4	49	12.6	5.5	15.6
0.15	300	30.0	46.4	9.2	2.9	16.4
0.15	435	30.5	45.0	9.7	1.5	14.5
0.3	0	26.8	42.7	6.0	−0.8	15.9
0.3	150	24.2	38.2	3.4	−5.3	14.0
0.3	300	23.6	37.4	2.8	−6.1	13.8
0.3	435	32.5	44.1	11.7	0.64	11.6
Среднее		29.3	44.0	—	—	15.0
HCP ₀₅				4.2	3.3	3.8

азотом, с широким отношением С : N, таких как например, целлюлоза, в то же время разложение лигнина замедляется из-за подавления активности некоторых лигнинлитических микроорганизмов в присутствии неорганического азота [14]. Поэтому важным в регулировании биологического процесса является изучение интенсивности целлюлозоразлагающей способности почвы в зависимости от величины доз примененных минеральных удобрений.

Биологическая активность почвы под сахарной свеклой, определенная методом аппликаций, как и содержание микробной биомассы, была максимальной при внесении низкой дозы извести как с минеральными удобрениями в средней дозе (NPK)90, так и без них.

При использовании ботвы сахарной свеклы под ячмень биологическая активность почвы также была больше практически при применении всех доз минеральных удобрений и извести по сравнению с фоном без ботвы. Интенсивность разложения хлопчатобумажной ткани при заделке ботвы сахарной свеклы составила 0.33–0.48%/сут, без ботвы — 0.18–0.36%/сут в зависимости от доз минеральных удобрений и извести.

Более высокая биологическая активность почвы при использовании растительных остатков в качестве органических удобрений в основном и позволила получить более высокую урожайность

зерна ячменя при поверхностном компостировании ботвы сахарной свеклы.

Целлюлозолитическая активность почвы под посевом гороха при использовании соломы ячменя так же, как и под посевом ячменя была больше во всех вариантах применения минеральных (фосфорно-калийных) удобрений и извести по сравнению с такими же вариантами без соломы ячменя и по степени разложения хлопчатобумажной ткани характеризовалась как сильная [33]. В тех же вариантах применения минеральных удобрений и извести, но без заделки соломы ячменя, биологическая активность почвы характеризовалась как средняя. Показатель целлюлозолитической активности при поверхностном компостировании соломы в основном составил 50.9–72.4, без соломы — 41.1–47.3%.

Интенсивность разложения хлопчатобумажной ткани в вариантах поверхностного компостирования соломы ячменя составляла 0.75–1.42%/сут, без соломы — 0.55–1.13%/сут в зависимости от доз фосфорно-калийных удобрений и извести, и была больше на фоне компостирования соломы в 1.2–1.4 раза.

В отличие от предыдущих культур биологическая активность почвы под озимой пшеницей была слабой (целлюлозолитическая активность за период вегетации была <30%) во всех вариантах применения удобрений и извести и с соломой гороха, и без нее. Но все же при использовании соломы гороха она была больше во всех вариантах, за исключением вариантов с внесением высокой дозы удобрений с известью в дозе 100 кг/т, где интенсивность разложения ткани была равной и при применении соломы, и без соломы, что составило 0.30 и 0.31%/сут соответственно.

Самая высокая степень биологической активности в период вегетации отмечена в вариантах внесения соломы гороха с минеральными удобрениями в средней дозе (NPK)40 в сочетании с известью в обеих дозах. Интенсивность разложения хлопчатобумажной ткани в этом случае составила 0.40 и 0.39%/сут и была больше, чем в соответствующих вариантах без соломы на 0.08–0.10% (на 25 и 35%) соответственно.

Активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов, определяемая степенью разложения хлопчатобумажной ткани, в нашем опыте без растительных остатков варьировала в различно удобренных вариантах от 21 до 37%, на фоне ПК PO — от 37 до 49%. В среднем при применении растительных остатков степень разложения ткани возрастала на 15% (табл. 2), что было обусловлено более благоприятными условиями для питания,

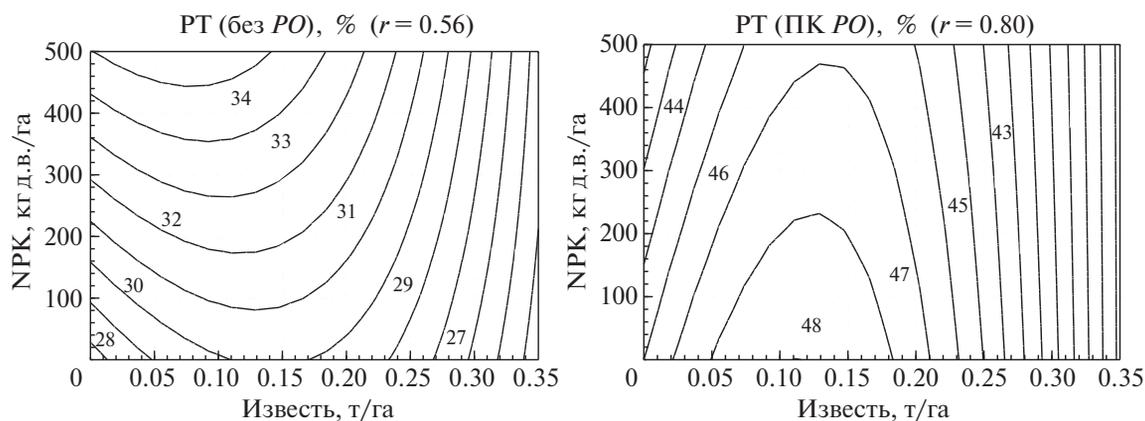


Рис. 4. Зависимость степени разложения ткани в почве от доз извести и минеральных удобрений при поверхностном компостировании растительных остатков и без него.

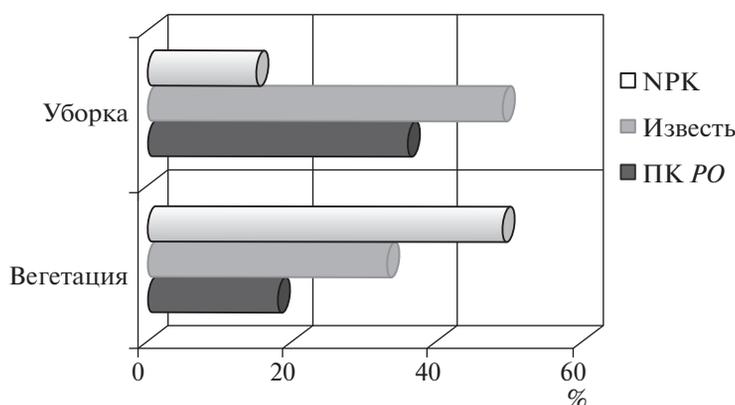


Рис. 5. Доля вклада агрогенных факторов в варьирование содержания микробной биомассы в черноземе типичном (для зерновых культур) в зависимости от сроков отбора проб.

активной жизни и размножения микроорганизмов [34].

В варианте применения соломы в комбинации с минеральными удобрениями наблюдали увеличение целлюлозоразлагающей способности в 1.4 и 2.2 раза по сравнению с вариантами удобрений и без удобрений соответственно [25]. Применение системы удобрения с использованием соломы [35] привело к увеличению микробиологической активности почвы, что позволило увеличить степень разложения льняного полотна на 6.1% по сравнению с контролем. По результатам статистической обработки выявлена тесная связь интенсивности разложения ткани в поверхностном слое почвы от исследованных факторов ($r = 0.86$).

В целом в опыте степень разложения хлопчатобумажной ткани (РТ, %) повышалась от одинарных доз извести как при внесении растительных остатков, так и без них. Характер действия минеральных удобрений был различным: без рас-

тительных остатков наблюдали повышение целлюлолитической активности, при ПК PO минеральные удобрения вызвали некоторое ее снижение (рис. 4).

При оценке использованных агротехнических приемов на содержание и варьирование МБ в черноземе под зерновыми культурами было установлено, что в период вегетации культур наибольший эффект имели минеральные удобрения, к периоду уборки – известкование и растительные остатки (рис. 5). Наибольшая доля вклада в варьировании целлюлолитической активности была у побочной продукции – 80% (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Внесение побочной продукции с минеральными удобрениями снимало отрицательное влияние повышенных и высоких доз минеральных удобрений на показатели биологического каче-

Таблица 3. Доли вклада различных факторов в варьирование показателей биогенности почвы

Показатель	Факторы			Общий вклад, (R^2 , %)
	побочная продукция	известь	минеральные удобрения	
C_{MB} (период вегетации)	18	33	49	52
C_{MB} (период уборки)	35	50	15	90
ЦА	80	5	15	76

ства почвы: возрастало содержание микробной биомассы в среднем на 8–19% в зависимости от доз минеральных удобрений, увеличивалась целлюлолитическая активность почвы на 15%, при этом средние дозы удобрений способствовали некоторому росту биологической активности, а высокие дозы минеральных удобрений имели депрессирующий эффект.

2. Поверхностное компостирование растительных остатков предыдущей культуры севооборота способствовало максимальному улучшению биологических свойств почвы (увеличению содержания микробной массы, интенсивности целлюлолитической активности) только при внесении средних доз (N170P210K210 за севооборот) минеральных удобрений в сочетании с низкой дозой извести (50 кг/т соломы и 10 кг/т ботвы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельское хозяйство России. М.: МСХ РФ, 2014. 48 с.
2. Мерзлая Г.Е. Биологические факторы в системах удобрения // Агрохимия. 2017. № 10. С. 24–36.
3. Полякова Н.В., Платоных Ю.Н., Володина Е.Н. Содержание гумуса и биологическая активность пахотных темно-серых лесных почв // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Агрохимия и экология: история и современность. Н.Новгород, 2008. С. 79.
4. Аристовская Т.В. Микробиологические аспекты плодородия почв // Почвоведение. 1988. № 9. С. 53–69.
5. Туев Н.А. Микробиологические процессы гумусообразования, М.: Агропромиздат, 1989. 108 с.
6. Семенов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические процессы растительных остатков в почве // Агрохимия. 2006. № 7. С. 63–81.
7. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
8. Basatta E., Ågren G.I. Soil organic matter quality interpreted thermodynamically // Soil Biol. Biochem. 1999. V. 31. P. 1889–1891.
9. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В. Лабораторная диагностика биологического качества органического вещества почвы // Методы исследования органического вещества почв. М.: РАСХН–ВНИПТИОУ, 2005. С. 214–230.
10. Stevenson F.J. Humus – chemistry, genesis, composition, reactions. 2nd ed., N.Y.: John Wiley Sons, 1994. 496 p.
11. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53–63.
12. Богородская А.В., Кукавская Е.А., Иванова Г.А. Трансформация микробиоценозов почв светлых лесов нижнего Приангарья под воздействием рубок и пожаров // Почвоведение. 2014. № 3. С. 317–326.
13. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Микробная биомасса как ключевой компонент органического вещества почвы и чувствительный индикатор его качества // Почвенно-земельные ресурсы, оценка, устойчивое использование, геоинформационное обеспечение. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., 6–8 июня, 2012.
14. Liang C., Cheng G., Wixon D.L., Balsler T.C. An absorbing Markov Chain approach to understanding the microbial role in soil carbon stabilization // Biogeochemistry. 2011. V. 106. P. 303–309.
15. Анянueva Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 222 с.
16. Сорокин Н.Д. Микробиологическая диагностика лесорастительного состояния почв Средней Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 222 с.
17. Орлова О.В., Андронов Е.Е., Воробьев Н.И., Колодяжный А.Ю., Москалевская Ю.П., Патыка Н.В., Свиридова О.В. Состав и функционирование микробного сообщества при разложении соломы злаковых культур в дерново-подзолистой почве // Сел.-хоз. биол. 2015. Т. 50. № 3. С. 305–314.
18. Чирак Е.Л., Орлова О.В., Аксенова Т.С., Кичко А.А., Чирак Е.Р., Проворов Н.А., Андронов Е.Е. Динамика микробного сообщества типичного чернозема при биодegradации целлюлозы и соломы ячменя // Сел.-хоз. биол. 2017, Т. 52. № 3. С. 588–596.
19. Ермолаев В.П., Ширмова Л.Г., Медведева И.Ф., Быховец С.С. Динамика целлюлолитической активности серой лесной почвы под сеяным лугом различного режима использования // Почвоведение. 1991. № 1. С. 59–67.
20. Технология эффективного использования растительных остатков как органических удобрений на черноземах Лесостепи ЦЧЗ. Курск, 2005. 20 с.

21. *Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Горбенко А.Ю., Панников Н.С.* Регидратационный метод определения биомассы микроорганизмов почвы // Почвоведение. 1987. № 4. С. 64–71.
22. *Мишустин Е.В., Востров И.П., Петров А.Н.* Методика определения целлюлозоразрушающей активности почвы. М.: Наука, 1987. 375 с.
23. *Stockdale E.A., Brookes P.S.* Detection and quantification of the soil microbial biomass – impacts on the management of agricultural soils // J. Agricult. Sci. 2006. V. 144. P. 285–302.
24. *Fliebach A., Mader P.* Microbial biomass and sizedensity fractions differ between soils of organic and conventional agricultural systems // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32. Iss. 1.6. P. 757–768.
25. *Русакова И.В.* Влияние длительного применения соломы и минеральных удобрений на биологические свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2017. № 8. С. 16–24.
26. *Семенов В.М., Ходжаева А.К.* Агроэкологические функции растительных остатков в почве // Агрохимия. 2006. № 7. С. 63–81.
27. *Масютенко Н.П., Брескина Г.М., Чуян Н.А.* Биологическая активность чернозема и урожай сахарной свеклы при внесении минеральных удобрений, извести и соломы // Плодородие. 2009. № 4. С. 28–30.
28. *Евдокимов Е.В., Благодатский С.А., Ларионова А.А., Розонова Л.Н., Орлинский Д.Б., Кудяров В.Н.* Скорость оборачиваемости микробной биомассы в почве в зависимости от доз азотного удобрения // Агрохимия. 1991. № 12. С. 49–56.
29. *Юмашев Х.С., Захарова И.А.* Микробиологическая активность выщелоченного чернозема при различных способах утилизации соломы // Плодородие. 2018. № 2. С. 33–35.
30. *Благодатский С.А., Паников Н.С., Самойлов Т.И.* Влияние агротехнических приемов на динамику запасов микробного азота в серой лесной почве // Почвоведение. 1989. № 2. С. 52–60.
31. Регулирование энергетического состояния черноземов лесостепи ЦЧЗ при использовании растительных остатков как органических удобрений (научно-практ. рекоменд.). Курск, 2006. 45 с.
32. *Чуян Н.А.* Регулирование плодородия чернозема типичного при использовании побочной продукции в условиях лесостепи ЦЧЗ: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Курск, 2010. 42 с.
33. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 319 с.
34. *Куракова А.В., Прохоров И.С., Костина Н.В., Мохова Е.Г., Садыкова В.С.* Стимуляция грибами азотфиксации в дерново-подзолистых почвах // Почвоведение. 2006. № 9. С. 1075–1081.
35. *Хисамова К.Ч., Куликова А.Х.* Влияние системы удобрения с использованием соломы на биологическую активность почвы и урожай ячменя // Агротех. вестн. 2015. № 1. С. 35–37.

Estimation of Biological Quality of Organic Matter of Typical Chernozem while Using a Greening Practice

N. A. Chuyan^{a,*} and G. M. Breskina^a

^a*Kursk Federal Agricultural Research Center
ul. K. Marxa 70b, Kursk 305021, Russia*

^{*}*E-mail: Chuyan.6546@yandex.ru*

The effectiveness of using by – products of crops for fertilizer after preliminary surface (8–10 cm) sealing it in the field in the conditions of grain crop rotation sugar beet – barley – peas-winter wheat on the typical Chernozem of the Kursk region was revealed. The assessment of the biological state of the soil when applying plant residues in combination with various doses of mineral fertilizers and lime (average doses of N170P210K210 for crop rotation and a single dose of lime – 50 kg CaCO₃/t of straw) is given. Reception had a positive effect on increasing the carbon content of microbial biomass and led to an intensive increase in the cellulolytic activity of the soil.

Key words: by-products, mineral fertilizers, lime, cellulolytic activity, microbial biomass.

УДК 631.82:633.15:631.445

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ И ВЫНОС ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

© 2020 г. А. В. Сидоров¹, А. А. Моисеев², А. В. Ивойлов^{2,*}

¹ Государственный Центр агрохимической службы “Мордовский”
430904 Саранск, п/о Ялга, ул. Пионерская, 35, Россия

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
430005 Саранск, ул. Большевикская, 68, Россия

*E-mail: ivoilov.av@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2020 г.

После доработки 10.03.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

В краткосрочном полевом двухфакторном опыте на темно-серой лесной почве изучено влияние различных доз минеральных удобрений и густоты стояния растений кукурузы на химический состав зерна (N, P₂O₅ и K₂O), вынос основных элементов питания урожаем и их условный баланс. Установлено, что концентрация общего азота в зерне кукурузы варьировала от 0.92 до 1.47%, фосфора – от 0.11 до 0.15% и калия – от 0.32 до 0.34%. Применение под кукурузу N90 и N60–120P30K30 увеличивало количество азота в зерне на 0.23–0.31 в 2015 г., на 0.13–0.21 в 2016 г. и на 0.03–0.11 абс. % в 2017 г. Содержание фосфора и калия в зерне в среднем за 3 года достоверно не различалось в вариантах опыта. Вынос элементов питания определялся величиной урожайности зерна кукурузы и их содержанием в зерне. На неудобренном агрофоне вынос азота урожаем зерна в среднем в опыте составил 32.7, фосфора – 3.9 и калия – 9.9 кг/га. Внесение минеральных удобрений увеличивало отчуждение этих элементов на 34.5–48.4, 3.3–4.2 и 7.2–10.9 кг/га соответственно.

Ключевые слова: кукуруза (*Zea mays* L.), темно-серая лесная почва, удобрения, химический состав, вынос питательных веществ, хозяйственный баланс.

DOI: 10.31857/S0002188120090112

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического состава сельскохозяйственных растений имеет много аспектов. Кроме непосредственного влияния на показатели качества выращиваемой продукции, химический состав растений воздействует на круговорот питательных веществ в агрофитоценозах и плодородие почвы через обмен элементов в системе почва–растение [1].

Общеизвестно, что применение удобрений, оказывая влияние на режим питания растений, урожайность культур и качество продукции, может изменять и количество основных элементов питания в растениях. Исследования свидетельствуют, что содержание в зерне кукурузы сырой золы и основных элементов питания варьирует довольно в широких пределах в зависимости от почвенно-климатических условий региона, биологических особенностей возделываемых сортов и гибридов и доз вносимых макро- и микроудобрений [2–8].

Сведений о влиянии минеральных удобрений на химический состав зерна кукурузы в условиях северной части лесостепи Среднего Поволжья, где эту универсальную культуру стали выращивать по зерновой технологии лишь в последние 10 лет, крайне мало. Большинство работ по означенному вопросу выполнены в районах традиционного возделывания кукурузы на зерно. Кроме того, очень мало данных по влиянию удобрений на химический состав зерна при разной густоте стояния растений. Поэтому цель работы – изучение влияния минеральных удобрений и густоты стояния растений на химический состав зерна кукурузы и вынос элементов питания на темно-серой лесной почве региона.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Краткосрочный полевой двухфакторный опыт (3 × 5) по оценке влияния минеральных удобрений на фоне различной густоты стояния растений

Таблица 1. Содержание азота в зерне кукурузы, % на абс. сухое вещество

Густота стояния растений, (фактор А)	Удобрение (фактор Б), вариант					Средние фактора А
	без удобрений (контроль)	N90	N60P30K30	N90P30K30	N120P30K30	
2015 г.						
50 тыс./га	0.92	1.27	1.18	1.30	1.23	1.18
65 тыс./га	0.95	1.24	1.18	1.26	1.20	1.18
80 тыс./га	0.98	1.20	1.21	1.19	1.18	1.16
Средние фактора Б	0.95	1.24	1.18	1.26	1.20	1.17
HSP_{05} частных различий = 0.26 HSP_{05} фактора А = 0.04 HSP_{05} фактора Б, АБ = 0.05						
2016 г.						
50 тыс./га	1.21	1.32	1.33	1.40	1.47	1.35
65 тыс./га	1.18	1.36	1.36	1.35	1.38	1.33
80 тыс./га	1.17	1.30	1.28	1.34	1.35	1.29
Средние фактора Б	1.19	1.33	1.32	1.36	1.40	1.32
HSP_{05} частных различий = 0.05 HSP_{05} фактора А = 0.02 HSP_{05} фактора Б, АБ = 0.03						
2017 г.						
50 тыс./га	1.23	1.38	1.27	1.36	1.34	1.31
65 тыс./га	1.18	1.25	1.19	1.31	1.30	1.24
80 тыс./га	1.13	1.24	1.17	1.19	1.25	1.20
Средние фактора Б	1.18	1.29	1.21	1.29	1.29	1.25
HSP_{05} частных различий = 0.08 HSP_{05} фактора А = 0.04 HSP_{05} фактора Б, АБ = 0.04						
Среднее за 2015–2017 гг.						
50 тыс./га	1.12	1.32	1.26	1.35	1.35	1.28
65 тыс./га	1.10	1.28	1.24	1.31	1.29	1.24
80 тыс./га	1.09	1.25	1.22	1.24	1.26	1.21
Средние фактора Б	1.10	1.28	1.24	1.30	1.30	1.24
HSP_{05} частных различий = 0.09 HSP_{05} фактора А, АБ $F_{\text{факт}} < F_{05}$ HSP_{05} фактора Б = 0.05						

кукурузы на ее зерновую продуктивность и показатели качества урожая проводили в 2015–2017 гг. на территории СП “Богдановское” Старошайговского р-на Республики Мордовия. Его методика и сопутствующие условия изложены в предшествующей публикации [9]. В ходе исследования было установлено, что применение минеральных удобрений достоверно увеличивало зерновую продуктивность кукурузы в среднем за 3 года на 2.27–3.26 т/га при урожайности в контроле 2.97 т/га, изменяло показатели качества зерна. Без внесения удобрений максимальная урожайность зерна кукурузы отмечена при густоте стояния 50, при их использовании – 65 тыс. растений/га. Наибольшая в опыте окупаемость удобрений прибавкой урожая (25.2 кг зерна/кг д.в. удобрений) отмечена при использовании N90, наименьшая (18.1 кг зерна/кг д.в. удобрений) – N120P30K30.

В данной публикации приведены результаты исследования по влиянию изученных в опыте факторов на химический состав (N, P₂O₅ и K₂O) зерна кукурузы и вынос основных элементов питания урожаем зерна.

Химический состав зерна кукурузы определяли в лаборатории “Государственного центра агрохимической службы “Мордовский” по соответствующим методикам и ГОСТам. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа на персональном компьютере с применением программ прикладной статистики Stat 3 и Excel 2003.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что содержание общего азота в зерне кукурузы в среднем за 3 года составляло 1.24% с изменениями в отдельные годы и в вариантах от 0.92 до 1.47% (табл. 1). Самое низкое содержание

Таблица 2. Содержание P_2O_5 в зерне кукурузы, % на абсолютно сухое вещество

Густота стояния растений, (фактор А)	Удобрение (фактор Б), вариант					Средние фактора А
	без удобрений (контроль)	N90	N60P30K30	N90P30K30	N120P30K30	
2015 г.						
50 тыс./га	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.14
65 тыс./га	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
80 тыс./га	0.10	0.13	0.10	0.11	0.10	0.11
Средние фактора Б	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12
HSP_{05} частных различий = 0.03 HSP_{05} фактора Б = 0.02 HSP_{05} фактора А, АБ $F_{факт} < F_{05}$						
2016 г.						
50 тыс./га	0.14	0.14	0.14	0.12	0.12	0.13
65 тыс./га	0.12	0.14	0.14	0.16	0.12	0.14
80 тыс./га	0.14	0.12	0.14	0.14	0.12	0.13
Средние фактора Б	0.13	0.13	0.14	0.14	0.12	0.13
HSP_{05} частных различий = 0.02 HSP_{05} фактора А $F_{факт} < F_{05}$ HSP_{05} фактора Б, АБ = 0.01						
2017 г.						
50 тыс./га	0.13	0.12	0.16	0.14	0.13	0.14
65 тыс./га	0.14	0.15	0.14	0.13	0.15	0.14
80 тыс./га	0.13	0.16	0.14	0.16	0.12	0.14
Средние фактора Б	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14
$F_{факт} < F_{05}$						
Среднее за 2015–2017 гг.						
50 тыс./га	0.14	0.13	0.15	0.13	0.13	0.14
65 тыс./га	0.13	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13
80 тыс./га	0.12	0.14	0.13	0.14	0.11	0.13
Средние фактора Б	0.13	0.14	0.14	0.14	0.12	0.13
$F_{факт} < F_{05}$						

общего азота отмечено в 2015 г., наиболее высокое – в благоприятном по тепло- и влагообеспеченности 2016 г. Под влиянием удобрений количество азота в зерне увеличивалось в 2015 г. на 0.23–0.31, в 2016 г. – на 0.13–0.21 и в 2017 г. – на 0.03–0.11 абс. %. При этом прослежена прямая зависимость: чем выше доза азота в составе удобрений, тем больше содержание общего азота в зерне кукурузы.

Содержание общего азота в зерне кукурузы зависело и от густоты стояния растений. Например, наибольшее его количество зафиксировано при плотности посева 50 тыс. растений/га. В загущенных посевах содержание азота в среднем за 3 года снижалось на 0.04–0.07 абс. %.

Следует отметить, что полученные показатели содержания азота в зерне кукурузы были несколько меньше, чем приведенные другими исследователями. Например, в опыте [10] на черно-

земе выщелоченном в условиях Республики Татарстан содержание азота в зерне кукурузы в варианте без удобрений в среднем за 3 года варьировало от 1.53 до 1.65%, при внесении удобрений – от 1.68 до 1.86%. В исследованиях [6] на черноземе сильновыщелоченном в условиях Северного Зуралья содержание общего азота в зерне кукурузы менялось от 1.49 до 1.96%. При этом максимальное его количество отмечено в варианте с внесением удобрений на планируемую урожайность зерна 4.0 т/га (N60–110P60–80K60–80).

Содержание фосфора и калия в среднем за 3 года достоверно не различалось в вариантах опыта ($F_{факт} < F_{05}$), было относительно низким по сравнению с данными других авторов [5, 6, 10], проводивших опыты в схожих почвенно-климатических условиях, и варьировало в пределах 0.11–0.15 и 0.32–0.34% соответственно (табл. 2 и 3). В то же время в исследованиях на черноземе

Таблица 3. Содержание K_2O в зерне кукурузы, % на абс. сухое вещество

Густота стояния растений, (фактор А)	Удобрение (фактор Б), вариант					Средние фактора А
	без удобрений (контроль)	N90	N60P30K30	N90P30K30	N120P30K30	
2015 г.						
50 тыс./га	0.36	0.35	0.35	0.33	0.34	0.35
65 тыс./га	0.33	0.33	0.37	0.37	0.34	0.35
80 тыс./га	0.34	0.32	0.39	0.36	0.36	0.35
Средние фактора Б	0.35	0.33	0.37	0.35	0.35	0.35
$F_{\text{факт}} < F_{05}$						
2016 г.						
50 тыс./га	0.33	0.33	0.33	0.33	0.34	0.33
65 тыс./га	0.32	0.33	0.32	0.31	0.32	0.32
80 тыс./га	0.32	0.33	0.31	0.32	0.31	0.32
Средние фактора Б	0.32	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32
HCP_{05} частных различий = 0.008 HCP_{05} фактора А = 0.004 HCP_{05} фактора Б, АБ = 0.006						
2017 г.						
50 тыс./га	0.34	0.33	0.34	0.32	0.33	0.33
65 тыс./га	0.33	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32
80 тыс./га	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32	0.32
Средние фактора Б	0.33	0.32	0.33	0.32	0.32	0.32
HCP_{05} частных различий = 0.02 HCP_{05} фактора А = 0.01 HCP_{05} фактора Б = 0.01						
Среднее за 2015–2017 гг.						
50 тыс./га	0.34	0.34	0.34	0.33	0.34	0.34
65 тыс./га	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33
80 тыс./га	0.33	0.32	0.34	0.33	0.33	0.33
Средние фактора Б	0.33	0.33	0.34	0.33	0.33	0.33
$F_{\text{факт}} < F_{05}$						

обыкновенном Эрстовской опытной станции содержание K_2O в зерне кукурузы было таким же, как и в наших исследованиях – 0.27–0.35% в оптимальные по увлажнению и слабозасушливые годы, и 0.67% – в сильнозасушливые [11].

Внесение минеральных удобрений и различная густота стояния растений кукурузы неоднозначно влияли не только на урожайность зерна и на его химический состав, но и изменяли размеры хозяйственного выноса основных элементов питания (азота, фосфора и калия) урожаем зерна – показатели, необходимые при разработке системы удобрения под отдельные культуры. Расчеты показали, что вынос элементов питания определяется величиной урожая зерна кукурузы и их содержанием в зерне (табл. 4). На естественном агрофоне вынос азота урожаем зерна в среднем в опыте составил 32.7, фосфора – 3.9 и калия – 9.9 кг/га. Внесение минеральных удобрений уве-

личивало отчуждение этих элементов на 34.5–48.4, 3.3–4.2 и 7.2–10.9 кг/га соответственно.

В вариантах без внесения удобрений и при одностороннем использовании N90 отмечали отрицательный условный баланс P_2O_5 и K_2O при возделывании кукурузы. В то же время применение полного минерального удобрения (N60–120P30K30) обеспечивало положительный баланс фосфора и калия. Положительный условный баланс азота складывался в опыте при внесении азота >60 кг д.в./га

ВЫВОДЫ

1. Содержание общего азота в зерне кукурузы в среднем в опыте за 3 года составляло 1.24% с изменениями в отдельные годы и в вариантах от 0.92 до 1.47%. Самое низкое содержание общего азота

Таблица 4. Урожайность зерна кукурузы и условный баланс питательных веществ (средние данные за 2015–2017 гг.)

Удобрение (фактор Б)	Урожай- ность зерна	Прибавка	Вынос с урожаем зерна, кг/га			Условный баланс, кг/га		
	т/га		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
50 тыс. растений/га								
Без удобрений (контроль)	3.03	–	33.9	4.2	10.3	–33.9	–4.2	–10.3
N90	5.20	2.17	68.6	6.8	17.7	+21.4	–6.8	–17.7
N60P30K30	5.50	2.47	69.3	8.2	18.7	–9.3	+21.8	+11.3
N90P30K30	5.97	2.94	80.6	7.8	19.7	+9.4	+22.2	+10.3
N120P30K30	6.40	3.37	86.4	8.3	21.8	+33.6	+21.7	+8.2
65 тыс. растений/га								
Без удобрений (контроль)	2.97	–	32.7	3.9	9.8	–32.7	–3.9	–9.8
N90	5.35	2.38	68.5	7.5	17.1	+21.5	–7.5	–17.1
N60P30K30	5.62	2.65	69.7	7.3	18.6	–9.7	+22.7	+11.4
N90P30K30	6.14	3.17	80.4	8.6	20.3	+9.6	+21.4	+9.7
N120P30K30	6.52	3.55	84.1	8.5	21.5	+35.9	+21.5	+8.5
80 тыс. растений/га								
Без удобрений (контроль)	2.90	–	31.6	3.5	9.6	–31.6	–3.5	–9.6
N90	5.16	2.26	64.5	7.2	16.5	+25.5	–7.2	–16.5
N60P30K30	5.13	2.23	62.6	6.7	17.4	–2.6	+23.3	+12.6
N90P30K30	5.64	2.74	69.9	7.9	18.6	+20.1	+22.1	+11.4
N120P30K30	5.98	3.08	75.4	6.6	19.7	+44.6	+23.4	+10.3

отмечено в 2015 г., наиболее высокое – в благоприятном по тепло- и влагообеспеченности 2016 г.

2. При внесении под кукурузу N90 и N60–120P30K30 количество азота в зерне увеличивалось в 2015 г. на 0.23–0.31, в 2016 г. – на 0.13–0.21 и в 2017 г. – на 0.03–0.11 абс. %. При этом прослежена прямая зависимость: чем выше доза азота в составе удобрений, тем больше содержание общего азота в зерне кукурузы.

3. Содержание фосфора и калия в среднем за 3 года варьировало в пределах 0.11–0.15 и 0.32–0.34% соответственно и достоверно не различалось в вариантах опыта.

4. Величина выноса элементов питания определялась величиной урожая зерна кукурузы и их содержанием в зерне. На естественном агрофоне вынос азота урожаем зерна в среднем в опыте составил 32.7, фосфора – 3.9 и калия – 9.9 кг/га. Внесение минеральных удобрений увеличивало отчуждение этих элементов на 34.5–48.4, 3.3–4.2 и 7.2–10.9 кг/га соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение, урожай. Изд. 2-е, доп. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
2. Рымарь В.Т., Покудин Г.П., Мухина С.В. Урожайность и качество зерна кукурузы в зернопропашном севообороте // Кормопроизводство. 2000. № 8. С. 18–20.
3. Стулин А.Ф. Влияние длительного применения удобрений в бессменном посеве кукурузы на ее продуктивность и вынос элементов питания на черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2007. № 1. С. 25–30.
4. Никитишен В.И., Личко В.И. Взаимосвязи в питании кукурузы при длительном применении удобрений на серой лесной почве ополья // Агрохимия. 2014. № 12. С. 16–23.
5. Усанова З.И., Шальнов И.В., Васильев А.С. Влияние расчетных доз удобрений и густоты стояния на продуктивность кукурузы, вынос и хозяйственный баланс основных элементов питания // Земледелие. 2016. № 3. С. 23–26.
6. Еремин Д.И., Демин Е.А. Хозяйственный вынос основных элементов питания при выращивании кукурузы по зерновой технологии в лесостепной зо-

- не Зауралья // АПК России. 2017. Т. 24. № 4. С. 883–888.
7. Моисеев А.А., Ивойлов А.В., Сидоров А.В., Власов П.Н. Эффективность удобрений при возделывании кукурузы на зерно в условиях южного Нечерноземья. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. 172 с.
 8. Толорая Т.Ф., Малаканова В.П., Подлесный А.И., Ломовской Д.В., Ласкин Р.В., Пацкан В.Ю. Эффективность припосевного внесения минеральных удобрений и азотных подкормок при выращивании кукурузы // Научн. журн. КубГАУ. 2013. № 85 (01). С. 1–10. [Электр. ресурс]. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/01/pdf/43.pdf>
 9. Моисеев А.А., Ивойлов А.В., Якомаскин С.С., Сидоров А.В. Влияние минеральных удобрений и густоты стояния растений кукурузы на урожайность и качество зерна в северной части лесостепи Среднего Поволжья // Агрохимия. 2019. № 1. С. 29–35.
 10. Чекмарев П.А., Фомин В.Н., Турнин С.Л. Влияние удобрений на пищевой режим почвы и химический состав зерна гибридов кукурузы // Земледелие. 2017. № 8. С. 14–17.
 11. Крамарев С.М., Скрипник Л.Н., Усенко Ю.И., Журавель Т.А., Хорсева Л.Ю., Яковишина Т.Ф. Интенсивность поступления основных макроэлементов в растения кукурузы в онтогенезе // Агрохимия. 2002. № 12. С. 21–30.

Influence of Mineral Fertilizers on the Chemical Composition of the Corn Grain and the Takeaway of Basic Elements in the Conditions of Forest-Steppe of the Middle Volga Region

A. V. Sidorov^a, A. A. Moiseev^b, and A. V. Ivoilov^{b, #}

^a State Center of Agrochemical Service "Mordovia"
Pionerskaya ul. 35, Yalga, Saransk 430904, Russia

^b Ogarev Mordovia State University
Bolshevistskaya ul. 68, Saransk 430005, Russia

[#]E-mail: ivoilov.av@mail.ru

In a short-term field two-factor experiment on dark gray forest soil, the effect of various doses of mineral fertilizers and the density of corn plants on the chemical composition of grain (N, P₂O₅ and K₂O), the removal of the main nutrients with the crop and their conditional balance were studied. It was established that the concentration of total nitrogen in corn grain varied from 0.92 to 1.47%, phosphorus from 0.11 to 0.15, and potassium from 0.32 to 0.34%. The use of N90 and N60–120P30K30 for corn increased the amount of nitrogen in the grain by 0.23–0.31 abs. % in 2015, by 0.13–0.21 in 2016 and by 0.03–0.11 abs. % in 2017. The content of phosphorus and potassium in grain on average over 3 years did not significantly differ in the experimental variants. The removal of nutrients was determined by the yield of corn grain and their content in the grain. On a natural agricultural background, nitrogen removal with grain yield was, on average, 32.7, phosphorus – 3.9 and potassium – 9.9 kg/ha. The application of mineral fertilizers increased the alienation of these elements by 34.5–48.4, 3.3–4.2 and 7.2–10.9 kg/ha, respectively.

Key words: mayze (*Zea mays* L.), dark gray forest soil, fertilizers, chemical composition, nutrient removal, nutrient balance.

УДК 631.8:631.559:633.16(470.31)

ВЛИЯНИЕ ДОЗ И СОЧЕТАНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ И КАЧЕСТВА ЗЕРНА ПИВОВАРЕННОГО ЯЧМЕНЯ В ЦЕНТРАЛЬНОМ НЕЧЕРНОЗЕМЬЕ

© 2020 г. А. Ю. Гаврилова^{1,*}, А. М. Конова¹, Н. Е. Самсонова²

¹ Федеральный научный центр лубяных культур
214025 Смоленск, ул. Нахимова, 21, Россия

² Смоленская государственная сельскохозяйственная академия
214000 Смоленск, ул. Б. Советская, 10/2, Россия

*E-mail: augavrilova@gmail.com

Поступила в редакцию 16.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Изучали влияние различных доз и сочетаний минеральных удобрений на урожайность и качество зерна пивоваренного ярового ячменя сорта Владимир в условиях дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья. Показано, что величина урожайности и качество зерна связаны с уровнем минерального питания и с метеорологическими условиями периода вегетации культуры. Наиболее пригодное для пивоваренных целей зерно было сформировано в аномально жарком и засушливом 2010 г. (ГТК = 1.09) во всех изученных вариантах минерального питания, а также в избыточно влажном 2009 г. (ГТК = 2.39) при дозе минеральных удобрений, не превышающей N50P50K75. В годы с ГТК = 1.6–2.06 был сформирован более высокий урожай, с большей массой 1000 зерен, но по содержанию белка зерно было не пригодно для пивоварения.

Ключевые слова: яровой ячмень, минеральные удобрения, урожайность, качество зерна, дерново-подзолистая почва, Центральное Нечерноземье.

DOI: 10.31857/S0002188120090069

ВВЕДЕНИЕ

Ячмень является важной продовольственной и зернофуражной культурой многоцелевого назначения. Площадь его посевов в мире составляет ≈82 млн га, в том числе 10 млн га – в России. По данным Росстата, урожайность ячменя в России с 1991 г. выросла с 15.1 до 21.6 ц/га (2018 г.). За этот период максимальная урожайность была получена в 2017 г. – 26.2 ц/га [1].

Яровой ячмень – культура сжатого периода поглощения питательных элементов, причем поступление их в растения происходит неравномерно. Например, почти половину азота, около 1/3 фосфора и 2/3 калия от общей потребности он потребляет уже к завершению фазы кущения [2]. За месяц до созревания (в фазе колошения) корневое питание практически завершается. Это определяет высокие требования к наличию в почве достаточных запасов подвижных форм питательных элементов именно в начальные фазы роста и развития растений. В расчете на 1 т зерна с соответствующим количеством побочной про-

дукции ячмень выносит 20–28 кг азота, 7–12 кг фосфора и 11–24 кг калия, он плохо переносит кислые почвы, оптимальный уровень pH_{KCl} – 6.0–6.5 [3].

К причинам низкой урожайности ярового ячменя в Нечерноземной зоне относится, прежде всего, плодородие почв (низкое содержание гумуса, подвижных форм фосфора и калия, повышенная кислотность), нарушение технологии возделывания, отсутствие информации о сортовой отзывчивости ячменя на удобрения, а также неустойчивый гидротермический режим в период вегетации и особенно засуха. Частота проявления засушливых лет в историческом плане увеличивается: с XI по XX век она выросла почти в 7.5 раза (с 8 до 60). Аномально жарким и засушливым был 2010 г. [4].

Система удобрения ячменя зависит от хозяйственного назначения зерна. При возделывании на пищевые и фуражные цели важным показателем качества зерна является содержание белка, которое связано с азотным питанием растений.

В пивоваренном ячмене первостепенное значение имеет содержание крахмала, связанное с хорошим фосфорно-калийным питанием. Повышенное азотное питание снижает его накопление. В связи с этим разработка системы удобрения ячменя должна быть ориентирована и на его сортовые особенности, и целевое назначение [5].

В связи с развитием пивоваренной отрасли в России отмечен дефицит пригодного для этой цели ячменя, который в значительной степени закупают за рубежом [6]. Основными импортными источниками являются Германия, Франция и Финляндия. В России площади посева пивоваренного ячменя составляют >360 тыс. га [7].

Свойства ячменя являются, прежде всего, генетически обусловленным признаком, однако существенную роль в формировании промышленно важных качеств зерна играют почвенно-климатические условия и агротехника возделывания [8, 9]. При усиленном азотном питании происходит чрезмерное накопление в зерновках белков, содержание которых в ячмене, используемом в пивоварении, должно быть 8–12% [8]. Более низкое его содержание также нежелательно из-за необходимости белка для питания дрожжей, образования стойкой пены, формирования вкуса и букета пива [10].

Хорошая обеспеченность растений фосфором способствует формированию корневой системы, крупного колоса, накоплению крахмала и повышению экстрактивности зерна. Калийные удобрения также повышают накопление крахмала и экстрактивность зерна, способствуют стабилизации азотного обмена. При недостаточной обеспеченности растений фосфором и калием и высоком уровне азотного питания формируется низкий урожай с повышенным содержанием белка в зерне [11].

В исследованиях на черноземных почвах установлено, что на качество зерна пивоваренного ячменя наибольшее влияние оказывают азотные удобрения. Их доза даже при очень низком содержании нитратного азота в черноземе обыкновенном не должна превышать 30–45 кг/га [12], на черноземе выщелоченном – 34 кг/га [13]. Использование более высоких доз (до 90 кг/га) способствовало росту урожайности, максимально повышало содержание сырого протеина в зерне, снижало содержание крахмала и экстрактивность. Такое зерно не件годно для пивоварения, но может быть использовано для нужд животноводства.

Действие азотных удобрений на технологические свойства пивоваренного ячменя связано не только с их дозами, но и с соотношением фосфора и калия, а также с условиями влагообеспеченности растений. Например, на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве повышение доз фосфорных и калийных удобрений на фоне достаточной обеспеченности азотом способствовало росту урожайности ячменя и содержания белка в зерне, которое не вышло за пределы нормативных требований [14]. В условиях Курской обл. оптимальное соотношение азота, фосфора и калия для получения качественного зерна ячменя составило 1 : 2 : 2 соответственно, либо его получали при использовании только фосфорных и калийных удобрений [15].

Повышенные дозы азота (N90–120) и дефицит влаги в первой половине вегетации повысили содержание белков в зерне и солоде, что привело к увеличению продолжительности его осахаривания. Дозы N30–60 при благоприятном режиме влагообеспеченности увеличивали урожайность зерна на 10–70% и положительно сказались на пивоваренных свойствах зерна и солода [16].

По данным [17], оптимальные показатели пивоваренных свойств ячменя на дерново-подзолистой почве формируются при достаточной обеспеченности влагой в период развития растений (ГТК = 2.3). В более сухих условиях (ГТК = 1.0–1.3) формируется менее крупное зерно, снижается его экстрактивность, а при внесении азотных удобрений содержание белка может превысить допустимый предел 12%.

На дерново-подзолистых почвах Беларуси с очень высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия на фоне дефицитного и поддерживающего баланса фосфора и калия в почве внесение N60 обеспечило формирование урожая зерна ярового ячменя 3.9–5.5 т/га с уровнем содержания белка, соответствующим требованиям для производства пива. Более высокие дозы азота обеспечили получение зерна фуражного направления использования [18].

Таким образом, для получения зерна ячменя, пригодного для пивоваренных целей, необходима разработка научно обоснованной системы удобрения для конкретной зоны выращивания. Цель работы – в условиях длительного полевого опыта на дерново-подзолистой почве Центрального района Нечерноземной зоны установить наиболее эффективные дозы и сочетания минеральных удобрений при выращивании ячменя на пивоваренные цели.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в длительном стационарном полевом опыте, заложенном в 1967 г. в Смоленском р-не Смоленской обл. по схеме, разработанной В.Н. Перегудовым, на основе теории планирования многофакторного эксперимента. Опыт внесен в “Реестр аттестатов длительных опытов с удобрениями и другими средствами химизации Российской Федерации” под номером 49 [19]. В работе обобщены результаты исследования, проведенного в 2009–2010 гг. и 2016–2017 гг. в 2-х полях севооборота со следующим чередованием культур: ячмень + многолетние травы – травы 1-го года пользования – травы 2-го года пользования – озимые – ячмень – овес на зеленую массу – овес на зерно. Посевная площадь делянок в первом поле составила 115 м² (23 × 5), во втором – 88 м² (22 × 4), учетная площадь – соответственно 76 м² и 54 м².

Схема опыта приведена в таблицах и представляет собой выборку 1/9 части полного факториального эксперимента (9 × 9 × 9). Изучали возрастающие дозы и разные сочетания азотных, фосфорных и калийных удобрений. Для краткости изложения варианты описаны в кодированных единицах, где первая цифра означает кратность возрастания дозы N, вторая – P₂O₅, третья – K₂O. В 2009–2010 гг. единичная доза N и P₂O₅ составила по 10 кг/га, K₂O – 15 кг/га, в 2016–2017 гг. в связи с улучшением экономической ситуации за нее была принята доза N20P20K25.

Почва – дерново-подзолистая легкосуглинистая, сформированная на моренном суглинке. Мощность пахотного слоя – 18–20 см. Перед закладкой опыта (1967 г.) почва имела следующую агрохимическую характеристику: содержание гумуса (по Тюрину) – 2.0–2.2%, рН_{KCl} – 4.9, гидролитическая кислотность (по Каппену–Гильковицу) – 4.2 мг-экв/100 г почвы, содержание обменного калия (по Масловой) – 70–100 мг/кг почвы, содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) – 25–50 мг/кг почвы. К концу 7-й ротации плодородие почвы изменилось (табл. 1), что было обусловлено как внесенными за эти годы удобрениями, так и отчуждением питательных веществ урожаями.

В варианте без удобрений (000) за счет 45-летнего отчуждения питательных веществ урожаями сельскохозяйственных культур обеспеченность почвы подвижным фосфором снизилась от низкой до очень низкой, обменным калием – от средней до низкой. На фоне внесения минеральных удобрений она заметно повысилась по сравнению с контролем.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика почвы к концу 7-й ротации севооборота (2012 г.)

Вариант	Гумус, %	рН _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	H _г , ммоль/100 г почвы
			мг/кг		
000	1.6	4.7	23	66	3.20
111	1.9	4.6	88	102	3.40
222	1.8	4.5	73	81	3.63
333	2.0	4.6	63	112	3.33
444	1.9	4.5	120	71	3.48
555	1.8	4.7	69	94	3.13
666	1.8	4.3	63	74	4.63
777	1.9	4.6	85	112	3.33
888	2.1	4.5	171	115	3.82

Опытной культурой был яровой ячмень сорта Владимир (оригинатор – Московский НИИСХ “Немчиновка”). В исследовании он шел 5-й культурой севооборота. Сорт среднеспелый, средне засухоустойчивый, умеренно устойчив к пыльной головне, сильно восприимчив к гельминтоспориозу, устойчив к полеганию. Включен в Государственный реестр по Центральному (3) и Центрально-Черноземному (5) регионам с 2007 г. Достоинством сорта является высокая адаптивность к различным условиям возделывания. Он сочетает в себе высокий потенциал продуктивности (8–9 т/га), устойчивость к засухе и кислотности почвы. Максимальная урожайность 7.4 т/га получена в 2005 г. в Липецкой обл. Масса 1000 зерен равна 47–56 г. Вегетационный период – 68–87 сут. Содержание белка в зерне – 9.5–14.5%, экстрактивность – до 82%. Сорт внесен в список пивоваренных и ценных по качеству ячменей [20].

Азотные удобрения вносили в форме N_{аа}, фосфорные – P_{сд}, калийные – в форме K_х.

Учет урожая был проведен сплошным методом. Статистическую обработку экспериментальных данных провели методами дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализа по [21] с использованием компьютерной программы STRAZ. Содержание сырого белка рассчитывали по содержанию общего азота, используя коэффициент 5.7. Массу 1000 зерен определяли по ГОСТ 10842-89.

Агрометеорологические условия вегетационных периодов лет исследования были контрастными. Прохладными и избыточно влажными можно охарактеризовать 2009 и 2017 гг. (ГТК за весь период вегетации ячменя составил 2.39 и 2.06 соответственно), аномально жарким и засушливым был 2010 г. (сумма осадков за май–август со-

Таблица 2. Изменение урожайности пивоваренного ячменя в зависимости от доз и сочетаний минеральных удобрений, т/га

Вариант	Единичная доза N10P10K15			Единичная доза N20P20K25		
	2009 г.	2010 г.	среднее	2016 г.	2017 г.	среднее
000	1.3	1.0	1.1	1.7	1.5	1.6
003	1.7	1.5	1.6	1.7	1.9	1.8
030	1.8	1.6	1.7	1.7	2.0	1.8
033	2.0	1.9	1.9	2.3	2.5	2.4
300	1.9	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9
303	2.1	1.9	2.0	2.2	2.2	2.2
330	2.3	2.0	2.1	2.8	2.7	2.7
333	2.6	2.4	2.5	3.1	3.3	3.2
111	1.5	1.3	1.4	1.8	2.0	1.9
222	1.7	1.5	1.6	2.1	2.3	2.2
225	1.7	1.5	1.6	2.2	2.4	2.3
252	2.0	1.8	1.9	2.2	2.4	2.3
255	2.1	1.9	2.0	2.5	2.8	2.7
444	2.6	2.4	2.5	3.3	3.5	3.4
447	2.6	2.4	2.5	3.4	3.7	3.5
474	2.5	2.3	2.4	3.5	3.7	3.6
477	2.5	2.3	2.4	3.6	3.7	3.6
522	2.2	2.0	2.1	2.4	2.7	2.5
525	2.3	2.1	2.2	2.6	3.1	2.8
552	2.5	2.3	2.4	2.9	3.4	3.1
555	2.6	2.5	2.5	3.4	3.7	3.6
666	2.6	2.4	2.5	3.7	3.9	3.8
744	2.6	2.4	2.5	3.6	3.4	3.5
747	2.7	2.5	2.6	3.8	3.9	3.8
774	2.6	2.4	2.5	3.6	3.9	3.8
777	2.5	2.3	2.4	3.7	4.1	3.9
888	2.5	2.3	2.4	3.8	4.4	4.1
<i>HCP</i> ₀₅			0.3			0.4

ставила 80% от климатической нормы; в июле–августе температура воздуха была на 5.7–6.0°C выше среднегодовой нормы с аномалиями до 34°C в июле и 37.2°C – в августе, а сумма осадков оказалась почти в 2 раза меньше нормы). ГТК в 2010 г. за этот период составил 1.09. Лишь 2016 г. по агрометеорологическим показателям мая–августа был близок к климатической норме (ГТК = 1.6).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены данные, характеризующие зависимость урожайности ячменя от доз и сочетаний минеральных удобрений, а также от агрометеорологических условий его выращивания.

Внесение фосфорного и калийного удобрения на фоне обеспеченности растений азотом во все

годы способствовало росту урожайности зерна (варианты 300, 330, 303, 333) с наибольшей величиной в варианте с полным минеральным удобрением.

Уровень урожайности зерна был связан с обеспеченностью растений влагой: минимальной она была в аномально жарком и засушливом 2010 г. (ГТК = 1.09), особенно в контрольном варианте, где по сравнению с прохладным и избыточно влажным 2009 г. она оказалась на 30% меньше. Внесение минеральных удобрений сгладило эффект негативных погодных условий 2010 г.: снижение урожайности отмечено на уровне всего 4–15% по сравнению с соответствующими вариантами 2009 г.

В среднем за 2009–2010 гг. все варианты сочетания удобрений обеспечили достоверную при-

Таблица 3. Окупаемость удобрений прибавкой урожая, кг/кг д.в.

Вариант	Единичная доза N10P10K15			Единичная доза N20P20K25		
	2009 г.	2010 г.	среднее	2016 г.	2017 г.	среднее
111	7.1	8.6	7.8	2.6	6.3	4.5
222	6.1	7.4	6.7	3.1	5.8	4.5
333	12.3	13.1	12.7	7.2	9.1	8.1
444	9.6	10.1	9.8	6.3	7.8	7.0
555	7.9	8.1	8.0	5.4	6.8	6.1
666	6.4	6.9	6.6	5.2	6.1	5.6
777	5.1	5.6	5.4	4.6	5.7	5.1
888	4.4	4.8	4.6	4.2	5.5	4.8
Среднее	7.4	8.1	7.7	4.8	6.6	5.7

Таблица 4. Влияние уровня минерального питания на массу 1000 зерен ячменя, г

Вариант	Единичная доза N10P10K15			Единичная доза N20P20K25		
	2009 г.	2010 г.	среднее	2016 г.	2017 г.	среднее
000	37.5	36.9	37.2	38.8	41.2	40.0
300	37.6	37.2	37.4	39.0	42.0	40.5
030	37.9	37.3	37.6	39.0	42.6	40.8
003	37.5	37.3	37.4	39.1	42.1	40.6
033	37.9	37.7	37.8	40.2	43.0	41.6
303	37.9	37.1	37.5	40.0	42.4	41.2
330	38.0	37.2	37.6	41.8	42.2	42.0
111	38.4	37.6	38.0	40.5	41.1	40.8
222	38.9	38.3	38.6	41.0	41.8	41.4
333	40.0	39.0	39.5	42.2	43.4	42.8
444	40.6	39.2	39.9	42.4	43.6	43.0
555	40.8	40.0	40.4	42.6	44.6	43.6
666	41.4	40.2	40.8	42.9	44.7	43.8
777	41.6	40.2	40.9	43.1	44.9	44.0
888	41.6	41.2	41.4	43.4	45.0	44.2

бавку урожайности по отношению к контролю с максимальным результатом в варианте 333, где была получена урожайность зерна 2.5 т/га. Дальнейшее увеличение дозы NPK или какого-либо его компонента не привело к росту урожайности. Следовательно, лучшей в данных условиях оказалась доза N30P30K45. Следует отметить, что общий уровень урожайности ячменя сорта Владимир остался низким. Причиной этого могла быть излишне кислая почва (pH_{KCl} 4.5–4.7) и недостаточная обеспеченность ее питательными элементами.

Аналогичная картина связи урожайности ячменя с уровнем влагообеспеченности проявилась и при внесении более высоких доз минеральных удобрений (единичная доза N20P20K25) в 2016–2017 гг. Уровень урожайности в контрольном ва-

рианте в среднем за 2 года оказался на 45% больше, чем в среднем за 2009–2010 гг., как эффективнее были и минеральные удобрения. Однако и в эти годы общий уровень урожайности был в 2 раза ниже потенциальной, характерной для данного сорта (8–9 т/га).

В 2017 г. (ГТК = 2.06) в большинстве случаев эффективность удобрений оказалась на 3–17% больше, чем в 2016 г. (ГТК = 1.6). Внесение удобрений позволило существенно повысить ее (на 50–156% по отношению к контрольному варианту). В среднем за 2016–2017 гг. лучшими вариантами можно признать сочетания 333 и 444 (N60P60K75 и N80P80K100 соответственно). По уровню урожайности они уступили вариантам с гораздо более высокими дозами удобрений (666, 777, 888), в которых, однако, окупаемость удобре-

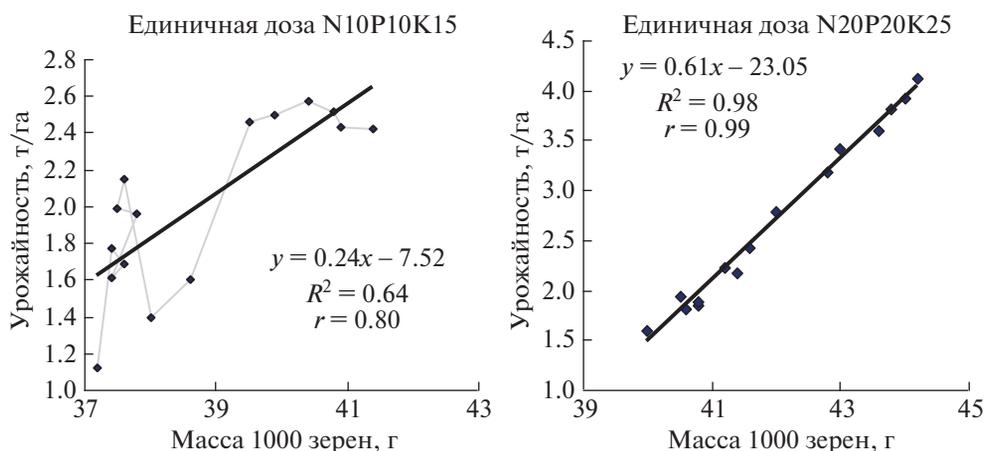


Рис. 1. Корреляционно-регрессионная связь между урожайностью ярового ячменя и массой 1000 зерен.

ний прибавкой урожая оказалась гораздо меньше (табл. 3).

Окупаемость удобрений прибавкой урожая связана как с уровнем прибавки урожая, так и с дозой удобрений. С ростом дозы окупаемость снижалась. В среднем за 4 года исследования в расчете на 1 кг действующих веществ удобрений получено 6.7 кг зерна ячменя.

Различия в урожайности в числе других факторов были связаны с массой 1000 зерен (табл. 4). В годы исследования она не достигла описанных для сорта Владимир показателей (47–56 г). Наименьшей масса 1000 зерен была в 2010 г. (36.9–

41.2 г), максимальной – в 2017 г. (41.2–45.0 г), что согласовалось с различиями в урожайности в эти годы. Зависимость между массой 1000 зерен (x) и урожайностью (y) по силе связи была тесной ($r = 0.80–0.99$), а по форме – прямолинейной (рис. 1).

Важнейшим показателем качества зерна пивоваренных сортов ячменя является содержание в нем белка. Общий его уровень был связан как с режимом влагообеспеченности растений, так и с условиями минерального питания растений (табл. 5).

Во все годы исследования азотные удобрения ожидаемо оказали более сильное влияние на по-

Таблица 5. Содержание сырого белка в зерне ячменя в зависимости от уровня минерального питания, %

Вариант	Единая доза – N10P10K15			Единая доза – N20P20K25		
	2009 г.	2010 г.	среднее	2016 г.	2017 г.	среднее
000	8.9	8.1	8.5	12.5	11.5	12.0
300	10.6	8.4	9.5	12.9	12.3	12.6
030	9.8	8.2	9.0	12.4	12.2	12.3
003	9.3	8.3	8.8	12.2	12.0	12.1
033	9.2	8.6	8.9	13.2	12.8	13.0
303	9.1	8.9	9.0	13.4	12.4	12.9
330	9.5	8.9	9.2	13.5	12.9	13.2
111	9.4	9.0	9.2	13.0	12.6	12.8
222	9.7	9.1	9.4	13.2	12.8	13.0
333	10.3	9.5	9.9	13.6	13.2	13.4
444	10.7	9.7	10.2	13.8	13.4	13.6
555	11.4	10.2	10.8	13.9	13.5	13.7
666	12.2	10.8	11.5	13.9	13.7	13.8
777	13.1	10.9	12.0	14.0	13.6	13.8
888	13.4	11.0	12.2	14.2	13.2	13.7

вышение содержания белка в зерне, чем фосфорные или калийные, но в большинстве случаев внесение полного минерального удобрения имело преимущество.

В 2010 г. формирование зерна происходило при аномально высоких температурах и двукратном недоборе осадков по сравнению с климатической нормой (ГТК = 1.09). Содержание белка в нем в этих условиях не вышло за пределы верхнего норматива для ячменя пивоваренного назначения даже при 8-кратном увеличении единичной дозы (N80P80K120), хотя с ростом дозы полного удобрения отмечено последовательное увеличение накопления белка. Тем не менее, во всех вариантах оно было заметно меньше, чем в избыточно влажном 2009 г. (ГТК = 2.39), когда по нормативу содержания белка доза была ограничена 5-кратным увеличением единичной дозы (N50P50K75).

В 2016 и 2017 гг. зерно ячменя имело содержание белка, превышающее норматив для его использования в пивоварении (кроме контрольного варианта в 2017 г.). В среднем за эти годы оно находилось на уровне 12.0–13.8%. Такое зерно пригодно главным образом для пищевых и кормовых целей.

Следует отметить, что в 2016 и 2017 гг. с наиболее близкими к среднесулетним показателям ГТК (1.6–2.6) в зерне накапливалось больше белка, чем в иных условиях (ГТК = 1.09–2.39).

ВЫВОДЫ

1. Урожайность зерна ячменя сорта Владимир и содержание в нем белка были связаны как с уровнем минерального питания, так и с гидротермическими условиями выращивания растений. Пригодное для пивоваренных целей зерно было сформировано в аномально жарком и засушливом 2010 г. (ГТК = 1.09) во всех изученных вариантах минерального питания, а также в избыточно влажном 2009 г. (ГТК = 2.39) при применении доз минеральных удобрений, не превышавших N50P50K75. При более высоких дозах получено зерно кормового/пищевого направления использования.

2. В годы с ГТК = 1.6–2.06 был сформирован более высокий урожай, с большей массой 1000 зерен, но по содержанию белка зерно не было пригодно для пивоварения и его могли использовать как фуражное. В этих условиях наиболее эффективными оказались дозы N60P60K75 и N80P80K100.

3. В расчете на 1 кг действующих веществ удобрений в среднем за 4 года получено 6.7 кг зерна ячменя.

4. Азотные удобрения оказали наиболее положительное влияние на накопление белка в зерне ячменя, чем фосфорные или калийные, но в большинстве случаев имело преимущество внесение полного минерального удобрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конова А.М. Региональная система земледелия Смоленской области. Смоленск: Агронаучсервис, 2013. 277 с.
2. Завалин А.А., Чернова Л.С., Гаврилова А.Ю., Чеботарь В.К. Влияние минеральных удобрений, биомодифицированных микробным препаратом Би-солбиФит, на урожай ярового ячменя // Агрохимия. 2015. № 4. С. 21–33.
3. Новикова Н.Е., Самсонова Н.Е. Минеральное питание растений и применение удобрений. Орел: ОрелГАУ, Смоленская ГСХА, 2008. 200 с.
4. Никонов А.А. Научные основы устойчивого развития сельскохозяйственного производства засушливых районов страны // Вестн. сел.-хоз. науки. 1987. № 10. С. 10–25.
5. Конова А.М. Изучение возрастающих доз минеральных удобрений и их моделирование по результатам полевого опыта // Агрохим. вестн. 2008. № 4. С. 29–30.
6. НПО Альтернатива: Ячмень. [Электр. ресурс] URL: <https://alternativa-sar.ru/tehnologu/pivo-i-napitki/meledina-syrie-i-materialy-v-pivovarenii/612-1-1-2-zarubezhnye-sorta-yachmenya> (03.02.2020)
7. Посевная площадь пивного ячменя в России на Сельхозпортале. [Электр. ресурс] URL: <https://xn--80ajgpcpbhks4a4g.xn--p1ai/analiz-posevnyh-ploshhadej/?area=8> (03.02.2020)
8. ГОСТ 5060-86 “Ячмень пивоваренный. Технические условия”. М., 1986. 6 с.
9. Завалин А.А., Потапов В.И. Формирование урожая и качества зерна ячменя и овса в зависимости от доз и сроков внесения азота // Агрохимия. 1996. № 11. С. 20–26.
10. Внукова М.А., Титова Е.М. Производство пивоваренного ячменя в Орловской области // Зерн. хозяйство. 2006. № 7. С. 14–16.
11. Пасынков А.В. Урожайность и пивоваренные качества зерна различных сортов ячменя в зависимости от соотношения азотных и калийных удобрений // Агрохимия. 2002. № 7. С. 25–31.
12. Литвинцева Т.А. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество ячменя // Земледелие и химизация. 2008. С. 18–21.
13. Кашукоев М.В., Кошукоев Х.М., Хамжуева З.Х. Азотное удобрение как фактор регулирования пивоваренных качеств зерна ячменя // Вестн. Алтай-ГАУ. 2019. № 6. С. 30–36.
14. Новиков Н.Н., Соловьева Н.Е. Формирование качества зерна пивоваренного ячменя в зависимости от

- режима питания и применения фиторегуляторов при выращивании на дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 2019. № 2. С. 43–51.
15. *Айдиев А.Ю.* Агробиологические основы возделывания пивоваренного ячменя в Курской области // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2006. № 4. С. 45–46.
16. *Новиков Н.Н., Мякинков А.Г., Сычев Р.В.* Формирование пивоваренных свойств зерна ячменя сорта Михайловский в зависимости от уровня азотного питания при выращивании на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве // *Изв. ТСХА*. 2009. № 3. С. 65–73.
17. *Новиков Н.Н., Соловьева Н.Е.* Формирование качества зерна пивоваренного ячменя в зависимости от режима питания и применения фиторегуляторов при выращивании на дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 2019. № 2. С. 43–51.
18. *Мезенцева Е.Г., Кулеш О.Г., Симанков О.В., Шедова О.А.* Оценка эффективности систем удобрения ярового ячменя в зависимости от целевого назначения зерна // *Почвовед. и агрохим.* 2018. № 1. С. 108–115.
19. *Иванова Т.И.* Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. М.: Агропромиздат, 1989. 235 с.
20. Ячмень яровой Владимир. [Электр. ресурс] URL: <http://www.istokagro.ru/index.php/yachmen/242-yachmen-yarovoj-vladimir> (03.02.2020).
21. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов наблюдений). М.: Колос, 1965. 335 с.

Influence of Doses and Combinations of Mineral Fertilizers on Formation of Productivity and Quality of Malting Barley Grain in the Central Non-Chernozem Region

A. Yu. Gavrilova^{a, #}, A. M. Konova^a, and N. E. Samsonova^b

^a Federal Scientific Center for Bast Crops
ul, Nakhimova 21, Smolensk 214025, Russia

^b Smolensk State Agricultural Academy
B. Sovetskaya ul. 10/2, Smolensk 214000, Russia

[#]E-mail: augavrilova@gmail.com

It was studied the effect of different doses and combinations of mineral fertilizers on the yield and quality of grain of malting spring barley of the Vladimir variety in the conditions of sod-podzolic soils of the Central non-Chernozem region. It was shown that the yield value and grain quality are related to the level of mineral nutrition and meteorological conditions of the growing season of the crop. The most suitable grain for brewing purposes was formed in abnormally hot and dry 2010 (HTC = 1.09) in all the studied variants of mineral nutrition, as well as in excessively wet 2009 (HTC = 2.39) at a dose of mineral fertilizers not exceeding N50P50K75. In years with HTC = 1.6–2.06, a higher yield was formed, with a greater mass of 1000 grains, but the protein content of the grain was not suitable for brewing.

Key words: spring barley, mineral fertilizers, yield, grain quality, sod-podzolic soil, Central non-Chernozem region.

УДК 632.952

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ СОВРЕМЕННОГО АССОРТИМЕНТА ФУНГИЦИДОВ

© 2020 г. Л. Д. Гришечкина^{1,*}, В. И. Долженко¹, О. В. Кунгурцева¹,
Т. И. Ишкова¹, С. Д. Здрожевская¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
ООО “Инновационный центр защиты растений”
196608 Санкт-Петербург—Пушкин-8, шоссе Подбельского, 3, Россия*

**E-mail: ldg@icrz.ru*

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 19.03.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Показаны основные этапы формирования ассортимента фунгицидов, начиная с действующих веществ и состава препаративных форм. Увеличилось число комбинированных препаратов, что существенно расширило спектр подавляемых вредных организмов, снизило вероятность формирования резистентности и уменьшило пестицидный пресс. Ассортимент фунгицидов стал в 1.4 раза менее опасен для человека и теплокровных животных в сравнении с ассортиментом 1990 г.: снижены токсическая нагрузка на агробиоценоз в 4.5 раза и средняя норма применения в 3.6 раза. Количество возбудителей заболеваний возросло с 39 до 75, число препаратов – в 2.3 раза и препаративных форм – в 3 раза.

Ключевые слова: ассортимент фунгицидов, болезни растений, эффективность, экологическая безопасность.

DOI: 10.31857/S0002188120090070

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые эпифитотии сельскохозяйственных культур свидетельствуют о необходимости постоянного совершенствования средств и технологий борьбы с ними, включая и подбор эффективных препаратов. На протяжении многих лет в целях снижения потерь, наносимых фитопатогенами, использовали различные средства защиты, начиная от вина, свежеизмельченных листьев кипариса, навоза, золы, спирта до меди и ее солей, а также серы, извести и т.п. Особое место занимала медь, которую широко применяли для борьбы с такими болезнями, как милдью винограда, фитофтороз картофеля и многими другими. В дальнейшем из-за ее дефицита более востребованными становились другие препараты, например, формалин в виде жидкости в борьбе с головневыми патогенами. Конкуренцию последнему составляли органортутные препараты, в частности, хлорная ртуть (сулема), с помощью которых боролись с семенной инфекцией.

С развитием сельского хозяйства и переводом растениеводства на промышленную основу чаще стали наблюдать массовые вспышки на различ-

ных сельскохозяйственных культурах таких болезней как ржавчина злаковых культур, мучнистая роса зерновых, яблони и огурца, фитофтороз картофеля и др. Это потребовало усиления химического блока защитных мероприятий за счет многократности обработок, т.к. широко используемые препараты контактного действия (медный купорос, бордоская жидкость, сера молотая и коллоидная) уже не могли справиться с быстро нарастающей инфекцией. В целом это негативно сказывалось на окружающей среде так же, как и достаточно высокие нормы применения препаратов, в частности, при обработке плодовых культур в борьбе с болезнями, где вносили до 30 кг/га. Основным способом применения фунгицидов было опыливание посевов и посадок сельскохозяйственных культур, т.к. преобладала препаративная форма в виде дуста. Серьезные опасения вызывали препараты гранозан и меркуран, которые являлись сильно ядовитыми действующими веществами (СДЯВ). В это время усилилась вредность отдельных видов опасных членистоногих, в частности, лугового мотылька, злаковых мух, тлей и др. в результате освоения больших массивов целинных земель и расширения их аре-

ала обитания. Для оперативного решения проблемы требовался определенный набор высокоэффективных и экономически целесообразных средств защиты растений с разным фитосанитарным назначением. Перед токсикологами страны стояла задача найти средства борьбы с болезнями сельскохозяйственных культур с улучшенными санитарно-гигиеническими показателями. В первую очередь предстояло систематизировать и упорядочить исследования в данном направлении. В связи с чем была организована общая государственная система изучения и регистрации новых пестицидов зарубежного и отечественного производства. С тех пор ВИЗР, как головному институту, было доверено методическое обеспечение работ по формированию ассортимента средств защиты растений. Цель работы – обзор исследований по формированию современного ассортимента фунгицидов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в разных почвенно-климатических зонах России на разных культурах: зерновых, зернобобовых, овощных, подсолнечнике, картофеле и т.п. Методической основой проведения исследований по подбору более эффективных препаратов в разное время были разработанные методические указания [1–4]. Для оценки опасности применяемых фунгицидов использовали показатель “токсическая нагрузка”, который определяли по Фадееву [5]. За многие годы исследований были изучены новые фунгициды из разных химических классов, включая препараты микробиологического синтеза и иммунизирующего действия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целенаправленные исследования по созданию ассортимента фунгицидов для основных сельскохозяйственных культур для борьбы с фитопатогенами были начаты в 1960-е гг. при создании в ВИЗР сети токсикологических лабораторий для государственных испытаний пестицидов. С ее открытием существенно повысилось качество проводимых исследований и объективность получаемых результатов благодаря усилиям ряда руководителей: М.Г. Кейсерухского, М.Н. Кирилловой, И.А. Юревича. В настоящее время координация исследований осуществляется под руководством академика РАН В.И. Долженко. Многие поколения ученых ВИЗР трудились над созданием ассортимента фунгицидов: И.М. Поляков, А.А. Шумакова, В.И. Попов, М.Е. Владимирская, Д.М. Кобахидзе и др. Они обеспечили методическое и централизованное проведение исследований для получе-

ния объективных результатов опытов, что служило основанием для принятия правильного решения их регламентации. Самое активное участие в этих работах принимали сотрудники ВИЗР и других институтов: Т.С. Баталова, Е.И. Андреева, Е.М. Кумачева, Г.Ш. Котикова, Л.А. Попова, С.Д. Здрожевская, Н.А. Шибкова и др. Много труда и знаний вложили сотрудники токсикологических лабораторий географической сети ВИЗР: В.И. Галинский, Ю.Б. Ефимов, Б.Н. Медведев, Л.И. Волгина, Л.Н. Никулина, Е.Ф. Гранин, А.С. Филипас и др. Весомый вклад по методическому обеспечению и централизации проведения исследований был сделан и сейчас продолжается Л.Д. Гришечкиной, А.В. Герасимовой, Т.И. Ишковой, О.В. Кунгурцевой. Это повысило уровень и достоверность получаемых результатов испытания пестицидов, особенно после гармонизации с методиками ЕОЗР “Методических указаний по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве” [4].

Кадровая политика руководства позволила за многие годы собрать в системе регистрационных испытаний пестицидов ВИЗР таких как А.И. Силаев, Е.Ф. Коренюк, В.А. Хилевский, Н.И. Бернад, О.Ю. Новичков, Г.В. Волкова, Г.В. Якуба, М.Е. Подгорная, Е.Г. Юрченко, А.Э. Снегирев, В.Т. Алехин и др.

Ввиду исключительной опасности головневых заболеваний для производства высококачественного зерна особое внимание было уделено подбору препаратов в борьбе с ними. По результатам целенаправленных исследований стало возможным отказаться от термического обеззараживания семян и использования препаратов группы меди, но самое важное – исключить из применения сильнотоксичные ртутьсодержащие фунгициды (гранозан и меркуран в форме дуста), которые в послевоенные годы на протяжении 20 лет широко использовали в системах защитных мероприятий. Эти протравители семян обладали высокой фунгицидной активностью против возбудителей головневых заболеваний, кроме возбудителей пыльной головни пшеницы и ячменя. Они хорошо подавляли семенную инфекцию (возбудителей корневой гнили, плесневения семян) и сохраняли урожай, не допуская их массового распространения.

С открытием в 1934 г. дитиокарбаматов был получен ряд препаратов органического синтеза, первыми из которых были ТМТД – для обработки семенного материала, дитан М-45, цинеб, цирам – для опрыскивания вегетирующих растений. ТМТД (д.в. тирам) не только был менее токсичен для теплокровных животных и человека, но

и отличался простотой и дешевизной производства, что сделало его более привлекательным для применения на многие годы не только в СССР, но и других странах мира. В дальнейшем тирам стали добавлять в состав комбинированных препаратов в качестве уникального средства борьбы с плесневыми грибами и бактериальными заболеваниями. В силу контактного действия и невозможности проникновения его внутрь семени в посевах зерновых чаще стали обнаруживать пыльную головню. В 1966 г. В. Шмелингом и К. Кулькой был синтезирован карбоксин из химического класса карбоксамиды, на основе которого был создан первый протравитель семян зерновых культур витавакс, содержащий 75% активного вещества [6]. Препарат обладал системными свойствами, глубоко проникал внутрь семени и был высоко эффективен по отношению возбудителя пыльной головни яровой и озимой пшеницы и ячменя. Меньшая токсичность карбоксина для теплокровных животных и человека (LD_{50} для крыс = 3800 мг/кг) способствовала снижению опасности химического метода борьбы. Узкая направленность фунгицидной активности витавакса привела к накоплению в посевах зерновых культур грибов рода фузариум, что послужило основанием для комбинирования его с другими действующими веществами, в частности, с тирамом. Так были созданы смесевые препараты витавакс 200ФФ, витасил, витарос, которые эффективно подавляли развитие не только возбудителей плесневения семян, но и фузариозной корневой гнили. Уменьшение содержания карбоксина до 19,2–37,5% негативно сказалось на эффективности комбинированных препаратов по отношению к возбудителю пыльной головни.

Развитие химического метода борьбы связано с открытием и разработкой многих химических классов веществ, в первую очередь препаратов системного действия таких как фениламины, карбоксамиды, бензимидазолы, морфолины. Они были изучены в разных регионах страны сотрудниками опытной сети токсикологических лабораторий. Препараты внутрирастительного действия расширили возможности химического метода борьбы с фитопатогенами, но самое главное — были найдены принципиально новые пути безопасного применения фунгицидов — обработка семян препаратами системного действия, которые способны длительно воздействовать на возбудителя болезни, располагающегося внутри семени, и одновременно подавлять аэрогенную инфекцию (мучнистую росу, ржавчину, септориоз и др.). Высокая избирательность их при более низких нормах применения и меньшая зависимость от

погодных условий (осадков, температуры, солнечной инсоляции) при лучшей плотности покрытия, удерживаемости, перераспределения пестицида внутри клетки растения гарантировала большую эффективность и соответственно позволяла уменьшить количество покровных обработок.

Бенлат — первый фунгицид системного и широкого спектра действия из химического класса бензимидазолы, который использовали не только для обработки вегетирующих растений, но и в борьбе с семенной инфекцией. Препарат оказывал действие не только на наружную инфекцию, но и подавлял развитие мицелия грибов, локализованного в различных частях зерновки. В зависимости от уровня инфекционной нагрузки его эффективность против пыльной головни значительно варьировала (от 50 и до 100%). В конце 1990-х гг. этот препарат был разрешен для применения на более 25 сельскохозяйственных культурах против более 30 вредных организмов. Широта спектра фунгицидной активности (корневая и прикорневая гниль фузариозной этиологии, головневые заболевания, офиоблез, церкоспореллез и даже фузариоз колоса, а также парша и мучнистая роса яблони, оидиум и серая гниль винограда) позволяла более рационально использовать фунгициды группы бензимидазолов в системах защитных мероприятий не только в садах и виноградниках, но и зерновых культур. В сравнении с дитиокарбаматами и фталимидами они характеризовались более длительным в сравнении с контактными препаратами периодом защиты культуры. Их эффективность в меньшей степени зависела от количества выпавших осадков. Явным преимуществом этих препаратов были сокращение в 10 раз норм применения, чем неограниченных фунгицидов, и в 2–5 раз, чем дитиокарбаматов и фталимидов [7]. Эти препараты наряду с фунгитоксическим действием обладали куративным и системным действием, что предотвращало поражение растений в случае внедрения патогена в растительную ткань. Нежелательными последствиями применения бензимидазолов явилась их высокая стойкость в объектах окружающей среды (период полураспада в почве равен 1–2 года).

Изучение препаратов контактного действия на примере цинеба (дитиокарбаматы) и мерпана или каптана (фталимиды) и комбинированных препаратов на их основе (поликарбацин, купрозан, полимарцин) позволило выявить их недостатки — короткий период защитного действия (7–10 сут), плохая удерживаемость на обрабатываемой поверхности. Отдельные препараты, как фталимиды, контролировали только определенных возбудителей заболеваний и не всегда их действие было

однозначно. Некоторые из них сдерживали развитие одних возбудителей, но при этом стимулировали развитие других. Например, цинеб, СП подавлял развитие парши яблони и стимулировал мучнистую росу. Каптан, СП отличался более широким спектром действия, существенно сдерживал паршу яблони и одновременно был эффективен против мучнистой росы и серой гнили, повышая товарные качества плодов. Для получения положительного результата требовались многократные обработки, что безусловно приводило к увеличению пестицидной нагрузки. Среди положительных качеств этих препаратов следует отметить хорошее распределение активного вещества внутри ткани растения и довольно быстрое разрушение в объектах окружающей среды (1.5–2.0 мес.), низкая токсичность для теплокровных животных и человека. Нормы применения этих препаратов были в 2–3 раза меньше в сравнении с препаратами, содержащими медь и серу. В системах защитных мероприятий садов, виноградников при ротационных обработках фталимиды были незаменимы. Более широкий спектр активности имели комбинированные препараты.

В дальнейшем были синтезированы и изучены производные карбендазима (БМК, олгин, бавестин, дерозал), а чуть позднее — тиофанат-метил (топсин-М) из тиофанатов аналогичный по механизму действия бензимидазолам, он был высоко активен в отношении многих возбудителей болезней, включая мучнистую росу и церкоспореллез.

Ужесточение требований безопасности препаратов для охраны здоровья человека при использовании пестицидов в растениеводстве определило дальнейшие исследования по подбору фунгицидов. Акцент был сделан на нормы и сроки применения, обеспечивающие минимальное содержание остаточных количеств пестицидов в получаемой продукции. По результатам проведенных работ, были определены фунгициды для обработки вегетирующих растений (цинеб, купроцин-1, каптан, фталан, мильпрекс или додин и др.), менее опасные для человека и теплокровных животных, и выяснены особенности их действия на возбудителей заболеваний.

В период освоения больших массивов целинных земель (1950–1960-е гг.), расширения посевных площадей под яровой пшеницей и увеличения зернового клина повысилась значимость корневой гнили, мучнистой росы и многих фитофагов (лугового мотылька, злаковых мух, зерновой совки). Исходя из потребности усиления мер борьбы с фитопатогенами и вредными членистоногими, были разработаны препараты инсектофунгицидного назначения (гексатиурам, тигам,

фентиурам), уничтожающие комплексную инфекцию и почвообитающих вредителей. Высокая токсичность инсектицидной части (гамма-изомер ГХЦГ, тигам, фентиурам, гептахлор и др.) в отношении теплокровных животных и человека, а также стойкость в окружающей среде привели к тому, что в конце 1980-х гг. эти препараты были запрещены для использования в растениеводстве.

В эти годы реальную угрозу представляли мучнисторосые грибы, поражающие многие сельскохозяйственные культуры. По результатам работы был выявлен ряд препаратов, высокоэффективных в борьбе с ними на зерновых, овощных, плодовых и других культурах: органические фунгициды каратан, морестан, мороцид, акрекс, серусодержащие препараты в форме смачивающихся порошков [8]. Высокой эффективностью против мучнистой росы выделялись препараты на основе липофильных производных морфолинов: тридеморф, фадеморф и фенпропиморф с системным перераспределением активного вещества и повышенной дождестойкостью. Они препятствовали формированию мицелия возбудителя заболевания, блокируя синтез эргостерола — важного компонента клеточной оболочки грибов, а их эффективность не снижалась даже в пасмурную погоду при низких температурах, что выгодно отличало их от триазолов. На зерновых культурах эти препараты хорошо подавляли ржавчину, но слабо действовали на возбудителя септориоза. Высокой эффективностью отличался сапроль (трифорин) из пиперазинов, в основном против мучнистой росы и парши. Препарат слабо передвигался по растению при попадании через листья, оказывая лишь локальное действие, ингибируя развитие гаусторий. Установлено, что он действовал на мембранную систему клетки, увеличивая проницаемость липидов и подавляя биосинтез стерина.

Подбирали ассортимент фунгицидов для защиты семечковых культур, в частности, яблони в борьбе с паршой за счет пиримидина (препарат рубиган). Для эффективного контроля серой и белой гнилей на подсолнечнике, овощных и других культурах были предложены дикарбоксимиды (ровраль, ронилан, сумилекс), с помощью которых была решена проблема защиты подсолнечника, томатов защищенного грунта и маточников моркови от этих патогенов.

Следует отметить определенные успехи наших отечественных разработчиков, которые предложили высокоэффективные препараты анилат и афос в борьбе с ржавчиной зерновых культур, и что особенно ценно — против пыльной головни (анилат), препарат ридид-П против пирикулярноза риса, комбинированные препараты против

комплексной инфекции, включая и низшие грибы: полихом, полимарцин, сероцин, борицид, арцерид, тубарид. Весьма примечательно, что в борьбе с пыльной головней пшеницы впервые у нас в стране и даже раньше, чем витавакс, был изучен анилат в форме 93%-ного технического чешуированного сульфанилоксидного моноэтаноламина с низкой токсичностью для теплокровных животных ($LD_{50} = 5380$ мг/кг) в норме 1–3 кг/т [9, 10]. Однако технологичность его применения (погружение в 0.8–1%-ный рабочий раствор на 30 мин с последующим томлением семенного материала до 12 ч и подсушиванием) была трудоемка и впоследствии послужила основанием для исключения его из “Государственного Каталога...”. В обновленном ассортименте фунгицидов преобладали малотоксичные средства защиты с низким коэффициентом кумуляции, нестабильностью во внешней среде и отсутствием аллергенных, бластоогенных, мутагенных, терратогенных и других негативных свойств. По спектру действия рекомендованные препараты позволяли защитить многие сельскохозяйственные культуры от большинства опасных фитопатогенов, сократить нормы применения до 0.2–1.0 кг/га, особенно это было важно для многократно обрабатываемых виноградников.

Участившиеся эпифитотии фитофтороза картофеля и томата, пероноспороза тыквенных культур и подсолнечника значительно ухудшили фитосанитарное состояние полевых культур в России. В условиях чрезвычайной ситуации в агробиоценозах стало невозможным успешно защищать эти культуры от прогрессирующей инфекции низших грибов препаратами контактного действия, среди которых особое место занимали фунгициды группы меди. По настоящему революционной стала разработка и внедрение феноламинов: ацилаланинов (металаксил) и оксазолидинов (оксадиксил), обладающих специфической системной активностью против низших грибов. Наибольшую известность получили ридомил и в меньшей степени – сандофан. Металаксил сильно угнетал рост и образование зооспорангиев в течение 3-х и более недель, но слабо влиял на прорастание спор. Особенно эффективными были препараты на молодых растущих тканях, поскольку активное вещество передвигалось акропетально с токами воды, длительно сохранялось в них и ограничивало проникновение мицелия в растение. Использование ридомила повысило не только урожайность картофеля, но и улучшило сохранность клубней в период хранения [11, 12]. С помощью препарата апрон, содержащего металаксил, стало возможным защитить

подсолнечник, сахарную свеклу и огурец от низших грибов. Широкомасштабное использование феноламинов привело к потере их эффективности из-за резистентности. Она была обнаружена у *Phytophthora infestans* de Bary и *Pseudoperonospora cubensis* Rost. к металаксилу и стала в начале 1970-х гг. для картофелеводов и овощеводов России и других стран серьезной проблемой [13–18]. Положение с резистентностью усугубляла наблюдаемая перекрестная резистентность между ридомилом, сандофаном и галбеном (беналаксилем, который не вошел в “[Каталог ...]”). По этой причине феноламины стали применять в смесевых препаратах.

Новый этап в развитии химического метода борьбы был связан с триазолами, которые вошли в практику защиты растений во всем мире во второй половине 1970-х гг. Высокая активность, широкий спектр контролируемых фитопатогенов, системное передвижение по растению, более низкие нормы применения, а также пролонгированный период защиты (21–30 и более суток) значительно расширили возможности более рационального использования средств защиты в растениеводстве [19, 20]. Триазолы защищали молодые ткани растений за счет передвижения по ксилеме к ее верхним участкам. Отдельные из них (ципроконазол и триадимефон) передвигались по растению не только акропетально, но и базипетально. Одним из первых триазоловых соединений, появившихся в ассортименте фунгицидов, был триадименол (байтан), который обладал не только куративным, но и искореняющим эффектом. Он превосходно контролировал поверхностную, внутрисеменную и аэрогенную инфекции (мучнистую росу, ржавчину) на начальном этапе развития культур. Его высокая эффективность и пролонгированное действие дали возможность уменьшить кратность обработок вегетирующих растений до 1–2-х против применяемых ранее 3-х, а порой и отказываться от них. Широкое применение нашли триазолы на зерновых культурах в борьбе с возбудителями твердой и пыльной головни, болезнями листьев и колоса. Не менее значимыми были успехи в борьбе со многими патогенами на других сельскохозяйственных культурах. Наличие ростстимулирующей активности за счет влияния на гормональный обмен в семенах, рост и развитие корневой системы, стеблей и плодов и т.д., а также способности повышать устойчивость к неблагоприятным условиям, в частности, засухе, низким температурам и загрязнению воздуха обеспечило этой группе препаратов приоритет на долгие годы.

За счет триазоловых препаратов значительно улучшились санитарно-гигиенические показатели, снизился класс опасности и пестицидная нагрузка на агробиоценоз. В интенсивных технологиях возделывания зерновых культур байлетон и в большей степени тилт сыграли решающую роль в борьбе с мучнистой росой, разными видами ржавчины, пятнистостями листьев и колоса, что позволило вывести защиту растений на новый уровень благодаря лечащему, стимулирующему и продолжительному действию. В дальнейшем были синтезированы триазолы 2-го поколения с более низкими нормами применения: тебуконазол (раксил) и диниконазол-М (суми-8), которые контролировали головневые заболевания, септориоз, гельминтоспориоз, плесневение семян. Это позволило провести ротацию химических классов фунгицидов и заменить токсичные препараты на менее опасные, в результате чего значительно улучшилось фитосанитарное состояние агробиоценозов полевых культур, повысились их продуктивность и безопасность.

Качественное совершенствование ассортимента фунгицидов началось в 1980-е гг. в связи с ужесточением требований к использованию пестицидов в интегрированных системах защиты растений. Например, наряду с эффективностью особое внимание стали уделять и безопасности средств защиты растений для полезных компонентов агробиоценоза. В этот период из-за неблагоприятных санитарно-гигиенических показателей были запрещены для применения такие фунгициды как цирам, фигон, каликсин, микодифоль, эпидор, индар. Основное внимание было направлено на разработку научных основ улучшения препаративных форм фунгицидов, подбору наполнителей и добавок, не только повышающих эффективность препаратов, но и их безопасность. Были оценены природные прилипатели (крахмал, казеин, декстрин и др.) на способность удерживать пестицид на семенах, поскольку без них пленка, образующаяся на поверхности семян, быстро разрушалась. В результате исследований была определена особая значимость ПАВов и пленкообразующих составов, увеличивающих контакт препарата с растением и его эффективность за счет лучшей прилипаемости и пролонгированности действия [21]. Благодаря ПАВам улучшилось проникновение активного вещества в кутикулу листа в растворенном виде и повысилась результативность их использования и, как следствие, урожайность культуры. Положительную роль играли антииспарители, снижающие загрязнение окружающей среды и повышающие эффективность обработок. Были найдены наиболее эффективные составы

на основе водорастворимых полимеров – натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (**NaКМЦ**) и поливиниловый спирт (**ПВС**). Данная разработка **ВИЗР** нашла широкое применение в стране при централизованном протравливании семян пшеницы, ячменя, кукурузы и даже хлопчатника. Подобранный состав пленкообразователей, среди которых **NaКМЦ** используют и в настоящее время при производстве отечественных фунгицидов. Ранее применяемые полимеры (**NaКМЦ** и **ПВС**) хорошо сочетались с рядом системных и контактных фунгицидов (витавакс 200, ТМТД, фундазол и др.).

В состав препаратов стали добавлять разные клеящие вещества (ССБ – сульфитно-спиртовую барду, ОП-7 и др.), способствующие удержанию препарата на листьях и уменьшающие токсичность пестицида для культуры за счет повышения адсорбции действующих веществ в растительной ткани. При использовании такого приема как инкрустация посевного материала с помощью разных добавок не только пленкообразователей, но и микроэлементов, удобрений и регуляторов роста растений добились не только повышения удерживаемости пестицидов на поверхности семян, но и создали благоприятные условия для роста и развития молодых растений, вследствие чего повысилась их продуктивность [22, 23]. Уже сейчас созданы композиционные смеси, содержащие биодеструктурируемые полимеры на основе полимерных систем, позволяющие улучшить результативность предпосевной обработки семян [21, 24].

Несовершенство препаративных форм в виде дустов и порошков, а также связанные с ними высокие нормы применения препаратов (25–50 кг/га) способствовали замене их на смачивающиеся порошки, а затем пасты, текучие пасты с пленкообразующими составами, концентраты суспензий (табл. 1).

Положительные качества смачивающихся порошков таких как сохранность фунгицидных свойств в течение длительного времени позволяла лидировать им среди других препаративных форм. По санитарно-гигиеническим показателям (повышенная запыленность рабочей зоны при их использовании, слеживаемость и комковатость при их хранении) такая препаративная форма была очень уязвима. Новым этапом в совершенствовании ассортимента фунгицидов явилось появление препаратов для предпосевной обработки семенного материала в виде концентрированных и водных суспензий (ТМТД, раксил, премис, суми-8 и др.), текучих паст (тир, ТМТД), текучих суспензий (ориус 5), которые значительно улучшили санитарно-гигиенические показатели и уменьшили загрязнение окружающей среды. Концентраты суспензий образовывали стабильные дис-

персии твердых частиц размером 3–5 микрон в водной или масляной среде (КС, СК, ФЛО, ВСК и т.п.) обеспечивали лучшее покрытие и удерживаемость рабочего раствора и в конечном итоге эффективность и безопасность (табл. 2).

Большая работа развернулась по созданию ассортимента фунгицидов для обработки посевного материала не только зерновых культур и картофеля, но и для малообеспеченных культур, таких как рапс, кукуруза, горох, хлопчатник и др. Из-за большой вредоносности крестоцветной блошки в период появления всходов рапса были разработаны препараты инсектофунгицидного назначения (офтанол Т, рапкол ТЗ, тигам и тигам Ц), позволявшие одновременно ограничивать жизнедеятельность вредных членистоногих и контролировать возбудителей заболеваний, в частности, комплекса семенной и почвенной инфекции. Для гороха был зарегистрирован таммол, эффективный в борьбе с аскохитозом, альтернариозом, корневой гнилью и плесневением семян, для проса против головни – орлок, для кукурузы против головни и вредных членистоногих – тигам Ц, для льна-долгунца – тигам и тигам Ц против антракноза, крапчатости и почвообитающих вредителей. Эти препараты были представлены в виде паст, текучих паст, текучих паст с пленкообразующими составами, а также концентрированных и водных суспензий, обладающих рядом преимуществ по санитарно-гигиеническим показателям.

Очень интересной была разработка водорастворимых пакетов препарата тилт премиум, которые полностью исключали контакт оператора с фунгицидом и давали возможность уменьшить норму его применения с 0.5 л/га до 0.33 кг/га. Эта препаративная форма, несмотря на экологичность применения, в дальнейшем была исключена из “Государственного Каталога...” [25]. Революционным прорывом стала разработка российских ученых под руководством академика РАН Каракотова С.Д. по созданию препаративных форм пестицидов в виде коллоидных систем, где действующее вещество находится в виде наночастиц. Эти препаративные формы отличаются тем, что образуют нанодисперсные растворы с дисперсностью менее 100 нм: ККР (титул 390, титул Дуо, триада, кантор), МЭ (ранкона, бенефис, полярис, медаея, винтаж, ранкона АЙ-Микс), концентрат наноэмульсии (колосаль Про). Характерной особенностью этих препаративных форм является термодинамическая стабильность и однородность дисперсии активных веществ водной и органической фаз, которые разделены молекулами поверхностно-активных веществ. В отличие от макроэмульсий они образуются само-

Таблица 1. Количество твердых препаративных форм фунгицидов, шт.

Препаративная форма	Годы				
	1980	1990	2000	2010	2019
Дуст	3	3	–	–	–
Порошок	2	7	2	1	–
Смачивающийся порошок	61	67	42	35	49
Водорастворимый порошок	–	–	–	–	2
Водно-диспергируемые гранулы	–	–	4	14	34
Водорастворимые гранулы	–	–	2	1	4

Таблица 2. Количество жидких препаративных форм фунгицидов, шт.

Препаративная форма	Годы				
	1980	1990	2000	2010	2019
Паста и текучая паста	3	2	–	5	2
Водный раствор	3	6	1	–	2
Коллоидный раствор	–	–	–	1	1
Водорастворимый концентрат	3	4	–	–	4
Водный концентрат	–	–	2	1	2
Концентрат суспензии, суспензионный концентрат, водно-суспензионный концентрат	–	2	28	76	196
Эмульгирующий концентрат	6	–	–	–	–
Концентрат коллоидного раствора	–	–	–	2	3
Дисперсионный концентрат	–	–	–	–	2
Концентрат микроэмульсии	–	–	–	1	1
Водная эмульсия	–	–	1	–	3
Концентрат эмульсии	–	15	14	25	80
Водная суспензия	–	1	1	1	1
Текучая суспензия + текучий концентрат суспензии	–	–	–	–	6
Суспензионная эмульсия	–	–	–	1	4
Суспензионная микроэмульсия + эмульсия масляно-водная	–	–	–	–	2
Микроэмульсия	–	–	–	3	10
Масляная дисперсия	–	–	–	–	1

произвольно с размером частиц 5–5000 нм. Стабильные наноземлюльсии получают уже при размере частиц 2000 нм при разведении водой. Это быстро повышает их действие и активность, снижает расход на единицу площади. Они хорошо смачивают обрабатываемую поверхность растений, проникают в семенной материал и растительные ткани и быстро воздействуют на патоген. Уменьшение токсичности препаративной формы обеспечивает использование водного растворителя вместо масляной фазы в коллоидных системах. В целом это повышает эффективность защитных мероприятий.

Такое качественное преобразование состава фунгицидов за счет новых препаративных форм снизило их опасность для полезных компонентов агробиоценоза и явилось новым этапом в химической борьбе с болезнями, поскольку привело к резкому сокращению токсической нагрузки на единицу обрабатываемой площади.

Улучшение состава фунгицидов проходило за счет включения новых активных действующих веществ, менее опасных для окружающей среды. Открытие в конце 1980-х гг. и получение аналоговым синтезом расшифрованных токсинов, вырабатываемых бактерией *Pseudomonas pyricinia* из нового химического класса фенилпирролы, позволило уменьшить опасность применения химических средств защиты растений. Первым из этого класса был препарат берет (д.в. фенпиклонил), эффективно контролировавший только наружную инфекцию, в силу контактного действия он ограниченно распределялся в проростке, что требовало заблаговременной за несколько месяцев обработки посевного материала. Это были первые шаги в сторону экологической направленности защиты растений благодаря высокой степени деградации фенпиклонила в объектах окружающей среды до нетоксичных продуктов за короткий период. Наибольшую значимость этот препарат получил в борьбе со снежной плесенью на озимых зерновых культурах, поскольку была обнаружена резистентность у этого патогена к бензимидазолам, в частности, к карбендазиму, а у фенилпирролов отсутствовала перекрестная устойчивость. Препарат эффективно использовали на зерновых культурах в борьбе с твердой головней, плесневением семян, корневой гнилью и т.п. Недостаточная активность фенпиклонила против гельминтоспориоза, септориоза и снежной плесени была устранена за счет комбинирования с имазалилом и карбоксином (берет специал и берет универсал).

В дальнейшем с появлением другого действующего вещества флудиоксонила (препарат максим) контактного и широкого спектра действия с

длительной остаточной активностью значительно удешевилась стоимость препарата. Препарат весьма успешно защищал картофель от поражения возбудителями ооспороза, серебристой парши, фузариоза, фомоза, альтернариоза и мокрой гнили. Положительные результаты были получены при проведении испытаний на зерновых культурах, в частности, против снежной плесени, твердой головни и фузариозной корневой гнили, а также на сахарной свекле, подсолнечнике, сое, горохе и цветочных культурах. Высокая активность флудиоксонила против грибов рода фузариум дополнялась пролонгированным действием против возбудителей твердой головни и ризоктониозной корневой гнили путем ингибирования прорастания спор и роста их мицелия. В целях эффективной борьбы с грибами, находящимися внутри семени, включая возбудителя пыльной головни, требовалось добавление к нему триазолов — препараты максим Экстрим и максим Форте [26].

В 1990-е гг. основное внимание уделяли изучению триазолов 2- и 3-го поколения: вектра, СК, премис, КС, гранит, СК, альто, СК, опус, КС, винцит, СК, дивиденд, КС и др., что позволило рекомендовать их сельскохозяйственному производству для защиты от комплексной инфекции зерновых культур при интенсивной технологии выращивания. Успешное решение проблемы защиты садов от парши связано с триазолами — препаратами атеми и особенно скор, последний выгодно отличался низкими нормами применения и высоким защитным эффектом. Интенсивное использование ингибиторов биосинтеза эргостерина, в первую очередь триазолов, привело к снижению их эффективности в борьбе с мучнистой росой на зерновых культурах. Первые сообщения об этом явлении были получены из Шотландии, а затем из Западной Европы. Предпринятые попытки замедлить развитие резистентности опирались прежде на стратегию, выработанную FRAC и предполагавшую использование многокомпонентных смесей. Это вызвало появление 2- и 3-компонентных комбинированных препаратов на основе триазолов (арчер, рекс, райдер, фалькон), которые также расширили спектр фунгицидной активности и исключили повторные обработки с нарастающими болезнями. В борьбе с комплексной семенной инфекцией зерновых культур и почвенными патогенами были изучены комбинированные препараты для обработки семенного материала, содержащие флутриафол (ферракс, ферракс экстра) и диниконазола (суми-8, суми-8 супер, суми-8 универсал).

Комбинированные препараты появляются и для борьбы с низшими грибами (арцерид, авик-

сил, ридомил МЦ, сандофан 8М), а также изучают новые активные действующие вещества, эффективные в борьбе с ними. Особый интерес вызвали препараты с локальной системной активностью и трансламинарным распределением активного вещества: диметоморф из производных коричной кислоты (акробат), цимоксанил из ацетамидов (курзат). Позднее в 2011 г. этот перечень пополнил мандипропамид из мандамидов (ревус), в 2014 г. – этабоксам из тиазолкарбоксамидов (этофин). Первый отличался ярко выраженной фунгицидной направленностью по отношению к пероноспоровой инфекции и отсутствием перекрестной устойчивости к фениламидам. В борьбе с этими фитопатогенами весьма успешным был препарат эфатол на основе фосэтил алюминия (производные фосфористой кислоты), который не оказывал прямого действия на возбудителя болезни, а действовал только опосредованно, стимулируя защитные и иммунные механизмы растений. Проникает он в растения через корни или листья, передвигается по растению как акропетально, так и базипетально. Накапливаясь в клетке, он преграждает путь патогену и ускоряет процесс его гибели. Легкое передвижение по растению акропетально и базипетально обеспечивает высокий защитный эффект.

Только спустя 15 лет после открытия препаратов системного действия в борьбе с почвенными оомицетами появляется ипроваликарб (мелоди) из карбаматов, который также системно распределялся по растению. Он обладал защитным, лечебным и искореняющим эффектом, ингибируя биосинтез фосфолипидов и синтез клеточных мембран. Впервые ипроваликарб был изучен в комбинации с пропиенебом (мелоди Дуо), но не был зарегистрирован в России. Затем по результатам проведенных исследований на картофеле и винограде он был рекомендован в комбинации с медью в борьбе с фитофторозом и милдью.

Изменившаяся фитосанитарная обстановка в агробиоценозах, как следствие нарушений технологий их возделывания, вызвали массовые вспышки болезней многих сельскохозяйственных культур в результате негативных процессов, протекающих в сельском хозяйстве страны, а также меняющихся условий климата. Усиление вредоносности ряда доминантных видов фитопатогенов и вредителей, расширение их ареала и продвижение в северные районы отдельных видов, перегруппировка составов вредоносных комплексов неизбежно привела к нарастанию объемов применения средств защиты растений и, как следствие, увеличению пестицидного пресса и загрязнения ксенобиотиками выращиваемой про-

дукции. Все это способствовало пересмотру концепции и методических подходов к вопросам, связанным с защитой растений, включая формирование ассортимента фунгицидов. Исходя из этого, наряду с эффективностью и безопасностью для здоровья людей основное внимание стали уделять безопасности применяемых средств защиты для всех компонентов окружающей среды. Это заставило заменить старые препаративные формы на новые, более безопасные: хорошо известных препаратов ТМТД – на водно-суспензионный концентрат (ВСК) или текучую пасту (ТПС); купроксат – на концентрат суспензии (КС); тиовит и кумулус – на водно-диспергируемые гранулы (ВДГ). В результате этого улучшились не только их санитарно-гигиенические показатели, но и новые препаративные формы были лишены некоторых недостатков, присущих старым. Например, препараты группы серы в форме ВДГ в отличие от смачивающихся порошков не снижали фотосинтезирующую активность вегетирующих растений, мелкодисперсный порошок медьсодержащих препаратов, особенно в форме концентрата суспензии (купроксат) обеспечивал наилучшее биологическое воздействие вплоть до 21 сут за счет ускоренного проникновения частиц действующего вещества размером <1 мк от ранее рекомендованных фунгицидов группы меди, тем самым повышая эффективность и безопасность средств защиты растений. Снижение пестицидной нагрузки и большей безопасности применения препаратов зарубежного синтеза связано с большей очисткой действующих веществ от вредных примесей и балластных изомеров, что позволило вдвое уменьшить пестицидную нагрузку по металаксилу без снижения его эффективности при замене энантиомера *S* на энантиомер *P* (ридомил Голд МЦ).

Несомненным успехом на пороге XXI века стало создание препаратов нового поколения, ингибирующих дыхательные процессы грибов: оксазолидиндионов, имидазолинонов и стробилуринов. Уникальный механизм действия выгодно отличал их от большой группы ИБЭ, представленной в основном триазолами, что позволяло их использовать при снижении чувствительности к триазолам, бензимидазолам, дитиокарбаматам, фениламидам и т.п. Среди них особое место занимали стробилурины, синтезированные аналоговым способом по подобию природных антибиотиков, выделенных из базидиомицетов порядка агариковых грибов из семейства болетовых (*Strobilurus tenacellus*) и семейства трихоловых (*Oudemansiella mucida*). Широкий спектр фунгицидной активности против фитопатогенов из разных

классов (оомицетов, дейтеромицетов, базидиомицетов) хорошо сочетался с низкими нормами применения и оригинальным распределением активного вещества в тканях растений (мезосистемное, квазисистемное, трансламинарное и истинно или частично системное). Длительность защитного эффекта этих препаратов определялась перераспределением активного вещества в процессе диффузии в газообразной фазе и хорошим закреплением их на обработанной поверхности в виде затвердевшего осадка при помощи плохо смываемых липофильных частиц. Коммерческий успех и явное преимущество их применения заключалось в возможности более рационального использования в системах защитных мероприятий для контроля мучнисторосяных и ложномучнисторосяных грибов. Быстрая деградация в объектах окружающей среды до нетоксичных продуктов, щадящее действие на почвенную биоту, пчел и дождевых червей позволяли говорить, что экологическая направленность химического метода борьбы приобрела реальные очертания. Первые из них – азоксистробин (амистар), крезоксим-метил (строби, ВДГ) и трифлостробин (зато, ВДГ) – были изучены и рекомендованы для борьбы с болезнями семечковых культур (паршой, мучнистой росой, гнилями при хранении яблок), зерновых (мучнистой росой, ржавчиной, пятнистостью листьев и колоса) и виноградарников.

Созданные в 1996 г. стробилурины уже в 1999 г. были зарегистрированы в мире на 84 различных культурах (в основном зерновых, винограде, фруктовых и овощных), что составляло приблизительно 10% мировых продаж [27].

Преимущество их использования ощутили овощеводы: препараты не только повышали урожайность, но короткий период ожидания (5 сут) позволял их применять на огурце консервных сортов, где крайне нежелательны обработки перед уборкой медьсодержащими препаратами и дитиокарбаматами с длительным периодом ожидания [28]. Широкий спектр действия стробилуринов (строби и квадрис) позволял защитить виноградарники от милды и оидиума, семечковые культуры от парши, мучнистой росы и других заболеваний, включая гнили при хранении плодов, обеспечивая стабильную высококачественную урожайность культуры. Весьма успешные испытания квадриса на зерновых культурах позволили рекомендовать его против листовых форм пятнистостей: септориоза, ринхоспориоза, сетчатой пятнистости, мучнистой росы, пиренофороза. Было установлено, что лучшую результативность обеспечивают стробилурины при профилактических обработках (до инфицирования) или после

препаратов куративного действия в случае заражения растений. В последствии из-за резистентности в ассортимент фунгицидов были введены комбинированные препараты, содержащие стробилурины и триазолы. Доказано, что комбинированные препараты с триазолами, морфолинами и препаратами, которым свойственен куративный эффект, снижают процесс формирования резистентности. В России изучение комбинированных препаратов на основе стробилуринов и триазолов (абакус, амистар экстра, амистар Трио, аканто Плюс, терсел, кабрио Топ и т.д.) дало возможность расширить ассортимент фунгицидов для многих культур при обработке посевного материала и вегетирующих растений. В настоящее время их число насчитывает 6 действующих веществ: из них пикоксистробин и флуоксастробин обладают явно выраженными системными свойствами.

В связи с возникшей проблемой фузариоза колоса на Северном Кавказе, связанной с внедрением интенсивных технологий, предполагающих возделывание высокоурожайных сортов зерновых культур на фоне повышенных доз азотных удобрений и при минимальных обработках почвы, много внимания было уделено подбору препаратов для борьбы с ним. Исследования были направлены на выявление препаратов, эффективно контролируемых первоначально только наружную инфекцию фузариоза на поверхности колоса, а в дальнейшем поиск был расширен и дополнен оценкой эффективности против внутрисеменной инфекции. С помощью модифицированных методических указаний для проведения исследований в этом направлении были отобраны эффективные фунгициды для защиты пшеницы от этого фитопатогена и определены сроки наилучшего подавления инфекционного начала [29]. Фунгицидные обработки пшеницы снижали пораженность колоса фузариозом до 77% в зависимости от агроэкологических условий, складывающихся в годы проведения опытов при пораженности колоса в контроле 69.7–78.6% [30]. Такие препараты, как замир и фалькон, обеспечивали не только снижение видимых признаков заболевания, но и зараженность зерновок латентной семенной инфекцией в 3–4 раза в сравнении с контролем (74.4%) [31, 32].

Важной тенденцией современного ассортимента фунгицидов стало появление новых высокоактивных препаратов полифункционального действия, учитывающих токсические свойства действующих веществ, их поведение в объектах окружающей среды и обладающих ростстимулирующими качествами. Возможности эффективного контроля комплекса заболеваний, таких как корневая гниль разной этиологии, головневые болезни, пятнистости листьев и репродуктивных

органов и т.д. расширили комбинированные фунгициды разного механизма и спектра активности с эффектом синергизма или аддитивности [33]. В целом это значительно снизило вероятность формирования резистентных форм патогенов и позволило избежать селективирующего эффекта для отдельных из них. Особенно ярко это прослежено для зерновых культур. Число комбинированных препаратов в борьбе с комплексом болезней для зерновых культур в последние годы возросло почти в 2 раза. Комбинированные препараты гарантированно защищают от корневой гнили в любых условиях и при разной этиологии (дивиденд экстрим, скарлет, террасил форте, максим экстрим, доспех 3, стингер трио, клад и др.). В борьбе с низшими грибами (*Pythium*) эффективны препараты дивиденд экстрим, сертикор и бенефис, содержащие металаксил и мефеноксам. Против ризоктониозной корневой гнили фунгицидную активность проявляют препараты на основе пенцикурона (престиж) и флудиоксонила (максим). Появление в России нового действующего вещества седаксан (вайбранс Интеграл), обладающего фунгицидной активностью в отношении грибов рода *Rhizoctonia*, позволит продолжить успешную борьбу с данным патогеном [34, 35]. Церкоспореллез, начиная с 1980-х гг., остается одним из вредоносных заболеваний в европейских странах, включая и Россию. В борьбе с ним препараты, содержащие прохлораз, имазалил и протиоконазол (премис Дуо, полярис, бенефис, квартет, турион, терция), применяют перед посевом семян, а для обработки вегетирующих растений – бампер Супер и замир.

Доминирование в ассортименте триазоловых соединений для защиты многих сельскохозяйственных культур (зерновых, семечковых, ягодников, картофеля, овощных и др.) повышает риск формирования резистентной популяции фитопатогенных организмов. В последние годы появились представители 2-го поколения из химического класса карбоксамиды: бикафен, флукапироксад, изопиразам, пенфлупен, пентиопирад и пиразол-карбоксамиды: седаксан и бензовиндифлупир с механизмом действия, существенно отличающимся от триазолов [36], что позволяет использовать их в антирезистентных защитных мероприятиях. В первую очередь карбоксамиды угнетают дыхательный процесс грибов, что впоследствии приводит к подавлению синтеза биопреципитов в клетках грибных организмов. Такое нарушение энергетического метаболизма связано с ингибированием дыхательного фермента сукцинатдегидрогеназы в митохондриях возбудителя болезни в дыхательной цепи комплекса II-окисления янтарной кислоты (сукцината) в фумарат, катализируемого сукцинатхинонредуктазой. Препараты

обладают системной или локально-системной активностью [37–39] и рекомендованы для зерновых (систива, адексар, абруста, бонтима, элатус Риа), картофеля (эместо Квантум, серкадис), семечковых культур (серкадис Плюс, эмбрения, фонтелис), винограда (серкадис).

Среди препаратов полифункционального действия особую значимость приобрели комбинированные средства защиты с многосторонней биологической активностью в отношении как фитопатогенов, так и вредных членистоногих. С открытием и разработкой неоникотиноидов, характеризующихся меньшей токсичностью для здоровья людей и обладающих системными свойствами, снова появилась возможность контроля жизнедеятельности вредителей и ограничения семенной и почвенной инфекции. Быстрое поглощение и акропетальное перемещение неоникотиноидов по растению позволило использовать их не только для обработки вегетирующих растений, но и для предпосевной обработки семенного материала в борьбе с сосущими и грызущими вредителями, включая почвообитающих. Если первоначально инсектофунгициды были рекомендованы для защиты рапса от крестоцветных блошек и возбудителей болезней, наносящих существенный вред всходам, то за последние годы эта группа препаратов нашла широкое применение на картофеле в борьбе с колорадским жуком, ризоктониозом, фузариозом и другими патогенами на клубнях [37–39]. В целом это повысило рентабельность проводимых защитных мероприятий. Затем инсектофунгициды стали применять для защиты зерновых культур, где основной вред наносят хлебная жужелица, злаковые мухи, головневые заболевания, корневая гниль и др. [40–46]. За последнее время количество рекомендованных инсектофунгицидов увеличилось до 24 препаратов.

Применение препаратов, учитывающих структуру патогенного комплекса, динамику его изменения и причиняемый ущерб защищаемой культуре, дает возможность управлять фитосанитарным состоянием агробиоценозов с наименьшими эколого-экономическими последствиями. Исходя из этого, было уделено особое внимание изучению селективных препаратов нового поколения с принципиально иным механизмом действия, не затрагивающим естественную биоценологическую регуляцию агробиоценоза, а именно – активаторов растений и иммунорегуляторов. Главной мишенью этих препаратов является растение, у которого стимулируется иммунная система, что обеспечивает устойчивость к заболеванию. Гриб при контакте не погибает, а соединения как природного, так и синтетического происхождения лишь влияют на комплекс биохимических реакций в растениях, нарушая их естественное тече-

ние. Вследствие этого для развития патогена наступают неблагоприятные условия, снижается его активность, меняется обмен веществ защищаемого растения: уменьшается проницаемость мембран, увеличивается накопление фитоалексинов, усиливается образование активных форм кислорода и т.п., что приводит часто к его гибели. Было установлено, что препараты альбит, новосил, бион, ВДГ (исключен из «Государственного Каталога...») и др. в чрезвычайно низких нормах применения на ранних стадиях развития растений снижали заболванение до экономически неощутимых размеров [47]. И все же более значимое влияние они оказывают на формирование урожайности, что по мнению Злотникова А.К. [48], на примере препарата альбит, связано с размножением в почве азотфиксаторов, фосфатмобилизирующих и других полезных бактерий. Они улучшают минеральное питание растений и в конечном итоге повышают урожайность культуры. Эти препараты щадящего действия минимизируют негативное действие пестицидов на агробиocenоз, что позволяет использовать их в органическом земледелии, интерес к которому возрос в последнее время.

Применение этих препаратов должно быть научно обосновано, поскольку их эффективность во многом определяется инфекционным фоном и временем проведения обработки растений. Как показала практика, эти препараты действуют на растения в более мягкой форме, но порой с меньшей эффективностью. На основе веществ, выделенных из хвойных пород в виде флавоноидов или тритерпеновых кислот, разработанные препараты силк, растСТим, новосил, вэрва и вэрваль эффективно контролировали аэрогенную инфекцию на слабом фоне развития [49, 50]. Использование этих препаратов должно сопровождаться оценкой всех рисков в современном земледелии.

Сегодня мы имеем достаточно большой выбор средств защиты, представленный разными химическими классами и комбинированными препаратами. Исследования по подбору препаратов продолжаются, где важной целью становится обеспечение безопасности пестицидов для здоровья людей и полезных компонентов агроценоза, исключаящее загрязнение выращенной сельскохозяйственной продукции. Вопросы регламентации использования пестицидов в растениеводстве и контроля допустимого уровня содержания препарата в сельскохозяйственной продукции остаются крайне актуальными. В результате совершенствования ассортимента фунгицидов исключены фунгициды 2-го класса опасности неизбирательного действия с высокими нормами внесения, подавляющие жизнедеятельность почвенной мик-

робиоты с обитающими в ней микроорганизмами-антагонистами возбудителей болезней и симбионтами, а также полезными насекомыми.

Безусловно, важную роль в снижении пестицидной нагрузки играют и новые технологии применения пестицидов, включая оптимальные сроки, способы и методы их нанесения. Примером может служить применение стробилуринов в плодоводстве: норма применения и расход рабочей жидкости зависит от высоты дерева семечковых культур [51–53]. Это позволяет уменьшить расход фунгицидов, пестицидный пресс, а также негативное влияние стрессов, обусловленных химическими препаратами. Гармонизация микробиологического и химического методов борьбы не только за счет новых действующих веществ, но и новейших технологий и способов применения средств защиты растений [54–56] позволяет уменьшить экологическую опасность химических средств защиты. Ярким примером такого сочетания является применение инсектицидов и фунгицидов через систему капельного полива растений при выращивании овощных культур в теплицах, где допускается выпуск энтомофагов [58–62]. Такая технология позволяет ограничить жизнедеятельность вредных членистоногих и одновременно подавляет развитие корневой гнили на овощных культурах защищенного грунта.

Более совершенные технологии опрыскивания растений путем повышения качества нанесения препарата на защищаемую поверхность уменьшают потери рабочего раствора и снос мелких капель или стекание крупных капель [63–65]. Целенаправленные исследования, связанные с экономией расхода фунгицида как важного фактора снижения пестицидного пресса и уменьшения влияния стрессовых ситуаций, обусловленных химическими средствами, позволили экономить до 16–30% пестицидов и объема рабочих растворов при обработке вегетирующих растений за счет более совершенного нанесения препарата с помощью современной аппаратуры. Высокая рентабельность отмечена при оптимизации применения пестицидов в плодоводстве, согласно концепции «дерево—ряд—объем», предложенной зарубежными исследователями [66]. Для зерновых культур весьма успешной была технология нанесения препарата, изменившая угол распыления рабочей жидкости до 45° за счет увеличения поверхности покрытия колоса фунгицидами с 4.2 до 29.5%, в результате которой снизилась распространенность фузариоза колоса с 40 до 25% [67].

Таким образом, проведенные исследования по совершенствованию ассортимента фунгицидов свидетельствуют о существенных достижениях в этом направлении. В процессе его формирования

Таблица 3. Совершенствование ассортимента фунгицидов

Показатель	Годы			
	1990	2000	2010	2019
Количество препаратов, всего	174	119	190	407
Количество препаративных форм	8	17	26	24
Количество химических классов	32	25	30	38
Количество действующих веществ	87	51	59	89
Средняя норма применения	3.2	2.2	0.9	0.9
Токсическая нагрузка	1061	653	292	234
Средняя ЛД ₅₀ (для крыс мг/кг)	3201	3209	3354	4563
Класс опасности	2.8	2.7	2.5	2.6
Количество комбинированных препаратов	25	32	67	233
Новые молекулы	30	1	3	24
Количество вредных организмов	39	50	53	75

за многие годы значительно модифицирован состав действующих веществ: исключены сильно токсичные препараты и высокотоксичные соединения, что сделало его более безопасным для человека, теплокровных животных и всех компонентов агробиоценозов. Наполнение его новыми химическими классами (стробилурины, бензофеноны, пиразолкарбоксамиды и др.) с механизмом действия, отличным от применяемых ранее препаратов, с высокой степенью деградации во всех элементах окружающей среды дала возможность оптимизировать систему защитных мероприятий против комплекса фитопатогенов и снизить вероятность развития резистентности. Увеличение числа комбинированных препаратов на основе 2-х или более действующих веществ, включая средства защиты разного фитосанитарного назначения (аканто Плюс, амистар Голд, пиктор, орвего, бенифис, вайбранс Интеграл и т.п.), эффективно подавляющих комплексную инфекцию и жизнедеятельность вредных членистоногих, способствовало уменьшению общего уровня загрязнения окружающей среды ксенобиотиками. Повышение доли отечественных средств защиты, удешевляющих выращенную сельскохозяйственную продукцию, сыграла важную роль в импортозамещении. Существенные преобразования коснулись состава препаративных форм фунгици-

дов, в результате которого снизилась опасность ряда токсических веществ как для оперативных работников по защите растений, так и полезных компонентов агробиоценозов. В связи с отказом от использования дустов, порошков с высокими нормами применения (10–50 кг/га) и переходом на препараты с более низкими нормами применения в виде водно-диспергируемых гранул (строби, ридомил голд МЦ), водных эмульсий (апрон голд), водно-суспензионных концентратов (витарос, бункер), концентратов суспензии (раксил ультра, винцит, форте), суспензионных концентратов (винцит, амистар), эмульсий масляно-водных (эминент), концентратов коллоидного раствора (титул 390, титул Дуо, триада), микроэмульсий (тебу 60, поларис, ранкона, бенефис). Все это в целом способствовало существенному снижению пестицидной нагрузки на единицу обрабатываемой площади. Положительную роль сыграли современные технологии внесения препаратов, значительно обезопасившие химический метод борьбы. Например, современный ассортимент фунгицидов существенно изменился, он стал менее опасен для теплокровных животных, здоровья человека, окружающей среды. Среднее ЛД₅₀ (орально для крыс) составляет 4563 мг/кг, класс опасности – 2.6, средняя норма применения препарата составляет 0.9 кг, л/га (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние исследования по изучению биологической активности фунгицидов в отношении десятков видов возбудителей заболеваний, разработке регламентов их эффективного и безопасного применения, поиску новых препаратов и препаративных форм, появление новых технологий и приемов использования защитных средств, изучение комбинаций разных действующих веществ с уникальными механизмами действия, создание антирезистентных стратегий и технологий, биологизация и экологическая оптимизация фитосанитарных средств позволили усовершенствовать и сформировать современный ассортимент фунгицидов в Российской Федерации для защиты сельскохозяйственных культур от фитопатогенов. Все это положительно сказалось на снижении пестицидной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Попов В.И.* Методика полевых испытаний протравителей семян в токсикологических лабораториях. М., 1964. 29 с.
2. Методические указания по проведению полевых и производственных испытаний фунгицидов в борьбе с болезнями плодовых, овощных культур и ви-

- ноградников / Под ред. Шумакова А.А. М.: Колос, 1970. 39 с.
3. Баталова Т.С., Андреева Е.И., Кумачева Е.М., Котикова Г.Ш., Алексеева С.П., Ившина Н.Н. Методические указания по государственными испытаниям фунгицидов, антибиотиков и протравителей семян сельскохозяйственных культур. М, 1985. 130 с.
 4. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / Под ред. Долженко В.И. СПб.: МСХ РФ, ВИЗР, 2009. 379 с.
 5. Фадеев Ю.Н. Оценка санитарной и экологической безопасности пестицидов // Защита растений. 1988. № 7. С. 20–21.
 6. Поляков И.М. Химический метод защиты растений от болезней. Л.: Колос, 1971. 167 с.
 7. Котикова Г.Ш., Шумакова А.А. Совершенствование ассортимента фунгицидов // Тр. ВИЗР. 1983. С. 29–35.
 8. Кобахидзе Д.М. Развитие взглядов И.М. Полякова о научных основах создания ассортимента фунгицидов и протравителей семян // Тр. ВИЗР “Проблемы общей и частной фитотоксикологии”. 1979. С. 36–40.
 9. Попова Л.А. Изыскание и изучение новых препаратов для борьбы с пыльной головней пшеницы: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л.: ВИЗР, 1976. 22 с.
 10. Химические и биологические средства защиты растений. Кратк. справ. / Под ред. Сазонова П.В. М.: Колос, 1978. 206 с.
 11. Котикова Г.Ш. Перспективы совершенствования ассортимента фунгицидов на важнейших сельскохозяйственных культурах // Тр. ВИЗР “Химический метод защиты сельскохозяйственных растений от грибных болезней”. 1985. С. 60–64.
 12. Котикова Г.Ш. Состояние и перспективы совершенствования ассортимента фунгицидов // Тр. ВИЗР “Научные основы химической защиты сельскохозяйственных культур от болезней”. 1991. С. 63–72.
 13. Андреева Е.И., Фуреенко Е.И. О чувствительности рас возбудителя фитофтороза картофеля к ридомилу и его смесям // Тез. докл. 6-го совещ. “Генетические последствия использования химических средств защиты растений и пути преодоления резистентности вредных организмов с учетом задач окружающей среды”. Рига, 1984. С. 110–111.
 14. Воробьева Ю.В., Шемякина В.П. О встречаемости резистентных к ридомилу изолятов *Phytophthora infestans* в европейской части СССР // Состояние проблемы резистентности вредителей и возбудителей болезней растений к химическим средствам защиты растений и ее преодоление. Рига, 1988. С. 87–88.
 15. Воробьева Ю.В., Шемякина В.П., Кваснюк Н.Я. Резистентность фитофторы к системным фунгицидам // Защита растений. 1990. № 6. С. 28–29.
 16. Гринько Н.Н. Резистентность возбудителя ложной мучнистой росы огурца // Защита растений. 1992. № 2. С. 14.
 17. Мелоян В.В. Результаты изучения чувствительности *Phytophthora infestans* к фунгицидам фенил-амидного ряда // Тез. докл. 8-го совещ. “Современное положение с резистентностью вредителей, возбудителей болезней растений и сорняков к пестицидам”. Уфа, 1992. С. 78–79.
 18. Иванюк В.Г., Авдей О.В. Резистентность *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary к фениламидам в Белоруссии // Мат-лы 9-го совещ. “Современное состояние проблемы резистентности вредителей, возбудителей болезней и сорняков к пестицидам в России и сопредельных странах на рубеже XXI века”. СПб., 2000. С. 59–60.
 19. Гришечкина Л.Д. Современные фунгициды для сельского хозяйства // Изв. СПбГАУ. 2008. № 10. С. 37–40.
 20. Буга С.Ф. Теоретические и практические основы химической защиты зерновых культур от болезней в Беларуси. Несвиж, 2013. 240 с.
 21. Тютюрев С.Л., Панарин Е.Ф., Новожилов К.В., Попова Э.В., Кочеткова И.С., Азанова В.В. Создание на основе антимицробного полимера катапол препарата с повышенной антигрибной активностью // Мат-лы 2-го Всерос. съезда по защите растений. СПб., 2005. Т. 2. С. 343–345.
 22. Тютюрев С.Л. Протравливание семян зерновых культур // Защита и карантин растений. 2005. № 3. С. 89–132.
 23. Тютюрев С.Л. Обработка семян фунгицидами и другими средствами оптимизации жизни растений. СПб., 2006. 248 с.
 24. Лебединцева О.В., Тютюрев С.Л., Выцкий В.А., Панарин Е.Ф., Кочеткова И.С. Экологически безопасные биологически активные пленкообразующие составы для инкрустации семян // Тез. докл. Всерос. съезда по защите растений “Защита растений в условиях реформирования агропромышленного комплекса: экономика, эффективность, экологичность” СПб., 1995. С. 426.
 25. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. М., 2019. 848 с.
 26. Гришечкина Л.Д., Долженко В.И., Силаев А.И., Здрожевская С.Д., Коренюк Е.Ф., Милютенкова Т.И. Препараты на основе флудиоксонила для защиты пшеницы яровой от семенной и почвенной инфекции // Вестн. защиты раст. 2015. Вып. 1(83). С. 31–35.
 27. Bartlett D.W., Clough J., Godfrey R.A., Godwin J.R., Hall A.A., Heaney S.P., Maund S.J. Understanding the strobilurin fungicides // J. Pest. Royal Soc. Chem. 2001. P. 143–148.
 28. Bedlan G. Studies for optimization of spraying dates to control *Pseudoperonospora cubensis* in Austria // Pflanzenschutz berichte. 1987. № 48. P. 1–11.
 29. Гришечкина Л.Д. Методическое обеспечение исследований при формировании ассортимента фунгицидов на зерновых культурах // Вестн. защиты раст. 2016. Вып. 2. С. 22–26.
 30. Гришечкина Л.Д. Агробиологическое и экотоксикологическое обоснование формирования ассортимента фунгицидов для защиты пшеницы: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: ВИЗР, 2018. 39 с.

31. Гришечкина Л.Д., Волкова Г.В., Долженко В.И. Исследование эффективности фунгицидов для защиты зерновых культур от фузариоза колоса // Докл. РАСХН. 2012. № 4. С. 13–16.
32. *Grishechkina L.D., Dolzhenko V.I.* Effective fungicides for cereal crop protection against toxicogenic fungi causing *Fusarium* head blight // Fungicides classification, role in disease management and toxicity effects. Nova, 2013. P. 105–112.
33. Гришечкина Л.Д., Долженко В.И. Эффективность и экологическая безопасность современных фунгицидов для защиты зерновых культур // Агрохимия. 2013. № 12. С. 28–33.
34. *Crummett D.* New fungicide is developed to take down rhizoctonia 2011. www.farmpgress. Com – september.
35. *Zeun R., Scallied G., Oostendorp M.* Biological activity of sedaxane – a novel broad-spectrum fungicide of seed treatment // Pest Manag Sci. 2013. V. 69. P. 527–534.
36. Гришечкина Л.Д., Силаев А.И. Карбоксамиды – эффективные средства борьбы с комплексом болезней зерновых культур // Земледелие. 2017. № 2. С. 43–46.
37. Герасимова А.В., Зенкевич С.В., Лысов А.К., Патрикеева М.В., Сухорученко Г.И. Интегрированная защита картофеля // Защита и карантин растений. 2006. № 7. С. 44–47.
38. Герасимова А.В., Долженко О.В., Гришечкина Л.Д., Сухорученко Г.И. Перспективный и экономичный прием использования инсектофунгицида Престиж, КС для защиты картофеля от комплекса болезней и вредителей в Северо-Западном регионе // Прогрессивные технологии применения средств защиты растений с целью управления и ликвидации вредных организмов, вызывающих чрезвычайные ситуации. СПб., 2010. С. 3–14.
39. Герасимова А.В., Гришечкина Л.Д., Долженко О.В., Сухорученко Г.И., Силаев А.И., Новичков О.Ю. Результативность использования инсектофунгицида Престиж в системе защиты картофеля от комплекса вредных организмов // Мат-лы 5-го Международ. научн.-практ. конф. “Агротехнический метод защиты растений от вредных организмов”. Краснодар, 2011. С. 254–257.
40. Долженко О.В., Иванова Г.П., Белых Е.Б. Эффективная технология применения препарата Престиж, КС для защиты картофеля от комплекса вредителей в Северо-Западном регионе // Прогрессивные технологии применения химических средств защиты растений с целью упреждения и ликвидации вредных организмов. СПб., 2008. С. 3–8.
41. Сухорученко Г.И., Долженко В.И., Васильева Т.И., Иванова Г.П., Зенькевич С.В., Белых Е.Б., Гончаров Н.Р. Эффективные ресурсосберегающие технологии применения препаратов тиаметоксама в борьбе с комплексом вредителей картофеля // Там же. С. 25–33.
42. Гришечкина Л.Д., Герасимова А.В., Милютенкова Т.И., Долженко В.И. Новые препараты для интегрированных систем защиты картофеля от болезней в России // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 40-летию со дня организации РУП “Институт защиты растений”. Минск, 2011. С. 72–75.
43. Гришечкина Л.Д., Буркова Л.А., Ишкова Т.И., Хилевский В.А. Сценарий Комби для предпосевной обработки семян зерновых культур // Защита и карантин раст. 2013. № 2. С. 28–29.
44. Гришечкина Л.Д., Ишкова Т.И., Долженко В.И., Силаев А.И. Селест Топ – новый препарат для защиты озимой пшеницы от фитопатогенов и фитофагов // Мат-лы VI Международ. научн.-практ. конф. “Агротехнический метод защиты растений от вредных организмов”. Краснодар, 2013. С. 60–62.
45. Ишкова Т.И., Гришечкина Л.Д., Иванов С.Г., Буркова Л.А., Силаев А.И., Кузьмина О.К. Комбинированная защита всходов рапса от вредителей и болезней // Мат-лы 5-го Международ. конф. “Агротехнический метод защиты растений”. Краснодар, 2011. С. 263–267.
46. Буркова Л.А., Белых Е.Б., Силаев А.И., Коренюк Е.Ф., Хилевский В.А., Долженко В.И. Обработка семян зерновых культур – эффективный способ борьбы с вредителями всходов // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. “Защита растений в современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур. Новосибирск, 2013. С. 64–67.
47. Гришечкина Л.Д., Долженко В.И., Силаев А.И. Биологические препараты для защиты зерновых культур от корневых гнилей // Мат-лы докл. Международ. научн.-практ. конф. “Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем”. Краснодар, 2008. Вып. 5. С. 221–224.
48. Злотников А.К. Биопрепарат Альбит для повышения урожая и защиты сельскохозяйственных культур / Под ред. Мелькумовой Е.А. Подольск, 2006. 326 с.
49. Гришечкина Л.Д., Коренюк Е.Ф., Милютенкова Т.И., Силаев А.И. Микробиологические препараты на основе *Bacillus subtilis* для защиты сельскохозяйственных культур от болезней // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 50-летию ВНИИБЗР “Биологическая защита растений, как основа экологического земледелия и фитосанитарной стабилизации агроэкосистем”. Краснодар, 2010. С. 407–409.
50. Гришечкина Л.Д. Эффективность биорациональных препаратов на основе растительных терпеноидов в борьбе с болезнями зерновых культур // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. “Инновационные технологии применения биологических средств защиты растений в производстве органической сельскохозяйственной продукции”. Краснодар, 2014. С. 227–231.
51. Долженко В.И., Гришечкина Л.Д. Экологическое обоснование защиты яблони от парши и других болезней // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 30-летию БелНИИЗР “Защита растений на рубеже XXI века”. Минск, 2000. С. 187–190.
52. Гришечкина Л.Д., Долженко В.И., Милютенкова Т.И., Боровикова Н.А. Экологическая и экономическая целесообразность защиты яблони от парши // Сб. научн. тр. Северо-Кавказского зо-

- нального НИИ садоводства и виноградарства. Краснодар, 2001. Ч. 1. С. 273–277.
53. Гришечкина Л.Д., Долженко В.И., Милютенкова Т.И. Современные фунгициды для защиты сада // Плодоводство и ягодоводство. 2012. Т. 30. С. 408–422.
 54. Долженко В.И. Фитосанитарные технологии возделывания зерновых культур // Мат-лы 4-й Международ. научн.-практ. конф. “Агротехнический метод защиты растений от вредных микроорганизмов”. Краснодар, 2007. С. 13–15.
 55. Санин С.С. Адаптивные интегрированные системы защиты сельскохозяйственных культур от болезней при интенсивном растениеводстве // Сб. тр. “50 лет на страже продовольственной безопасности страны”. Б. Вяземы, 2008. С. 602–624.
 56. Санин С.С. Фитосанитарная экспертиза – основа рациональной и экологически обоснованной защиты растений // Мат-лы 3-го Всерос. съезда по защите растений “Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем”. СПб., 2013. Т. 1. С. 272–274.
 57. Павлюшин В.А., Новожилов К.В., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И. Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем // Там же. С. 150–158.
 58. Долженко В.И., Иванова Г.П., Буркова Л.А., Белых Е.Б. Экологически малоопасные технологии применения неоникотиноидных инсектицидов на овощных культурах // Мат-лы II Всерос. съезда по защите растений “Фитосанитарное оздоровление экосистем”. СПб., 2005. Т. 2. С. 93–95.
 59. Асякин Б.П., Иванова Г.П., Белых Е.Б., Раздобурдин В.А., Гришечкина Л.Д., Фоминых Т.С., Красавина Л.П., Новикова И.И., Гуськова Л.А. Биологическая система защиты овощных культур в теплицах с приемами управления деятельностью вредных и полезных организмов. СПб.: ВИЗР, 2010. 54 с.
 60. Гришечкина Л.Д. Современный ассортимент фунгицидов для защиты сельскохозяйственных культур от болезней // Тез. семинара “Современные средства и технологии защиты основных с/х культур от вредителей, болезней и сорной растительности”. С.-Петербургский химический форум. СПб., 2010. С. 44–45.
 61. Гришечкина Л.Д. Проблемы защиты овощных культур от болезней в теплицах // Защита и карантин раст. 2011. № 2. С. 16–18.
 62. Иванова Г.П., Асякин Б.П., Белых Е.Б., Раздобурдин В.А., Гришечкина Л.Д., Фоминых Т.С., Красавина Л.П., Новикова И.И. Технология управления численностью вредных организмов овощных культур тепличных агроценозов на основе интеграции методов и средств защиты растений. Метод. рекоменд. М.: Росинформагротех, 2011. 204 с.
 63. Лысов А.К., Волгарев С.А. Прогрессивные технологии опрыскивания проходят проверку // Защита и карантин раст. 2014. № 7. С. 35.
 64. Лысов А.К. Повышение эффективности осаждения капель диспергируемой рабочей жидкости при использовании вращающихся дисковых распылителей, перфорированных или сетчатых барабанов // Вестн. защиты раст. 2016. № 4 (60). С. 61–65.
 65. Лысов А.К., Корнилов Т.В. Совершенствование технологий применения средств защиты растений методом опрыскивания // Вестн. защиты раст. 2017. № 2 (92). С. 50–53.
 66. Steffek R., Reizenzein H., Persen U. Tree-row-volume – a new way for the registration of crop protection agents in orchards // Results of 3-year field trials in Austrian apple orchards. Pflanzen schutzdienst der Lander. Deutsche phytomedizinische gesellschaft. Germany, 1998. V. 51. P. 212.
 67. Halley S., Pedersen M., McMullen M., Lucach J. Sprayer modification for enhanced control of *Fusarium* Head Blight with fungicides // National Fusarium Head Blight Forum. (Best Western Ramkota in Sioux Falls, South Dakota, USA). 1999. P. 51–52.

Development of Research on the Formation of Modern Assortment of Fungicides

L. D. Grishechkina^{a, #}, V. I. Dolzhenko^a, O. V. Kungurtseva^a,
T. I. Ishkova^a, and S. D. Zdrozhevskaya^a

^aRussian Research Institute of Plant Protection, LLC “Innovative Center for Plant Protection”
shosse Podbelskogo 3, Saint Petersburg–Pushkin-8 196608, Russia

[#]E-mail: ldg@icrz.ru

The main stages of formation of the assortment of fungicides, starting with active substances and the composition of preparative forms, are shown. The number of combined drugs increased, which significantly expanded the range of suppressed pests, reduced the likelihood of resistance formation, and reduced the pesticide pressure. The range of fungicides has become 1.4 times less dangerous for humans and warm-blooded animals in comparison with the range of 1990: the toxic load on agrobiocenosis has been reduced by 4.5 times and the average rate of application by 3.6 times. The number of pathogens increased from 39 to 75, the number of drugs – 2.3 times and the number of preparative forms – 3 times.

Key words: assortment of fungicides, plant diseases, efficiency, environmental safety.

УДК 631.445.12:622.331:581.55

ПОТОКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ РАЗНОМ РЕЖИМЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕНОКОСА НА ОСУШЕННОЙ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЕ¹

© 2020 г. А. Г. Молчанов¹, Г. Г. Суворов¹, Д. В. Ильясов¹, А. А. Сири^{1,*}¹ Институт лесоведения РАН

143030 Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, 21, Россия

*E-mail: sirin@ilan.ras.ru

Поступила в редакцию 30.12.2019 г.

После доработки 10.06.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Проведено сравнение потоков CO_2 , измеренных в 2018 и 2019 гг., на сенокосе в разное время после кошения и залежи на осушенной торфяной почве в Московской обл. Сразу после кошения в 2019 г. дыхание экосистемы (R_{eco}) и валовый обмен CO_2 экосистемы (GEE) на сенокосе снизились в 2 раза и составили 26 и $-18 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ соответственно, а удельный GEE (на надземную фитомассу) вырос в 2 раза до $0.56 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}/\text{г}_{\text{раст}}$. На залежи величины R_{eco} и GEE в 2019 г. составили 50 и $-45 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$. В 2018 г., через месяц после кошения показатели R_{eco} и GEE на сенокосе (69 и $-32 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$) и залежи (66 и -34) практически не отличались, хотя фитомасса была различной: надземная — 138 и 368, подземная — 1223 и $600 \text{ г}/\text{м}^2$. Через месяц после кошения в 2018 г. нетто-экосистемный обмен CO_2 (NEE) на сенокосе и залежи не отличался и составил 38 и $39 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$. С учетом изымаемой при кошении фитомассы общий за сезон NEE на сенокосе смешался в сторону ассимиляции CO_2 в сравнении с залежью.

Ключевые слова: осушенный торфяник, дыхание почвы, суточная динамика CO_2 , динамический камерный метод, целлюлозолитическая активность почв.

DOI: 10.31857/S0002188120090094

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что из 5 млн га земель, осушенных для сельского хозяйства в Российской Федерации, большая часть исходно имела торфяные почвы [1], а значительную долю торфяников, частично выработанных при добыче торфа, также рекультивировали для этих целей [1–3]. В результате под нужды сельского хозяйства в стране была осушена значительная площадь торфяных болот [4], которые использовали под пропашные культуры, сенокосы и пастбища [1, 2, 5]. В последние десятилетия многие из них, вне зависимости от категории пользователей, были заброшены, стали объектами торфяных пожаров [6], подвергаются

ветровой и водной эрозии. Они являются источником парниковых газов и теряют запасы углерода [7–9], не принося экономической пользы.

В настоящее время происходит возвращение части осушенных земель в сельскохозяйственный оборот, что особенно актуально в связи с обеспечением кормовой базы животноводства. Это поднимает вопрос об эмиссии парниковых газов этой категории земель. Осушенные торфяники — значительный источник диоксида углерода в атмосферу [10, 11] и объект учета, согласно Рамочной конвенции ООН об изменении климата [12].

С точки зрения сохранения физико-химических свойств торфяной залежи наиболее щадящим ее использованием является луговое хозяйство [11, 13, 14]. Наименьшие потери углерода таких почв характерны при лугово-полевом севообороте и многолетней травяной растительности [15], а при регулировании водного режима возможна их высокая продуктивность для производства кормов [14]. Залужение может препятствовать деградации осушенных торфяных почв [16], а их паст-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке проекта “Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата”, финансируемого в рамках “Международной климатической инициативы” Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K “Восстановление торфяных болот”) и проекта РНФ 19-74-20185.

бищенное и сенокосное использование в сравнении с распахкой – снижать потери углерода в 3–4 раза, азота – в 2 раза [11].

Отечественными исследованиями проблеме эмиссии парниковых газов из осушенных торфяных почв уделяется существенно меньше внимания, как по сравнению с естественными болотами, так и минеральными сельскохозяйственными почвами [17–22]. Осушенные торфяные почвы в России и странах ближнего зарубежья изучены меньше и в контексте углеродного баланса [7–9, 14, 15, 23–27], чем минеральные или неосушенные торфяные, хотя содержат значительный запас углерода, более уязвимый, чем в естественных болотах. Цель работы – сравнение потоков CO₂ сенокоса на осушенной торфяной почве в Московской обл. в условиях залежи и в разное время после сенокосения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на Дубненском болотном массиве в Талдомском р-не Московской обл. (56°39.4′–56°43.6′ с.ш., 37°42.8′–37°54.6′ в.д., протяженность 8 км с севера на юг и 12 км с запада на восток). Из общей площади торфяника ≈8200 га частично осушено ≈2850 га для разных видов использования: добычи торфа, сельского и лесного хозяйства. Сохранились разнообразные естественные болотные биогеоценозы – от верховых кустарничково-сфагновых сосняков до низинных черноольшаников. Осушение проводили в конце 1970-х годов для добычи торфа фрезерным способом. Расстояние между картовыми каналами было преимущественно 40 м, а после выработки залежи на глубину 1–2 м многие площади были рекультивированы под пропашные культуры, однако в большей части залужены для создания сенокосов [7, 8]. Торфяные пожары 2010 г., которые охватили торфяники области [28], мало коснулись массива, но часть его была включена в программу обводнения пожароопасных торфяников Московской области 2010–2013 гг. с созданием переливных и водорегулирующих плотин, противопожарного водоема и др. [6, 29].

Объекты исследования расположены в южной части массива (56°40.6′ с.ш., 37°48.8′ в.д.), где вторичное обводнение не проводили, а осушенные площади все активнее используют как сенокосы. По имеющимся данным, торфяная залежь была выработана здесь на глубину, вероятно, 0.5–1.0 м; современная глубина осушительных каналов составляет 0.8–1.5 м, а края каналов заросли древесно-кустарниковой растительностью высотой 2–12 м.

Работы проводили на двух соседних картах шириной 50 и 110 м, из которых южную косили каждый год, а северная с 2015 г. и до конца лета 2019 г. была залежной и зарастала рудеральной растительностью, преимущественно крапивой (*Urtica dioica* L.), вытесняющей основную луговую культуру – мялик (*Poa pratensis* L.). Для анализа распределения растительности использовали актуальные спектрзональные спутниковые данные и съемку с БПЛА в видимом диапазоне.

Через оба участка был проведен нивелировочный профиль. Для измерения уровней почвенно-грунтовых вод (УПГВ) в центре участков были установлены перфорированные на всю глубину (100 см) трубки из ПВХ Ø50 мм [30], на залежи – дополнительно автоматический датчик Mini Diver (Eijkelkamp, Нидерланды) с записью УПГВ и температуры воды с частотой 4 ч с охватом вегетационных сезонов 2018 и 2019 гг. Для характеристики метеоусловий периодов измерений были использованы данные сайта www.rp5.ru (ООО “Расписание Погоды”, Санкт-Петербург, Россия) для метеостанции г. Дмитров.

На обоих участках были заложены разрезы до глубины 50 см, из которых с шагом 5 см взяты образцы торфа на влажность, зольность, объемный вес, ботанический состав и элементный состав (CNS-анализ). Влажность почвы определяли термовесовым методом, плотность сложения – в абсолютно сухих образцах 5 × 5 × 5 см, зольность – озолением при температуре 850°C, ботанический состав и степень разложения торфа – микроскопическим методом и центрифугированием, содержание C, N и S – на элементном анализаторе Vario MICRO cube (Elementar, Германия) при сгорании образца при $t = 1140^{\circ}\text{C}$, разделении газов с помощью метода программируемой ступенчатой десорбции (TPD – Temperature Programmed Desorption) в двукратной повторности.

Интенсивность разложения органического вещества в почве оценивали весовым методом по убыли массы хлопчатобумажной ткани [31], экспонированной в почве с 27.07.2019 по 01.09.2019. Для этого к стенке прикопок (по 2 на участке сенокоса и залежи) были прижаты стеклянные пластины, с закрепленными при помощи полимерной сетки тремя отрезками хлопчатобумажной ткани высотой 10 и шириной 15 см так, что они были экспонированы на глубинах 0–10, 10–20 и 20–30 см. Ткань предварительно прокипятили, высушили до воздушно-сухого состояния и взвесили на аналитических весах. По завершении эксперимента образцы ткани повторно промыли, высушили и взвесили.

Фитомассу растений (с пересчетом на сухое вещество после сушки при температуре 105°C) определяли в двукратной повторности: надземную (**НФМ**) методом “укосных квадратов” (площадь рамки 0.49 м²), подземную (**ПФМ**) промыванием корней почвенных образцов (10 × 10 × 20 см) на сите с размером ячейки 2 мм для верхнего почвенного горизонта 0–10 см [32]. Индекс листовой поверхности (Leaf area index – **LAI**) рассчитывали как отношение площади листьев к площади их произрастания. Площадь листьев определяли по палетке в выбранной навеске, после чего пересчитывали на общую массу укоса.

Потоки диоксида углерода измеряли в близкие даты 2018 и 2019 гг. – 27–28.08 и 28–29.08 соответственно. В эти же дни 1 раз в час автоматически датчиками Thermochron iButton DS1921 (Dallas Semiconductor, США) на глубине 5, 10 и 20 см измеряли температуру почвы. Температуру и влажность воздуха, а также фотосинтетически активную радиацию (плотность фотосинтетического фотонного потока) измеряли 1 раз в минуту сенсором Minikin QTH (EMS Brno, Чехия). В 2018 г. измерения потоков на сенокосе выполнены спустя 1 мес. после кошения, в 2019 г. – на следующий день. Измерения проводили на участках с доминированием мятлика; в 2018 г. с разделением на высокий (~50 см) и низкий (~25 см) травостой. Потоки CO₂ измеряли одновременно на залежи и сенокосе методом динамических камер [33] разного размера и круглого сечения, из прозрачного пластика толщиной 0.5 мм с использованием инфракрасных газоанализаторов LI-820/840 (Li-Cor, США).

Регистрацию концентраций CO₂ проводили непрерывно с помощью оригинального автоматического устройства на основе трехходовых переключателей, благодаря которым воздух через камеры проходил непрерывно. Показания регистрировали логгером круглосуточно (EMS, Чехия) каждые 5 с автоматическим сохранением каждые 20–30 с. Переключение между камерами было автоматическим, время “опроса” – 20–30 мин. Для расчетов концентрации CO₂ использовали разность средней (за 2 мин) величины в поступающем и выходящем из камеры воздухе. Поток CO₂ (мг С/м²/ч) рассчитывали по формуле (подробнее методика и схема измерений представлена в [34]):

$$F = (106 \times 273 \times V([\text{CO}_2\text{к}] - [\text{CO}_2\text{а}])) / (22.4 \times 100(273 + T)S \times 60), \quad (1)$$

где V – скорость потока воздуха через экспозиционную камеру, л/мин, T – температура воздуха, °C, S – площадь поверхности почвы под камерой,

см². Нетто-экосистемный обмен (Net ecosystem exchange – **NEE**) или чистый обмен CO₂ между экосистемой и атмосферой (отрицательные величины **NEE** соответствуют стоку CO₂ из атмосферы, положительные – источнику) измеряли прозрачными камерами Ø25 см и высотой 50 и 30 см для высокого и низкого травостоя мятлика (в 2018 г.) соответственно. В 2019 г. измерения были проведены только на участках высокого травостоя на залежи и сформировавшегося непосредственно после кошения травостоя на сенокосе. Дыхание почвы (R_{soil}) – совокупное гетеротрофное дыхание почвы и подземных частей растений – измеряли прозрачными камерами высотой 15 см и Ø20 см после срезания растений. Через отверстия в камерах (5 шт. Ø1 см на высоте 5 см от поверхности почвы) поддерживали постоянный приток атмосферного воздуха (без создания пониженного давления внутри камеры), скорость которого составила: 4.2, 3.5 (**NEE**, 50 и 30 см камеры, соответственно) и 2.1 (R_{soil}) л/мин. Воздух отбирали спаренным микрокомпрессором (Sonic-388, Китай) в верхней части камеры при помощи гермоввода через полимерный шланг. На каждом участке была установлена камера для контрольного определения атмосферной концентрации CO₂ в течение 1 сут. Все камеры располагались на сенокосе и залежи не далее 1 м друг от друга.

По данным измерений **NEE** и R_{soil} было рассчитано дыхание экосистемы (R_{eco}) – совокупное гетеротрофное дыхание почвы, подземных и надземных частей растений по формуле:

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{soil}} + R_{\text{plant}}^*, \quad (2)$$

где R_{soil} – измеренное дыхание почвы, R_{plant}^* – среднее дыхание надземных частей растений, рассчитанное на основе ночных измерений **NEE** и R_{soil} . Дыхание надземных частей растений R_{plant} , используемое в формуле (2), было рассчитано как разность между средним (за одинаковые промежутки времени) дыханием экосистемы (R_{eco}) и дыханием почвы (R_{soil}) по формуле:

$$R_{\text{plant}} = \text{NEE}^* - R_{\text{soil}}^*, \quad (3)$$

где **NEE*** – нетто-экосистемный обмен ночью (измерения ночью – в отсутствии фотосинтетической активности растений, де-факто характеризующего R_{eco}), R_{soil}^* – дыхание почвы ночью. Расчет валового газообмена экосистемы (Gross ecosystem-atmosphere exchange of carbon dioxide – **GEE**) – общей фотосинтетической ассимиляции экосистемы или количества CO₂, которое погло-

тила экосистема за единицу времени, проводили по формуле:

$$GEE = NEE - R_{\text{cco}}, \quad (4)$$

где NEE – измеренный дневной нетто-экосистемный обмен, R_{cco} – расчетное дыхание экосистемы. Обработку данных полевых и лабораторных измерений (корреляционный анализ, расчет средних и стандартных отклонений, множественная линейная регрессия) проводили в программе Excel. По данным измерений были также рассчитаны суммарные за 1 сут потоки CO_2 с использованием метода бутстрапа [35] в программе MATLAB R2010b (количество бутстрап-повторений 5000). В каждом бутстрап-повторении для потоков CO_2 с учетом погрешности измерений была получена случайная реализация их величин. При допущении об их нормальном распределении рассчитывали подинтегральную площадь, среднее арифметическое и стандартное отклонение реализаций суточной оценки, полученных в отдельных бутстрап-повторениях. При аппроксимации динамики потока за 1 сут использовали линейную интерполяцию.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика участков. На залежи преобладала крапива двудомная и мятлик луговой, проективное покрытие которых менялось в течение вегетационного сезона: в начале лета преобладал мятлик, к концу – крапива. На сенокосе представлен исключительно мятлик. Оба участка имеют ровную поверхность с перепадом высот до 20–30 см; среднее относительное превышение залежи над сенокосом равно 10 см. На обоих участках УПГВ весной и осенью равен 50–60 см, летом в периоды без дождей – 80–90 см.

Метеоусловия. Лето 2018 г. (01.06–01.09) было теплым и сухим: средняя, минимальная и максимальная температуры ($^{\circ}\text{C}$) воздуха ($T_{\text{возд}}$) составили 18.2, 3.5 (09.06), 29.5 (29.08), количество осадков – 130 мм, дней с осадками – 39. Лето 2019 г. было холодным и влажным: средняя, минимальная и максимальная $T_{\text{возд}}$ составили 16.3, 6.0 (05.08 и 29.08) и 30.0 (07.06), осадки – 294 мм, дней с осадками – 66. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) за лето в 2018 г. – 1641, в 2019 г. – 1483 $^{\circ}\text{C}$.

Почвенные условия. На залежи и сенокосе представлены осушенные низинные торфяные почвы. Ботанический состав торфа верхних 10 см отражает современную растительность: преобладают остатки корней злаков и крапивы (на залежи). Глубже – низинные древесно-травяные и древесные торфа: преобладают остатки ольхи, встреча-

ются остатки березы, ивы, сосны и ели, отмечен эпидермис осок и камыша. Степень разложения на залежи и сенокосе менялась слабо: в среднем 35 и 50% в слое 0–30 см; 55 и 75% в слое 30–50 см соответственно. Влажность торфа (%) варьировала от (150 ± 84) – (178 ± 43) в верхнем (0–20 см) до (280 ± 134) – (340 ± 20) в нижнем (30–50 см) слое и плавно росла с глубиной на обоих участках (рис. 1). Плотность сложения существенно не менялась по профилю и варьировала от 0.19 ± 0.06 до 0.27 ± 0.04 г/см³ на обоих участках. Зольность в слое 0–20 см была немного меньше на сенокосе, чем на залежи (24 ± 8 и $39 \pm 1\%$), а в слое 30–50 см наоборот – 21 ± 2 и $8 \pm 1\%$. Незначительное повышение зольности на глубинах 30–50 см на сенокосе в сравнении с залежью слабо отражалось на содержании С и N в этом горизонте: 42–47 и 2.6–2.5% соответственно. В слое 40–50 см отмечено незначительное повышение содержания серы на сенокосе в сравнении с залежью – 0.8 и 0.5% соответственно. Отношение С : N не отличалось на сенокосе и залежи и слабо росло с глубиной: от 13.6 (0–10 см) до 19.3 (40–50 см) в среднем на обоих участках.

Подземная и надземная фитомасса. На рис. 2 показаны изменения НФМ на залежи и сенокосе в 2019 г. в пересчете на сухое вещество. Вертикальной сплошной линией отмечена дата кошения на сенокосе – 24.08.19. На залежи 27.09.19 (пунктирная линия) впервые за несколько лет было проведено кошение для улучшения состояния травостоя. НФМ до кошения в 2019 г. слабо отличалась на обоих участках: возрастала с 24 в апреле до 267 г/м² в июне на залежи и с 39 в апреле до 199 г/м² в июле на сенокосе. После кошения 24 августа НФМ на сенокосе составила 32, спустя месяц, 27 сентября – 72 г/м². В 2018 г. при более раннем кошении (28 июля) НФМ спустя 1 мес. (28 августа) на сенокосе составила 138 г/м², т.е. в значительной степени восстановилась (например, в мае и июле 2019 г. она была лишь незначительно больше – 177 и 199 г/м² соответственно). В августе 2018 г. НФМ на залежи составляла 368 г/м².

ПФМ в верхних 10 см почвы в среднем за период с июня по сентябрь была в 2 раза больше (1220 г/м²) на сенокосе, чем на залежи (600 г/м²). Отмечено ее снижение на обоих участках от июня к сентябрю. Определение ПФМ проводили без разделения на мертвые и живые корни, поэтому, возможно, снижение величины ПФМ связано с преобладанием разложения мертвых корней над ростом живых.

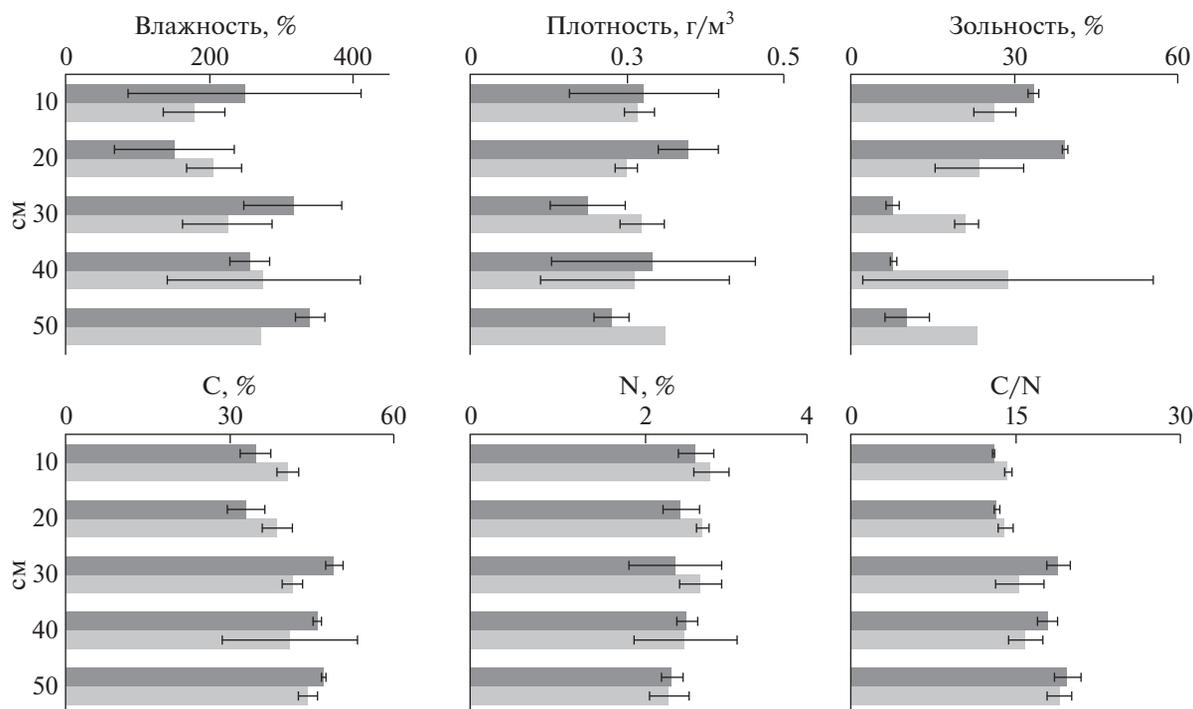


Рис. 1. Влажность, плотность сложения и зольность почвы, содержание углерода, азота в почве, соотношение С : N: залежь – темный тон, сенокос – светлый. То же на рис. 2–10.

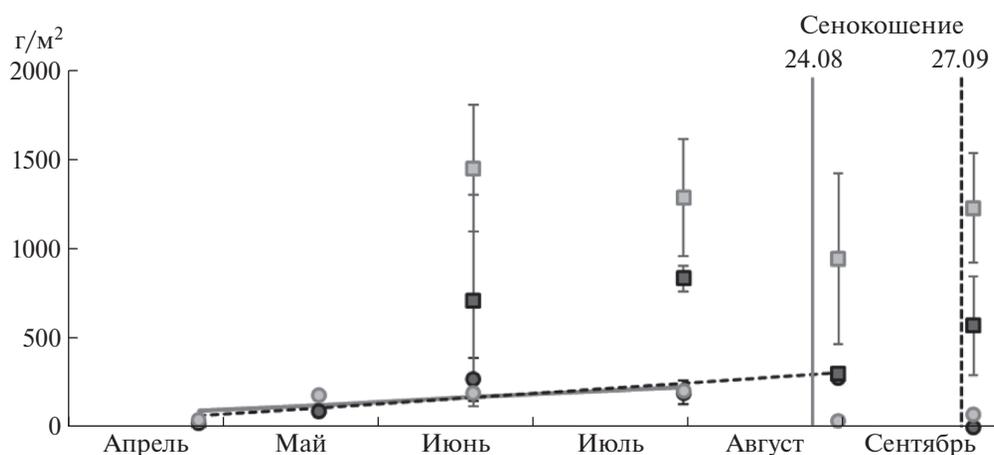


Рис. 2. Накопление надземной (круг) и подземной (квадрат) фитомассы растений на залежи и сенокосе (2019 г.).

Ранее (05.09.2008 г.) на неиспользуемом сенокосе в другой части этого массива НФМ составила 490, ПФМ (в слое 0–10 см) – 914 г/м². Там же 25.09.2015 г. НФМ была равна 358 г/м² [8], что близко полученным данным. Для сравнения, на сенокосных лугах в Костромской обл. НФМ составляла 147–324, а ПФМ – 647–1750 г/м² [36]; на сенокосе выработанного низинного торфяника в Кировской обл. – 185 и 1580 г/м² (слой 0–20 см) соответственно [37].

Показатель LAI на залежи в 2018 г. составил 2.5 для низкого и 3.9 для высокого травостоя, а на сенокосе – 1.5 и 1.8 соответственно. В 2019 г. этот показатель составил для залежи и сенокоса (после кошения) 1.3 и 0.5 соответственно. Полученные оценки LAI хорошо соотносятся с НФМ этих лет.

Целлюлозолитическая активность почвы. Потери органического вещества (%) в верхних 10 см были сопоставимы на сенокосе (19.6 ± 3.8) и залежи (12.9 ± 4.7), однако в среднем для слоя 0–30 см

Таблица 1. Целлюлозолитическая активность в профиле торфяной почвы на залежи и сенокосе, % потери массы целлюлозного полотна за 30 сут экспозиции

Слой, см	Залежь	Сенокос
0–10	12.9 ± 4.7	19.6 ± 3.8
10–20	21.2 ± 4.0	2.8 ± 2.1
20–30	9.2 ± 5.0	2.1 ± 1.2
Среднее	14.4 ± 1.2	8.2 ± 2.4

оказались меньше на сенокосе (8.2 ± 2.4), чем на залежи (14.4 ± 1.2) (табл. 1). Эти величины согласуются с данными для осушенных торфяников в конце периода вегетации [31]. Возможно, бóльшая скорость разложения на сенокосе в слое 0–10 см могла быть обусловлена в 2 раза большей массой корней: обитающие в прикорневой зоне микроорганизмы, лучшая аэрация и прогрев почвенного профиля способствовали интенсификации процессов разложения органического вещества. Это предположение подтверждено более интенсивным дыханием почвы на сенокосе в 2018 г.: после кошения почва прогревалась лучше, чем на

залежи, что могло стимулировать корневое дыхание и разложение мертвых корней.

Нетто-экосистемный обмен (NEE). Показатель NEE в 2018 г. на залежи с высоким травостоем составлял ночью в среднем 4.0 и днем до -1.5 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. Для низкого травостоя наблюдали эмиссию CO_2 как ночью, так и днем (в среднем за 1 сут -1.5 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$) (рис. 3). Изменения $T_{\text{возд}}$ в течение суток достигали 20°C . Величина NEE была обратно пропорциональна $T_{\text{возд}}$ и ФАР, что было особенно характерно для высокого травостоя. В 2018 г., через 1 мес. после кошения, на сенокосе с высоким травостоем наблюдали эмиссию CO_2 ночью (≈ 2.0 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$) и поглощение днем (до -1.0), с низким травостоем – эмиссию CO_2 в течение суток (≈ 2.5 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$).

В 2019 г. на залежи происходила эмиссия CO_2 и ночью (≈ 4.0 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$) и днем (≈ 0.5 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$), только в утренние часы (7:00–9:00) было отмечено поглощение до -0.6 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. В среднем за 1 сут залежь характеризовалась потерями углерода (≈ 1.0 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$). Суточные изменения $T_{\text{возд}}$ на

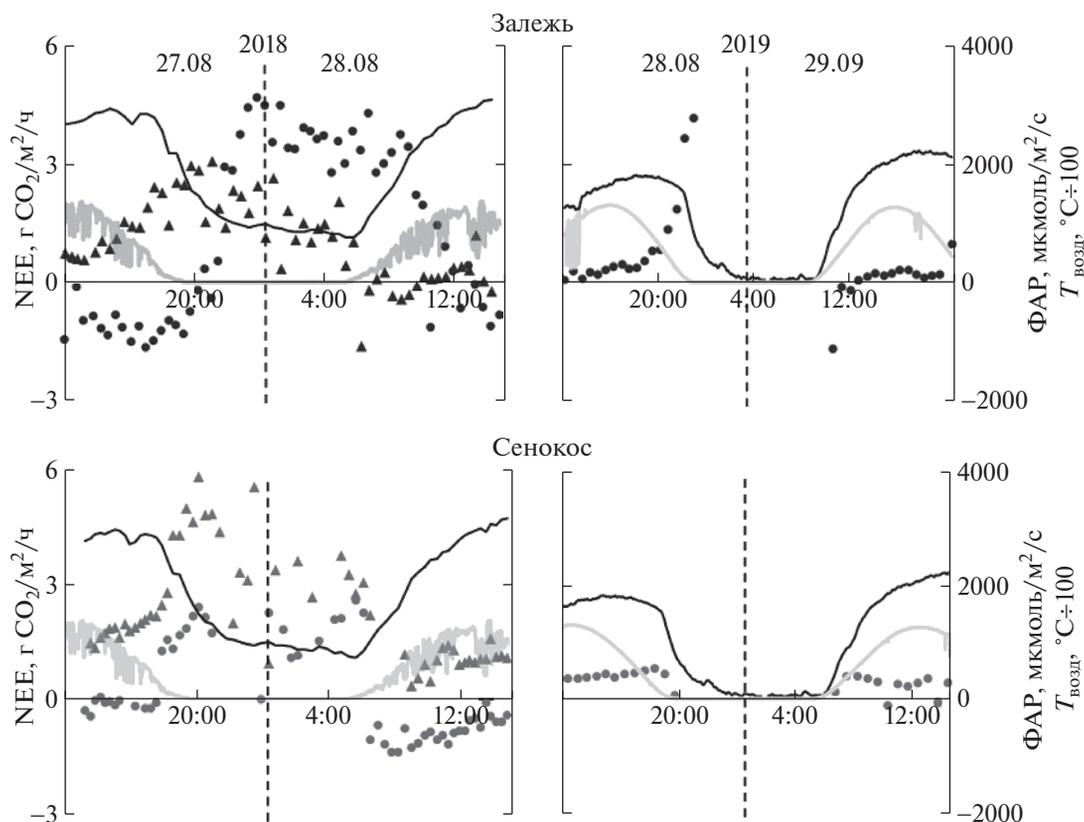


Рис. 3. Нетто-экосистемный обмен (NEE) на залежи и сенокосе спустя 1 мес. (27–28.08.2018) и сразу после кошения (28–29.08.2019); треугольники – низкий травостой, точки – высокий. Черная линия – температура почвы, серая – ФАР, пунктир – граница суток (00:00). То же на рис. 4.

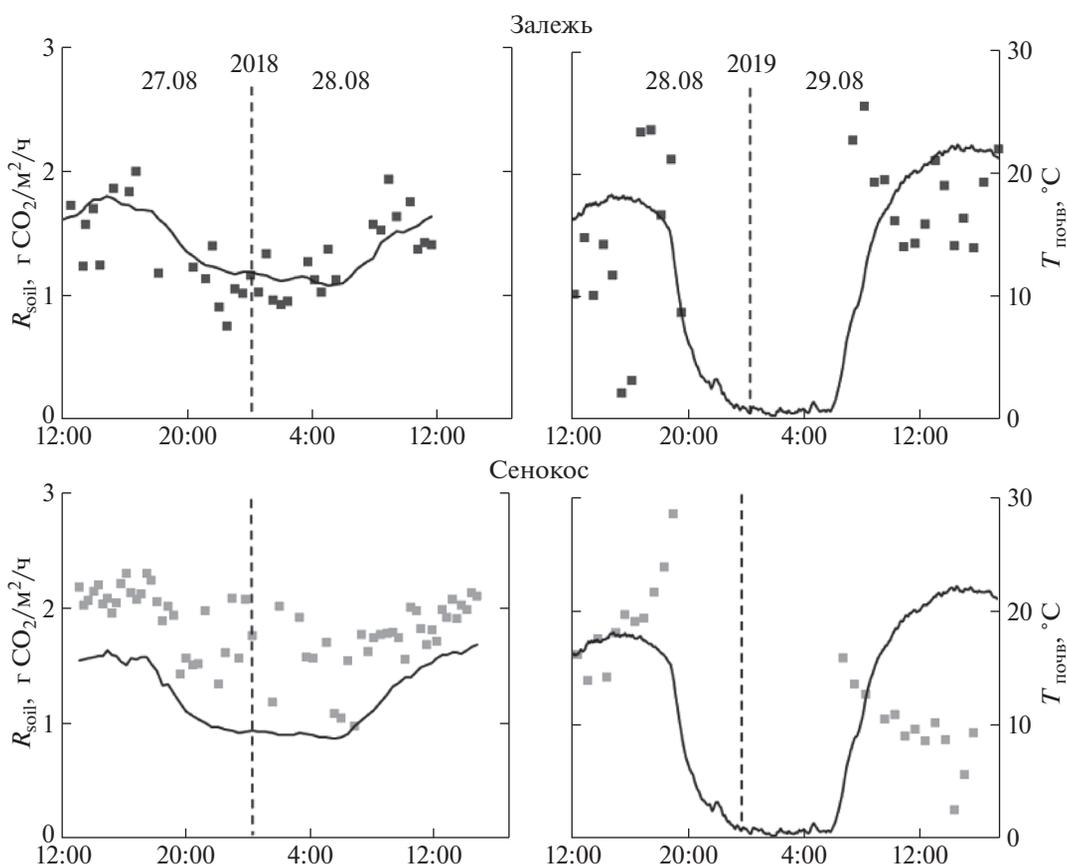


Рис. 4. Дыхание почвы на залежи и сенокосе через 1 мес. (27–28.08.2018) и сразу после кошения (28–29.08.2019).

залежи также составили 20°C , хотя средняя температура была на 10°C меньше, чем в 2018 г. На сенокосе сразу после кошения отмечена эмиссия CO_2 как ночью ($\approx 0.6 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$), так и днем ($\approx 0.5 \text{ г}$), суточная динамика была выражена слабо. Суточные изменения $T_{\text{возд}}$ и ФАР не оказывали значительного влияния на величину NEE.

Дыхание почвы (R_{soil}). Показатель R_{soil} в 2018 г. менялся в течение 1 сут в пределах $0.7\text{--}2.0$ и $1.0\text{--}2.3 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ на залежи и сенокосе соответственно, в 2019 г. – в пределах $0.2\text{--}2.5$ и $0.3\text{--}2.9 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. В 2018 г. суточная динамика R_{soil} и $T_{\text{почв}}$ на глубине 5 см были идентичными (рис. 4). На сенокосе R_{soil} было больше примерно на 25%, что, возможно, связано с более интенсивным дневным прогревом почвы или большей корневой биомассой. В 2019 г. суточная динамика R_{soil} в меньшей степени совпадала с $T_{\text{почв}}$.

Среднее за 1 сут R_{soil} в 2019 г. было больше на сенокосе ($1.8 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$), чем на залежи ($1.3 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$), что может объяснить различиями в ПФМ (1223 и 604 г/м^2 в среднем в течение сезона). Большая почти в 2 раза ПФМ на сенокосе

могла быть обусловлена увеличением ассимиляции углерода растениями при регулярном кошении. Растения накапливают не только дополнительную НФМ, изымаемую при сенокосе, но и ПФМ. Корни растений, отмирая и разлагаясь, увеличивали показатель R_{soil} .

Валовый обмен CO_2 экосистемы (GEE), дыхание экосистемы (R_{eco}) и растений (R_{plant}). В 2018 г. средний GEE составил -0.8 для низкого и $-1.7 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ для высокого травостоя на залежи ($n = 34$); -1.8 и -1.9 для низкого и высокого травостоя на сенокосе ($n = 52$). При осреднении величин использованы одинаковые промежутки времени: 28.08.2018, 13:00–29.08.2018, 14:00 (за исключением ночи – до и после заката солнца) и 28.08.2019, 8:00–29.08.2019, 17:00. Несмотря на превышение НФМ на залежи в 2.7 раза над сенокосом (368 и 138 г/м^2 соответственно), величины GEE на площадь произрастания были близкими. Средняя величина R_{eco} (или ночной NEE) в 2018 г. на низком и высоком травостое залежи ($n = 34$) составила 1.9 и $3.6 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$, а на сенокосе ($n = 62$) – 1.9 и $4.0 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. R_{eco} не отличалось по величине

Таблица 2. Коэффициенты уравнений зависимости потоков CO₂ от факторов среды

Коэффициент	Залежь		Сенокос	
	травостой			
	низкий	высокий	низкий	высокий
GEE от температуры воздуха и ФАР				
<i>a</i>	$-2 \times 10^{-3} \pm 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3} \pm 1 \times 10^{-3}$	$-2 \times 10^{-3} \pm 0 \times 10^{-3}$	$-1 \times 10^{-3} \pm 0 \times 10^{-3}$
<i>b</i>	$6 \times 10^{-2} \pm 4 \times 10^{-2}$	-1.0 ± 0.1	$7 \times 10^{-2} \pm 2 \times 10^{-2}$	$-1 \times 10^{-2} \pm 2 \times 10^{-2}$
<i>c</i>	-1.6 ± 1.4	11.8 ± 1.5	-3.0 ± 0.4	-1.4 ± 0.4
<i>R</i> ²	0.24	0.88	0.38	0.41
NEE от температуры почвы, воздуха и ФАР (день)				
<i>a</i>	$-1 \times 10^{-3} \pm 0 \times 10^{-3}$			
<i>b</i>	1.0 ± 0.2	-0.3 ± 0.3	1.0 ± 0.6	0.7 ± 0.6
<i>c</i>	-0.3 ± 0.1	-0.2 ± 0.1	-0.3 ± 0.2	-0.3 ± 0.2
<i>d</i>	-7.8 ± 1.9	7.8 ± 2.4	-2.9 ± 3.5	-1.2 ± 3.4
<i>R</i> ²	0.63	0.84	0.50	0.69
<i>R</i> _{eco} от температуры почвы и воздуха (ночь)				
<i>a</i>	0.5 ± 0.4	1.9 ± 0.8	-0.1 ± 2.2	0.8 ± 1.2
<i>b</i>	-0.3 ± 0.1	-1.0 ± 0.3	0.1 ± 0.8	-0.3 ± 0.4
<i>c</i>	-2.1 ± 3.4	-9.3 ± 6.1	3.8 ± 13.2	-2.7 ± 7.1
<i>R</i> ²	0.22	0.53	0.07	0.05
<i>R</i> _{soil} от температуры почвы				
<i>a</i>	0.1 ± 0.1		0.1 ± 0.1	
<i>b</i>	0.2 ± 0.1		0.6 ± 0.1	
<i>R</i> ²	0.56		0.69	

не на залежи и сенокосе, однако менялся вклад составляющих его компонентов: в первом случае преобладало дыхание растений, во втором – дыхание почвы, особенно на сенокосе с низким травостоем, где R_{soil} практически равнялось R_{eco} . Среднее дыхание растений (R_{plant}) в 2018 г. для залежи с низким травостоем составило 0.5, с высоким – 2.3 г CO₂/м²/ч, на сенокосе – 0.1 и 2.2 г CO₂/м²/ч соответственно.

Непосредственно после кошения на сенокосе в 2019 г. GEE для высокого травостоя отличался на залежи и сенокосе: –2.7 и –1.1 г CO₂/м²/ч, соответственно. В сравнении с 2018 г. GEE на сенокосе был меньше в 1.6 раза, хотя НФМ сократилась после кошения практически в 6 раз. В 2019 г. R_{eco} на залежи составило 3.2 г CO₂/м²/ч (сопоставимо с высоким травостоем на залежи в 2018 г.), а на сенокосе после кошения – 1.7 г CO₂/м²/ч, что сопоставимо с низким травостоем на сенокосе в 2018 г. (рис. 3). Величина R_{plant} в 2019 г. составила 1.7 г CO₂/м²/ч для залежи, что сравнимо с резуль-

татами 2018 г. при высоком травостое, и 0.3 г CO₂/м²/ч для сенокоса, что сравнимо с результатами 2018 г. при низком травостое.

Зависимость GEE, NEE, R_{eco} и R_{soil} от температуры воздуха, почвы и ФАР. По данным 2018 г. для сенокоса (через месяц после кошения) и залежи были получены коэффициенты регрессионного уравнения (табл. 2):

$$GEE = a \times \text{ФАР} + b \times T_{\text{возд}} + c, \quad (5)$$

где GEE – валовый обмен CO₂ экосистемы, г CO₂/м²/ч; *a*, *b*, *c* – безразмерные коэффициенты для ФАР, температуры воздуха и пересечения с осью ординат соответственно; $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, °С; ФАР – фотосинтетически активная радиация, мкмоль/м²/с.

Установлена обратная связь (R^2) GEE с ФАР – при росте ФАР GEE принимает “более” отрицательные величины, что свидетельствовало об увеличении фотосинтетической активности растений, и убывает в ряду: сенокос–высокий травостой

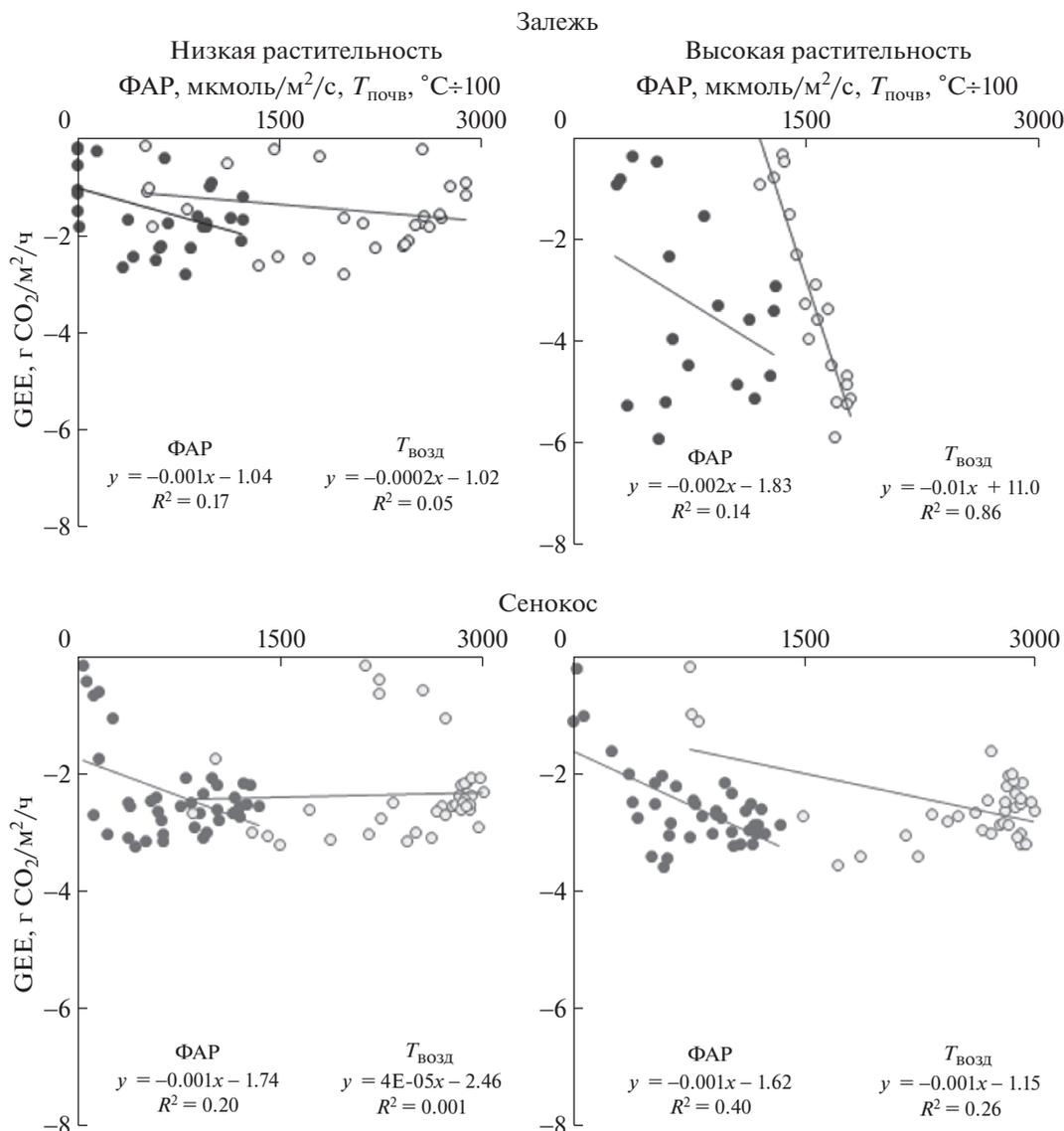


Рис. 5. Связь GEE с ФАР (точки) и температурой воздуха (светлые точки) на залежи и на сенокосе с низким и высоким травостоем.

стой (0.40), сенокос—низкий травостоем (0.20), залежь—низкий травостоем (0.17), залежь—высокий травостоем (0.14) (рис. 5). Значимая корреляция была характерна только для высокого травостоя на сенокосе. Возможно, меньшее самозатенение растений определяло в этом случае более явный отклик на изменение поступающей радиации, тогда как на залежи только часть незатененных растений была способна отреагировать на изменение ФАР. Связь GEE с $T_{\text{возд}}$ была прямой для высокого травостоя и отсутствовала для низкого. R^2 убывал в ряду: залежь—высокий травостоем (0.86), сенокос—высокий травостоем (0.26), залежь—низкий травостоем (0.05), сенокос—низкий травостоем (0.001). На залежи и сенокосе с высо-

ким травостоем температура воздуха влияла сильнее, чем ФАР. Таким образом, более точно могут быть предсказаны GEE на сенокосе и залежи с высоким травостоем.

Согласно результатам регрессионного анализа, в дневное время (с 5:00 до 19:00) величина NEE зависела от ФАР, температуры почвы и воздуха. Коэффициенты уравнения (6) даны в табл. 2:

$$NEE = a \times \text{ФАР} + b \times T_{\text{почв}} + c \times T_{\text{возд}} + d, \quad (6)$$

где NEE — нетто—экосистемный обмен, г CO₂/м²/ч, $a-d$ — безразмерные коэффициенты для ФАР, температуры почвы, воздуха и пересечения с осью ординат, ФАР — фотосинтетически актив-

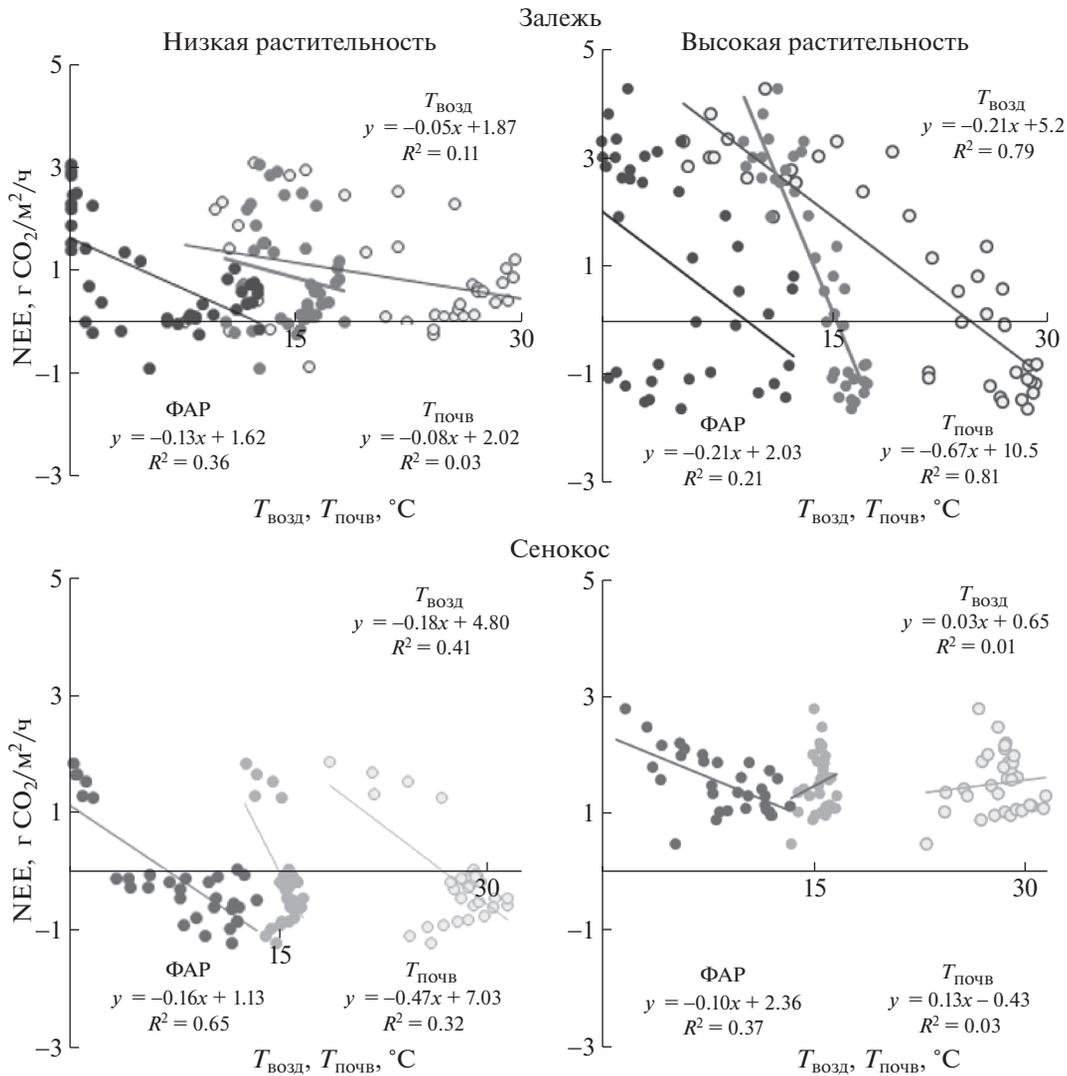


Рис. 6. Корреляция дневного NEE с температурой почвы на глубине 5 см (светлые точки), воздуха (выколотые точки) и ФАР (точки) на залежи (сверху) и на сенокосе (снизу) на участках с низким (слева) и высоким (справа) травостоем.

ная радиация, $\text{мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$, $T_{\text{почв}}$ — температура почвы, $^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{возд}}$ — температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Связь NEE с ФАР, как и для GEE, была обратной: при росте ФАР NEE принимает “более” отрицательные величины, что говорит о существенном вкладе GEE в нетто-экосистемный обмен. NEE демонстрирует аналогичную с GEE зависимость от $T_{\text{почв}}$ и $T_{\text{возд}}$. Связь (R^2) NEE с ФАР убывает в ряду: сенокос—высокий травостой (0.65), сенокос—низкий травостой (0.37), залежь—низкий травостой (0.36), залежь—высокий травостой (0.21) (рис. 6). Значимая корреляция характерна для сенокоса с высоким травостоем, а для сенокоса и залежи с низким травостоем находится на границе значимости. Зависимость NEE от ФАР подтверждена показанной ранее связью GEE и ФАР, однако требует дальнейшей проверки для

низкого травостоя на сенокосе. Для высокого травостоя на сенокосе это также касается связи NEE с температурой почвы и воздуха.

Связь (R^2) NEE с температурой почвы убывала в ряду: залежь—высокий травостой (0.81), сенокос—высокий травостой (0.32), на залежи и сенокосе с низким травостоем связь отсутствовала (0.03). Связь NEE с температурой воздуха была наибольшей на участках с высоким травостоем: 0.79 и 0.41 и отсутствовала на участках с низким травостоем (0.11 и 0.01 — залежь и сенокос соответственно). Во всех случаях, кроме низкого травостоя на сенокосе, характерно смещение NEE в сторону ассимиляции при повышении ФАР и температуры. Это связано со значительным вкладом GEE в NEE (в сравнении с R_{eco}), что обусло-

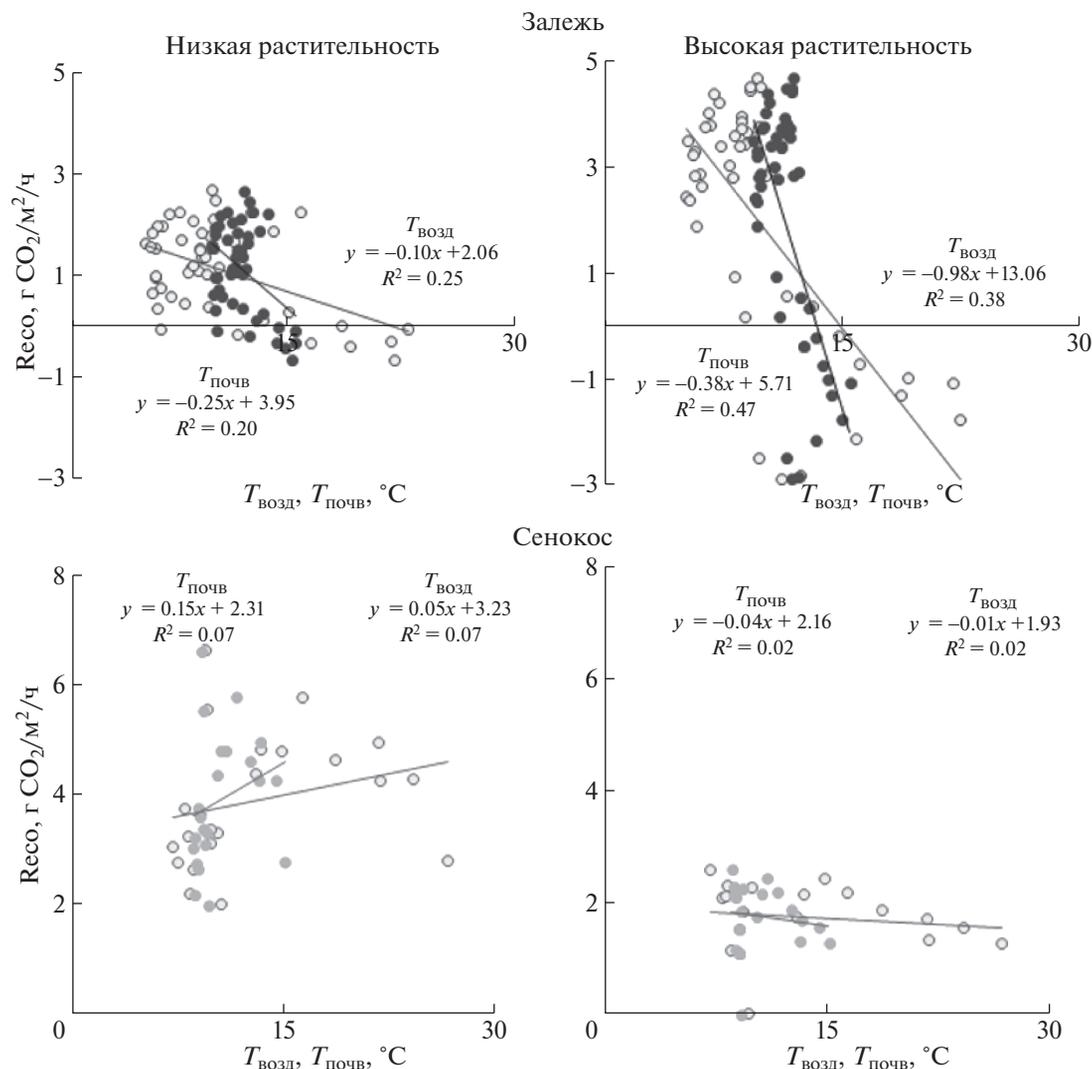


Рис. 7. Связь ночного NEE (R_{eco}) с температурой почвы (точки) и воздуха (выколотые точки) на залежи (сверху) и на сенокосе (снизу) на участках с низким (слева) и высоким (справа) травостоем.

вило варьирование газообмена сенокоса и залежи при изменениях ФАР.

Для ночных потоков NEE, характеризующих R_{eco} (дыхание экосистемы) в отсутствие фотосинтеза, было использовано уравнение (7), коэффициенты которого даны в табл. 2:

$$R_{eco} = a \times T_{почв} + b \times T_{возд} + c, \quad (7)$$

где R_{eco} — экосистемное дыхание ночью (или ночной NEE), $g\ CO_2/m^2/h$, a , b , c — безразмерные коэффициенты для температуры почвы, воздуха и пересечения с осью ординат соответственно, $T_{почв}$ — температура почвы, $^{\circ}C$, $T_{возд}$ — температура воздуха, $^{\circ}C$. Связь (R^2) R_{eco} с температурой почвы и воздуха была выявлена только для залежи с высоким травостоем (0.34 и 0.47 соответственно); при низком травостое связь отсутствовала (0.20 и 0.25 со-

ответственно). На сенокосе связь R_{eco} с температурой почвы и воздуха не выявлена (рис. 7).

Дыхание экосистемы является многокомпонентным параметром, и его составляющие могут иметь различную связь с факторами среды, что при совместном рассмотрении может привести к маскировке закономерностей. Также возможно, что расчетное дыхание растений (R_{plant}), используемое при расчете R_{eco} , может вносить определенную погрешность в его оценку.

Показано, что R_{soil} значимо зависело от $T_{почв}$, R^2 составил 0.60 и 0.70 на залежи и сенокосе соответственно (рис. 8). Коэффициенты уравнения (8) даны в табл. 2:

$$R_{soil} = a \times T_{почв} + b, \quad (8)$$

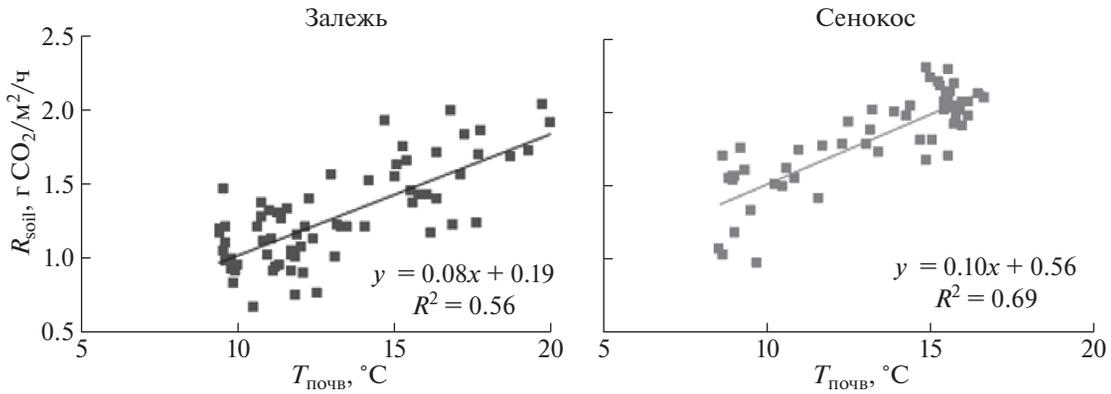


Рис. 8. Связь дыхания почвы (R_{soil}) с температурой почвы на залежи и на сенокосе в 2018 г.

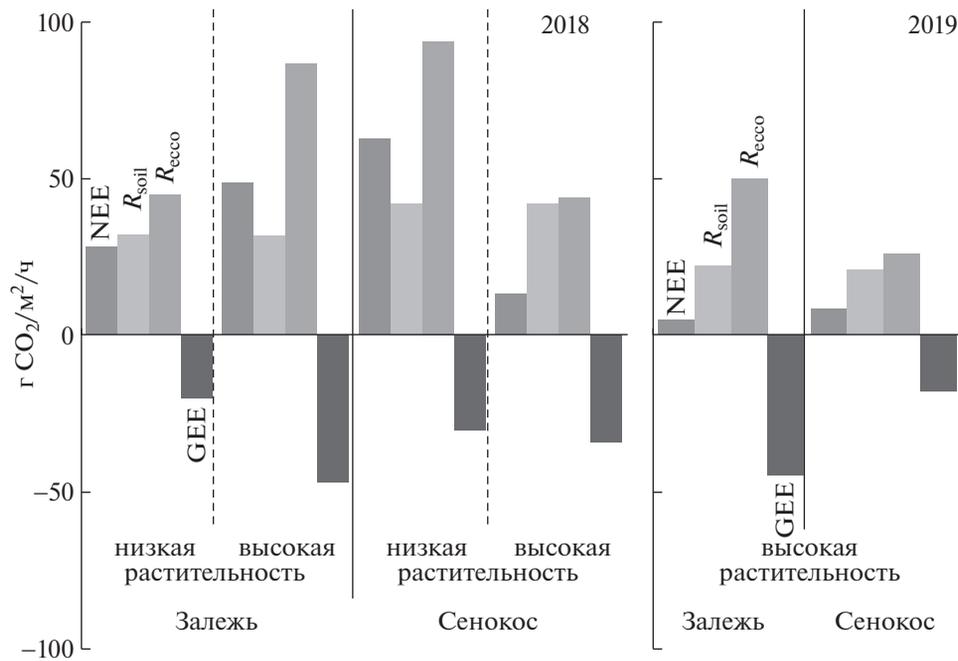


Рис. 9. Суточные показатели NEE, R_{soil} , R_{ecco} и GEE для сенокоса и залежи (2018 и 2019 гг.).

где R_{soil} – дыхание почвы, $г\ CO_2/м^2/ч$, a , b – безразмерные коэффициенты регрессионного уравнения для температуры почвы и пересечения с осью ординат, $T_{почв}$ – температура почвы, $^{\circ}C$.

Интегральная (за 1 сут) оценка NEE, GEE, R_{ecco} , R_{soil} . Средние (для высокого и низкого травостоя) NEE на залежи и сенокосе через 1 мес. после кошения в 2018 г. не отличались – 39 и 38 $г\ CO_2/м^2/сут$ соответственно (рис. 9). Однако на сенокосе наблюдали бóльшую пространственную неоднородность NEE, основной вклад в которую вносил, вероятно, газообмен надземных частей растений. Непосредственно после кошения в

2019 г. NEE на сенокосе была больше, чем на залежи: 9 и 5 $г\ CO_2/м^2/сут$ соответственно.

При расчете для летнего периода продолжительностью 90 сут показатель NEE на залежи в 2019 и 2018 гг. составил 1.4 и 11.0 т С/га/год; на сенокосе – 2.6 и 10.9 соответственно. Это сопоставимо с оценками потерь углерода сенокосами на осушенных верховых и низинных торфяниках: от 2.5–3.5 [38, 39] до 4.6–6.0 [11] и на низинных торфяниках – 3.7–4.2 т С/га/год. Более широкий, относительно литературных данных, диапазон наших оценок можно объяснить тем, что летний сезон 2019 г. был влажным и аномально холодным, а 2018 г. – оптимально влажным и теплым. УПГВ

(80–90 см), который наблюдали в 2018 г. на исследованных объектах, в сочетании с оптимальными термическими условиями мог способствовать максимальным потерям почвенного углерода [10]. Используемые камеры имеют небольшую площадь основания, и для корректного пересчета потоков диоксида углерода (в т С/га/год) необходимо учитывать неоднородность растительного покрова, дополняя это измерениями площади листьев и фитомассы растений, находящихся в камере. Съемка с БПЛА показала значительную неоднородность растительного покрова, что требует дальнейшего более пристального изучения. Средняя за 2 года величина NEE составляла 6.2 для залежи и 6.8 т С/га/год для сенокоса, что свидетельствовало о незначительных различиях между участками.

Величины R_{soil} в 2018 г. (г $CO_2/m^2/сут$) были несколько выше на сенокосе, чем на залежи (42 и 32 г $CO_2/m^2/сут$), а в 2019 г. они были равны 21 и 22 г $CO_2/m^2/сут$ соответственно. При этом ПФМ составила в среднем 1220 и 600 г/м² в слое 0–10 см на сенокосе и залежи. Можно предположить, что вклад корневого дыхания и разложения мертвых корней был больше на сенокосе. Дыхание почвы на осушенных торфяниках характеризуется значительным варьированием: 0.1–2.5 г $CO_2/m^2/сут$ в Московской и Ярославской обл. [24, 25], 1.7, 2.1 г $CO_2/m^2/сут$ – в Карелии и Центральной России соответственно [40], 1.2–5.3 г $CO_2/m^2/сут$ – в Швейцарии [41], 3.1–7.8 г $CO_2/m^2/сут$ – в Беларуси [41, 42]. Но даже на минеральных почвах отмечают значительно большие величины R_{soil} : до 35–65 г $CO_2/m^2/сут$ на залежных участках в Тверской обл. [43]. Потенциальная величина дыхания торфяной почвы, определенная в лабораторных условиях, также меняется широко и может достигать 53.3 г $CO_2/m^2/сут$ [41]. Ранее на другом участке неиспользуемого сенокоса Дубненского болотного массива среднее за бесснежный период дыхание почвы варьировало от 10.7 ± 0.3 до 16.0 ± 2.5 г $CO_2/m^2/сут$ [44], что согласуется с данными представленной работы, которые были получены летом и, вероятно, характеризуют близкие к максимальным величины R_{soil} для осушенных органогенных почв.

Величины R_{eco} в 2018 г. были близкими на сенокосе и залежи (в среднем 69 и 66 г $CO_2/m^2/сут$ соответственно), но значительно зависели от высоты травостоя: на сенокосе с низкой растительностью – 94, с высокой – 44, на залежи – 45 и 87 г $CO_2/m^2/сут$ соответственно. В 2018 г. R_{eco} в сред-

нем, как на залежи, так и на сенокосе в 2 раза больше GEE, и оба участка характеризовались потерями диоксида углерода. В 2019 г. (непосредственно после кошения на сенокосе) R_{eco} на сенокосе составило 26, на залежи – 50 г $CO_2/m^2/сут$. Предположительно, более половины R_{eco} обусловлено дыханием НФМ, кошение которой в 2019 г. на сенокосе снизило экосистемное дыхание более чем в 2 раза.

Суточные GEE на сенокосе и на залежи в 2018 г. были близкими: –32 и –34 г $CO_2/m^2/сут$ при том, что НФМ отличалась почти в 3 раза: 138 и 368 г/м² соответственно. Вероятно, прореживание растений в результате кошения приводит к уменьшению самозатенения растений и росту удельной (на величину НФМ – $GEE_{уд}$ г $CO_2/m^2/сут/г_{раст}$) ассимиляции, что обеспечивало сопоставимые величины GEE на сенокосе и залежи. Это подтверждено результатами 2019 г.: непосредственно после кошения на сенокосе GEE (–18 г $CO_2/m^2/сут$) в сравнении с залежью (–45 г $CO_2/m^2/сут$) отличался значительно меньше, чем НФМ – 32 и 293 г/м².

НФМ в значительной степени определяла различия между компонентами углеродного баланса залежи и сенокоса: ее увеличение сопровождалось ростом R_{plant} и GEE с постепенным выходом на плато при НФМ ≥ 300 г/м² (рис. 10) – черные и серые маркеры соответственно; знаки потоков даны с точки зрения накопления или потери органического вещества растениями, а не изменения концентрации в атмосфере, как это было ранее. $GEE_{уд}$ при этом достаточно быстро уменьшался, достигая минимума при наибольшей фитомассе.

Оценка GEE, R_{plant} , R_{root} , R_{mort} по динамике фитомассы растений. Была предпринята попытка сопоставить GEE с приростом НФМ до кошения, дыхания живой корневой массы и разложения мертвой на залежи и сенокосе, а также сравнить последнее со скоростью разложения, оцененной в полевом опыте по величине целлюлозолитической активности почвы. Прирост НФМ за вегетационный период 2019 г. был определен как разница между НФМ в августе и апреле для залежи и в июле и апреле для сенокоса. Так как прирост ПФМ неизвестен, было принято допущение о том, что он был равен относительному приросту НФМ. Величина прироста общей фитомассы (ПФМ + НФМ) была переведена в поток (г $CO_2/m^2/сут$, с учетом содержания углерода в сухой биомассе растений 45% [45, 46]) и, по существу, характеризовала NPP (Net primary production – чистую первичную продукцию) (табл. 3).

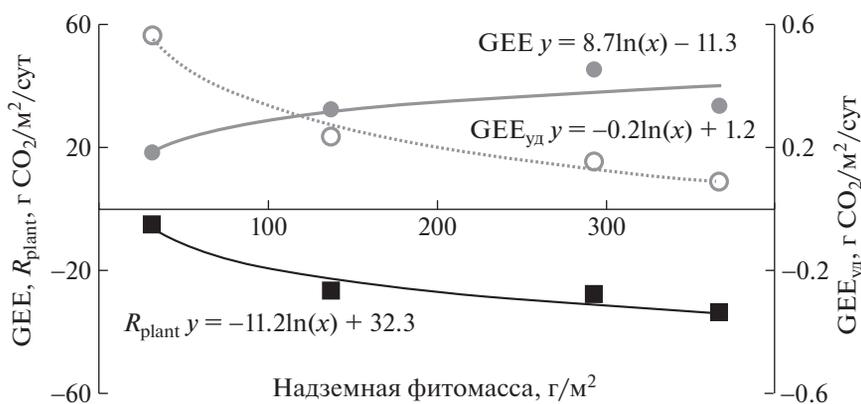


Рис. 10. Зависимость дыхания надземных частей растений R_{plant} (черные квадраты), удельного GEE ($GEE_{\text{уд}}$ – на единицу надземной фитомассы выколотые точки) и GEE на площадь произрастания (серые точки) от надземной фитомассы растений ($\Gamma_{\text{надзем. фитомасса}}$).

На основе выявленных зависимостей GEE и R_{plant} с НФМ (рис. 10) были рассчитаны их величины с апреля по август для залежи и с апреля по июль для сенокоса, и усреднены за рассмотренный период. Разница между NPP и суммой средних величин $GEE + R_{\text{plant}}$ характеризовала величину дыхания живых корней растений (R_{root}), выраженную в $\text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$. Разность между величинами среднего дыхания почвы (R_{soil}) и R_{root} являлась показателем гетеротрофного дыхания почвы, или потока диоксида углерода, сопровождающего разложение органики, в том числе корней растений (R_{mort}). Отношение скорости разложения целлюлозы на сенокосе к залежи составило 1 : 1.52 и оказалось близким к отношению расчетной скорости разложения мортмассы – 1 : 1.26.

ПФМ, отличающаяся в 2 раза на сенокосе и залежи, обусловила двукратное различие скорости

дыхания живых корней (-4 и $-2 \text{ г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$) и 25%-ное различие скорости разложения мертвых корней. Возможно, что эти отличия определялись не только разницей в количестве ПФМ, но и температурой почвы, зольностью и др. Расчеты предварительные, однако могут отражать незначительные различия между компонентами баланса диоксида углерода на залежи и сенокосе, зависящие от динамики величины их НФМ и ПФМ в течение сезона.

Потери углерода на сенокосе слабо отличались от залежи, однако эта оценка не учитывала изъятие фитомассы при кошении (рис. 9). Использование осушенных торфяников под сенокос способно уменьшить потери углерода в сравнении с пашней примерно на 20% [11], а при оптимальном сочетании частоты и времени скашивания даже способствовать накоплению углерода и азота в почве [19]. При этом слишком частое коше-

Таблица 3. Расчетные (по приросту фитомассы) показатели GEE, R_{plant} , R_{root} и R_{mort} для залежи (с апреля по август 2019 г.) и сенокоса (с апреля по июль 2019 г.)

Дата	Залежь						Сенокос					
	Надземная фитомасса		R_{plant}	GEE	$R_{\text{plant}} + GEE$	$R_{\text{root}} : R_{\text{mort}}$	Надземная фитомасса		R_{plant}	GEE	$R_{\text{plant}} + GEE$	$R_{\text{root}} : R_{\text{mort}}$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$\Delta \text{г}/\text{м}^2 : \Delta \text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$	$\text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$				$\text{г}/\text{м}^2$	$\Delta \text{г}/\text{м}^2 : \Delta \text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$	$\text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$			
25.04	24	270 : 7	-3	16	13	-2 : -30	39	160 : 5	-9	21	12	-4 : -38
19.05	88		-18	28	10		177		-26	34	8	
19.06	267		-30	37	7		188		-26	34	8	
31.07	192		-27	34	8		199		-27	35	8	
31.08	293		-31	38	7		-		-	-	-	

Примечание. Для расчетов прироста фитомассы потери углерода приняты отрицательными, а накопление – положительным.

ние без внесения удобрений может привести к истощению углеродного запаса почв и ухудшению их физико-химических и агротехнических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение почвенно-гидрологических условий сенокосного и залежного участков осушенного торфяника не выявило заметных различий между ними, что позволило отнестись различия в потоках CO_2 к влиянию характера их использования.

Установлена зависимость валового обмена CO_2 экосистемы (GEE) от температуры воздуха ($R^2 = 0.86$ на залежи) и ФАР ($R^2 = 0.40$ на сенокосе); нетто-экосистемного обмена CO_2 с атмосферой (NEE) – от температуры воздуха, почвы ($R^2 = 0.79$ и 0.81 на залежи соответственно) и ФАР ($R^2 = 0.65$ на сенокосе и 0.37 – на залежи). Для дыхания почвы (R_{soil}) выявлена зависимость от ее температуры: $R^2 = 0.69$ на сенокосе и 0.56 – на залежи. Полученные коэффициенты регрессионных уравнений могут быть использованы для интерпретации динамики NEE за вегетационный период.

На сенокосе непосредственно после кошения в 2019 г. экосистемное дыхание (R_{eco}) было в 2 раза меньше, чем через 1 мес. после кошения на высоком травостое в 2018 г. (26 и 44 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$), аналогично менялся и показатель GEE (-18 и -34 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$). При этом на залежи в 2019 г. показатели R_{eco} и GEE составили 50 и -45 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ соответственно. Показатель $\text{GEE}_{\text{уд}}$ (GEE на единицу надземной фитомассы растений) на сенокосе сразу после кошения был в 2.4 раза больше, чем через 1 мес. после кошения (0.56 и 0.23 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}/\text{г}_{\text{раст}}$), что возможно было связано с уменьшением самозатенения растений. Показатели NEE и R_{soil} в 2019 г. составили 9 и 21 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ на сенокосе и 5 и 22 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ на залежи соответственно.

На сенокосе через 1 мес. после кошения в 2018 г. параметры R_{eco} , R_{soil} , GEE и NEE в среднем для высокого и низкого травостоя (69 , 42 , -32 и 38 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ соответственно) практически не отличались от залежи (66 , 32 , -34 и 39 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$), хотя надземная фитомасса (НФМ) на сенокосе была в 2.7 раза меньше (138 г/м²), чем на залежи (368 г/м²), а подземная (ПФМ) – на оборот (1223 и 600 г/м²).

Большая величина ПФМ на сенокосе была связана, вероятно, с активным ростом растений,

в том числе корневой системы, как приспособительной реакцией в ответ на кошение, о чем свидетельствовало увеличение показателя $\text{GEE}_{\text{уд}}$.

Согласно расчетам, на основе прироста НФМ сенокосение незначительно влияло на величину NEE. Суммарно за вегетационный сезон 2019 г. он был близким для сенокоса и залежи и составил 5 и 7 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$. Однако в этом случае менялось соотношение входящих в NEE компонентов: увеличивался вклад дыхания живых и разложения мертвых корней, а непосредственно после уборки уменьшалось дыхание надземных частей растений и увеличивался $\text{GEE}_{\text{уд}}$.

Использование осушенного торфяника под сенокос позволяет получить сельскохозяйственную продукцию и за счет контроля пользователем снизить опасность пожаров. При этом такое использование не оказывает существенного влияния на величину нетто-экосистемного обмена CO_2 за вегетационный период, а с учетом изъятых фитомассы, вероятно, даже смещает его в сторону ассимиляции CO_2 в сравнении с залежью.

Авторы признательны М.В. Смагиной за советы по изучению процесса разложения в почве, М.М. Метелевой – за анализ ботанического состава торфа, А.А. Маслову (ИЛАН РАН) – за подбор спутниковых снимков и Д.Г. Суворову – за съемку объектов исследования с БПЛА, А.В. Маркиной, М.В. Левчуку (ИЛАН РАН), М.В. Чистотину (ВНИИ агрохимии) – за помощь в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации // Под ред. Сирина А.А., Минаевой Т.Ю. М.: Геос, 2001. 190 с.
2. A Quick scan of peatlands in central and Eastern Europe / Eds. Minayeva T., Sirin A., Bragg O. Wageningen, The Netherlands: Wetlands International, 2009. 132 p.
3. Sirin A., Minayeva, T., Yurkovskaya T., Kuznetsov O., Smagin V., Fedotov Yu. Russian Federation (European Part) // Mires and peatlands of Europe: Status, distribution and conservation / Eds. Joosten H., Tanneberger F. Moen A. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2017. P. 589–616.
4. Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S., Barthelmes A. The peatland map of Europe // Mires and Peat. 2017. V. 19 (22). P. 1–17. (Online: <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map19/map1922.php>); <https://doi.org/10.19189/Map.2016.OMB.264>
5. Лукин С.М., Анисимова Т.Ю. К вопросу о сельскохозяйственном торфопользовании в России // Мелиорация. 2016. № 1 (75). С. 48–54.

6. *Сирин А.А., Минаева Т.Ю., Возбранная А.Е., Барталев С.А.* Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
7. *Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е.* Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрохимия. 2006. № 6. С. 54–62.
8. *Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А.* Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // Агрохимия. 2015. № 11. С. 51–62.
9. *Ильясов Д.В., Сирин А.А., Суворов Г.Г., Мартыненко В.Б.* Летние потоки диоксида углерода и метана на осушенном торфянике в условиях лесостепи республики Башкортостан // Агрохимия. 2017. № 1. С. 50–62.
10. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / Eds. Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. Kuala Lumpur and Wetlands Int., Wageningen: Global Environment Centre, 2008. 179 p.
11. Peatlands and climate change / Ed. Strack. S. Saarijarven Offset Oy, 2008. 223 p.
12. IPCC: 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G. Switzerland: IPCC, 2014.
13. *Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П.* Пирогенная и гидротермическая деградация торфяных почв, их агроэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. М.: Изд-во МГУ, 2002. 168 с.
14. *Уланов А.Н., Журавлева Е.Л.* Экологические аспекты освоения и сельскохозяйственного использования торфяных почв и выработанных торфяников // Теор. и прикл. экол. 2009. № 3. С. 94–96.
15. *Трускавецкий Р.С.* Баланс углерода в осушенных торфяниках украинского полесья // Почвоведение. 2014. № 7. С. 829–836.
16. *Рабинович Г.Ю., Широкова Е.В., Поздняков Л.А., Позднякова А.Д., Анциферова О.Н., Пантелеева Т.Н.* Деградационные процессы в мелиорированных низинных торфяных почвах ландшафтов Яхромской долины // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири / Под ред. Сычева В.Г., Мюллера Л.М., 2018. С. 306–310.
17. *Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Келлер Т., Ланге Ш., Кузяков Я.В.* Баланс углерода в залежных землях Подмосковья // Почвоведение. 2007. № 1. С. 60–68.
18. *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Кузяков Я.В.* Изменение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов // Агрохимия. 2009. № 5. С. 5–12.
19. *Ларионова А.А., Ермолаев А.М., Никитишен В.И., Лопес де Гереню В.О., Евдокимов И.В.* Баланс углерода в пахотных серых лесных почвах при разных способах сельскохозяйственного использования // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1464–1474.
20. *Шевцова Л.К., Романенков В.А., Благовещенский Г.В., Хайдуков К.П., Канзыва С.О.* Структура баланса углерода и биоэнергетическая оценка его компонентов в агроценозах длительных полевых опытов // Агрохимия. 2015. № 12. С. 67–75.
21. *Малханова Е.В., Егорова Р.А., Чимитдоржиева Г.Д.* Баланс углерода в лугово-черноземных мерзлотных почвах юга Витимского плоскогорья // Агрохимия. 2011. № 1. С. 3–7.
22. *Помазкина Л.В., Семенова Ю.В., Симакова А.А., Кириллова Н.Н., Башалханов И.А.* Оценка баланса углерода почв в агроэкосистемах Иркутской области // Агрохимия. 2016. № 5. С. 65–71.
23. *Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П.* Потоки диоксида углерода в осушенных торфяных почвах // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2001. № 3. С. 867–874.
24. *Новиков В.В., Степанов А.Л., Поздняков А.И., Лебедева Е.В.* Сезонная динамика эмиссии CO₂, CH₄, N₂O и NO из торфяных почв поймы р. Яхромы // Почвоведение. 2004. № 7. С. 867–874.
25. *Новиков В.В., Русаков А.В.* Выделение и поглощение парниковых газов в мелиорированных торфяных почвах Ростовской низины // Почвоведение. 2005. № 7. С. 844–850.
26. *Аладко С.В., Трибис В.П., Шкутов Э.Н.* Минерализация органического вещества осушенных торфяников при длительном сельскохозяйственном использовании // Мелиорация переувлажненных земель. 2005. № 2 (54). С. 94–99.
27. *Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А.* Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 46–58.
28. *Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О.П., Глухова Т.В.* Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
29. Информационный выпуск “О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2015 году”. М.: ИП “Алексашин А.А.”, 2016. 206 с.
30. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Глухов А.И.* Формирование и режим стока при гидроресомелиорации. М.: Наука, 1988. 168 с.
31. *Смагина М.В.* Активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов торфяно-болотных почв // Лесоведение. 1984. № 1. С. 52–58.
32. *Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А.* Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы // Агрохимия. 2010. № 12. С. 40–49.
33. *Edwards N.N., Sollins P.* Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components // Ecology. 1973. V. 54. № 2. P. 406–412.
34. *Молчанов А.Г.* Газообмен диоксида углерода с поверхности сфагнома в заболоченном сосняке южной тайги // Динамика окруж. среды и глобал. изменения климата. 2017. Т. 8. № 1. С. 43–54.

35. Davison A.C., Hinkley D.V. Bootstrap methods and their application. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 582 p.
36. Владыченский А.С., Телеснина В.М., Румянцева К.А., Чалая Т.А. Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги (на примере Костромской области) // Почвоведение. 2013. № 5. С. 518–529.
37. Ковшова В.Н. Средаобразующая роль создания и использования сеяных долголетних сенокосов на низинных выработанных торфяных почвах в условиях Волго-Вятского региона // Висвітлено матеріали IV Міжнародної наукової конференції “Корми і кормовий блок” (26–27 червня 2006 року), які відбулися у м. Вінниці на базі Інституту кормів. 2006. С. 45.
38. Joosten H., Clarke D. Wise use of mires and peatlands. Jyväskylä, Finland: International Mire Conservation Group & International Peat Society, 2002. 304 p.
39. Schipper L.A., McLeod M. Subsidence rates and carbon loss in peat soils following conversion to pasture in the Waikato Region, New Zealand // Soil Use Manag. 2002. V. 18. № 2. С. 91–93.
40. Уланов А.Н., Смирнова А.В. Опыт использования 115 торфяных месторождений на Кировской лугоболотной опытной станции // Мелиорация. 2009. Т. 61. С. 191–201.
41. Bader C., Müller M., Schulin R., Leifeld J. Peat decomposability in managed organic soils in relation to land use, organic matter composition and temperature // Biogeosciences. 2018. V. 15. № 3. P. 703–719.
42. Белковский В.И., Решетник А.П. Динамика эмиссии CO₂ из торфяной почвы при различном ее использовании // Почвоведение. 1981. № 6. С. 57–61.
43. Комарова Т.В. Экологическая оценка почвенной эмиссии CO₂ в сукцессионном ряду зарастания залежи на территории Центрально-лесного заповедника: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2019. 159 с.
44. Суворов Г.Г. Изменение потоков CO₂, CH₄ и запасов углерода лесоболотной экосистемой в результате добычи торфа и сельскохозяйственного использования (на примере Дубненского массива Московской обл.): Дис. ... канд. биол. наук. М., 2018. 128 с.
45. Poorter H., Bergkotte M. Chemical Composition of 24 Wild Species Differing in Relative Growth Rate // Plant Cell Environ. 1992. V. 15. P. 221–229.
46. Niinemets U., Kull O., Tenhunen J.D. Variability in leaf and chemical composition as a function of canopy light environment in coexisting deciduous trees // Inter. J. Plant Sci. 1999. V. 160. P. 837–848.

Carbon Dioxide Fluxes under Different Haymaking Regime on Drained Peat Soil

A. G. Molchanov^a, G. G. Suvorov^a, D. V. Ilyasov^a, and A. A. Sirin^{a, #}

^a Institute of Forest Science RAS

ul. Sovetskaya 21, Moscow region, Odintsovo district, d. Uspenskoe 143030, Russia

[#]E-mail: sirin@ilan.ras.ru

It was compared CO₂ fluxes measured in 2018 and 2019 on the hayfield at different times after mowing and on the fallow on drained peat soils in the Moscow Oblast. Immediately after mowing in 2019, the ecosystem respiration (R_{eco}) and gross exchange ecosystem of CO₂ (GEE) on hayfield decreased 2-fold to 26 and –18 g CO₂/m²/day, respectively, and specific GEE (per aboveground biomass) increased 2-fold to 0.56 g CO₂/m²/day/g_{grass}. The R_{eco} and GEE on the fallow in 2019 were 50 and –45 g CO₂/m²/day. In 2018, a month after mowing, R_{eco} and GEE on the hayfield (69 and –32 g CO₂/m²/day) and on the fallow (66 and –34 g CO₂/m²/day) practically did not differ, although the phytomass was different: aboveground – 138 and 368 g CO₂/m², and belowground – 1223 and 600 g CO₂/m². A month after mowing in 2018, the net ecosystem exchange of CO₂ (NEE) on the hayfield and on the fallow did not differ and amounted to 38 and 39 g CO₂/m²/day. Taking into account the phytomass removed by mowing, the total for the season NEE on the hayfield is shifted towards the assimilation of CO₂ in comparison with the fallow.

Key words: drained peatland, soil respiration, daily dynamics of CO₂, dynamic chambers, soil celluloseolytic activity.

УДК 631.416:631.417.2:633.282

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРОЦЕНОЗА С МНОГОЛЕТНИМ ВЫРАЩИВАНИЕМ МИСКАНТУСА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ¹

© 2020 г. С. Ю. Капустянчик¹, Н. В. Бурмакина¹, В. Н. Якименко^{2,*}

¹ Институт цитологии и генетики СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 10, Россия

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

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

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

В длительных полевых исследованиях показана возможность бесменного выращивания мискантуса в течение не менее 15 лет на низкоплодородных почвах в гидротермических условиях земледельческой зоны Западной Сибири. Содержание в надземной биомассе мискантуса в фазе уборки 53% целлюлозы делает его перспективным сырьем для переработки; в начале вегетации зеленую массу можно использовать на кормовые цели. Установлено, что многолетние посадки мискантуса при среднегодовой урожайности 12 т сухого вещества/га, оказывали положительное средообразующее воздействие на агроценоз. Выявлено увеличение на 0.3–0.4% содержания гумуса в почве под 10-летней плантацией мискантуса; отмечена тенденция накопления подвижных форм зольных элементов в верхнем почвенном слое.

Ключевые слова: мискантус, агроценоз, урожайность, почва, агрохимические свойства.

DOI: 10.31857/S0002188120090082

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость эффективного преодоления современных экологических и экономических вызовов предполагает в числе прочих мер активный поиск возможностей всевозрастающего освоения возобновляемых источников сырья и энергии. На этом пути перспективным направлением является использование продукции растениеводства — биомассы культур с высокими темпами фотосинтетической деятельности. Одну из таких культур — мискантус — достаточно интенсивно возделывают в странах Западной Европы, США, Китае, Индии и др. для получения лигноцеллюлозной биомассы и производных продуктов с высокой добавленной стоимостью [1–3]. Повышенная холодоустойчивость некоторых видов мискантуса делает его перспективным кандидатом для интродукции в континентальные районы России. Однако широкое распространение мискантуса в нашей стране вообще, и в Сибири, в

частности, сдерживается недостаточной проработанностью элементов технологии возделывания этой культуры в региональных почвенно-климатических условиях. Имеющиеся литературные данные получены, главным образом, в регионах (странах), существенно отличающихся от Западной Сибири по климату и гидротермическому режиму почв; экстраполяция результатов таких исследований на почвенно-климатические условия сибирского региона не всегда оправдана.

Проведенные в ряде стран исследования показали, что важной особенностью мискантуса является способность его производственных плантаций произрастать на одном месте в течение более 20 лет без существенного снижения продуктивности, высокая интенсивность которой обусловлена специфической организацией фотосинтетической деятельности растения по C4-типу. Особое внимание заслуживает способность этой культуры длительное время произрастать на низкопродуктивных землях, обеспечивая более высокую экономическую отдачу использования данных угодий [4–7].

¹ Работа поддержана бюджетным проектом ИЦиГ СО РАН № 0324-2019-0039-С-01 и проектом ИПА СО РАН № 0313-2017-0003.

Таблица 1. Некоторые характеристики целинных почв исследованной территории (слой 0–20 см) [8]

Почва	Физическая глина, %	Гумус, %	рН _{H₂O}	Подвижные, мг/кг		Обменный Mg, мг/кг
				P ₂ O ₅	K ₂ O	
Дерново-подзолистая	16.0	2.3	5.6	207	148	165
Серая лесная	18.1	2.6	6.1	172	80	110

Вопросы экологической адаптивности мискантуса к сибирским почвенно-климатическим условиям, его влияния на почву и другие компоненты ландшафта на сегодняшний день остаются нерешенными. В этой связи проведение в Сибири исследований средообразующих последствий длительного выращивания мискантуса, мониторинг почвенно-экологического состояния и продуктивности агроценозов этой культуры в процессе их формирования и функционирования имеют большое значение и актуальность.

Цель работы – в стационарных полевых опытах в земледельческой зоне Западной Сибири оценить урожайность и качество продукции мискантуса, а также его влияние на агрохимические свойства почвы при многолетнем бессменном выращивании.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования с разновозрастными посадками мискантуса проводят с 2005 г. по настоящее время на полях экспериментального хозяйства ИЦиГ СО РАН, расположенного в Новосибирском р-не, Новосибирской обл. Почвенный покров территории, на которой в 1970-х гг. было организовано данное хозяйство, представлен серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами. Небольшие участки этих почв в естественном, целинном состоянии в настоящее время сохранились по опушкам окружающих поля сосново-березовых и березовых лесов; некоторые их характеристики представлены в табл. 1.

Проведенное в преддверии закладки опытов с мискантусом почвенно-агрохимическое обследование хозяйства показало [8], что длительное сельскохозяйственное использование данных почв привело к существенному истощению их плодородия. Например, содержание гумуса за время эксплуатации почв уменьшилось с 2.3–2.6 до 1.1%, за эти годы, вероятно, была израсходована не только легкоминерализуемая фракция гумусного фонда, но и часть его инертной компоненты.

Климат исследованной территории – среднеконтинентальный, умеренно холодный, умерен-

но засушливый. Гидротермические условия лет исследования были довольно контрастными. Сумма осадков за май–август варьировала от 110 до 364 мм (среднеголетняя норма – 214 мм), сумма среднесуточных температур за этот период изменялась от 1759 до 2234°C (среднеголетняя норма – 1952°C). Условия увлажнения вегетационных периодов, определяемые по гидротермическому коэффициенту Селянинова, складывались следующим образом: 2012 г. был сухим, 2010 и 2011 гг. – засушливыми, 2008 и 2016 гг. – недостаточно увлажненными, 2005–2007, 2009, 2014, 2017–2019 гг. – достаточно увлажненными, 2013 г. – избыточно увлажненным.

В опытах выращивали *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский, выведенный ИЦиГ СО РАН и внесенный в Государственный реестр селекционных достижений (свидетельство № 58540).

Род Мискантус (*Miscanthus*) принадлежит к подсемейству Просовых (Panicoideae) семейства Злаки (Poaceae). *M. sacchariflorus* относится к длиннокорневищным травам высотой до 2.0–2.5 м, имеет прямой, жесткий стебель, листья длиной до 60 см характеризуются узкой ланцетно-линейной формой. Соцветие длиной до 25 см представляет собой веерообразную метелку бледно-фиолетового цвета в начале цветения и бело-серого при его завершении. Морфологическое строение подземной части растений *M. sacchariflorus* представлено мочковатой корневой системой с множеством придаточных корней, узлом кущения и видоизмененным побегом – корневищем. Узел кущения и подземные побеги располагаются на глубине 5–20 см от поверхности почвы. Корни размещаются в слое почвы на глубине от нескольких сантиметров до 1.5 м. Корневища толщиной 4–7 мм имеют округлую или сплюснутую форму.

Фенологические особенности *M. sacchariflorus* на территории Западной Сибири заключаются в следующем: отрастание побегов начинается поздней весной (начало мая), цветение наступает в конце августа, к концу сентября происходит высыхание и отмирание надземной биомассы, связанное с понижением среднесуточной температуры и первыми заморозками. В целом для *M. sacchariflorus* характерен полный фенологический

цикл развития независимо от погодных условий – всходы (отрастание), начало роста междоузлий, кушение, флаговый лист, цветение, отмирание.

В условиях сибирского региона мискантус размножается исключительно вегетативным способом. В наших опытах корневища высаживали в мае с помощью переоборудованной картофелепосадочной машины СН-4Б (посадочная норма 1.4 т/га) в борозды глубиной 20–25 см, расстояние между бороздами 70 см, далее борозды засыпали, поверхность выравнивали и прикатывали. В год посадки происходило усиленное формирование корневой системы растений и в меньшей степени – надземной биомассы. На 2–3-й год образовывалась ровная плантация растений высотой до 2.5 м. Мискантус убирали сплошным скашиванием (трактор МТЗ-82 с косилкой КИР-1.5) обычно в начале октября, при появлении заморозков и высушении надземной биомассы, урожай учитывали выборочно с помощью рамки 1 м² в четырех–шестикратной повторности.

Рассматриваемые опыты представляют собой разновозрастные плантации мискантуса, расположенные на прилегающих участках серых лесных и дерново-подзолистых почв с близкими агрохимическими свойствами; в опытах изучали урожайность и качество продукции мискантуса в зависимости от возраста посадки. Изменение почвенных показателей при многолетнем выращивании мискантуса рассмотрено в полевом опыте, заложенном в 2009 г. на типичном участке старопахотной серой лесной почвы. Данный опыт (как и другие) представляет собой поле площадью ≈1 га, на котором участки с мискантусом (полосы 50 × 20 м) чередуются с такими же участками бессменного пара, служившего в качестве контроля. В связи с необходимостью выявления средообразующих возможностей мискантуса, удобрения в опыте не применяли.

Почвенные образцы отбирали во время уборки урожая и анализировали общепринятыми методами [9, 10]: гумус определяли по Тюрину, рН-потенциометрическим методом, нитратный азот – методом ионометрии, подвижный фосфор и калий – по Чирикову, легкоподвижный фосфор – по Францесону, степень подвижности фосфатов – по Карпинскому–Замятиной, обменные калий и магний – в вытяжке 1 М раствора CH₃COONH₄. Растительные образцы отбирали в течение вегетации и анализировали стандартными методами [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После высадки мискантуса при закладке опыта, в первый год формирования плантации про-

Таблица 2. Продуктивность мискантуса (посадка 2015 г.)

Год определения	Биомасса, т абсолютно сухого вещества/га	
	надземная	подземная
2015	0.8 ± 0.2	2.6 ± 0.4
2016	8.1 ± 2.1	4.0 ± 0.9
2017	10.7 ± 2.2	8.9 ± 1.4

исходило прежде всего интенсивное ветвление корневищ и их рост [12], поэтому продуктивность подземной биомассы была значительно больше надземной (табл. 2). Исследования показали, что усиленный рост подземных побегов начинался в начале фазы кушения растений, к окончанию фазы цветения мискантуса его корневища уже образовывали многочисленные боковые побеги и новые метамеры. Интенсивное нарастание надземной биомассы начиналось с середины июня, к концу первого года вегетации прирост обычно составлял 0.8–1.0 т/га.

Во 2–3-й год опыта происходило активное нарастание как надземной, так и подземной биомассы, урожайность культуры достигала 10–12 т/га. Сформировавшаяся мощная корневая система обусловила высокий потенциал вегетативного размножения и интенсивности продукционного процесса фитоценоза.

Следует сказать, что определенную дискуссионность может вызвать вопрос об инвазивности мискантуса. В целом известно, что инвазивность присуща прежде всего видам, размножающимся семенами. В этой связи, по мнению ряда авторов, мискантус не представляет угрозы для сельскохозяйственных угодий [13, 14]. Изучаемый вид не дает семян в условиях Сибири, тем самым минимизируя риск инвазивного распространения. Возможное распространение корневищ по окружающей территории ограничивается агротехническими приемами, как и для других подобных культур – проведением опашки поля по периметру 1–2 раза в течение вегетационного периода. Отметим, что проводимые с 2005 г. исследования не выявили инвазивности мискантуса на опытных участках и соседних полях.

Проведенная в 2018 г. сравнительная оценка продуктивности разновозрастных посадок мискантуса свидетельствовала об отсутствии существенных различий урожайности культуры в зависимости от возраста плантации, по крайней мере, в течение 10–15 лет ее функционирования (табл. 3). Отметим, что довольно стабильная урожайность мискантуса была получена в годы с раз-

Таблица 3. Характеристика надземной фитомассы разновозрастных посадок мискантуса (средние, 2018 г.)

Год посадки	Высота растений, см	Густота стеблестоя, шт./м ²	Продуктивность, т/га	Влажность	Зольность
				%	
2005	194	223	12.4 ± 2.5	20.7	7.20
2009	200	302	14.3 ± 2.2	21.8	6.95
2016	211	202	10.8 ± 2.2	23.0	5.39

Таблица 4. Содержание органических соединений в надземной биомассе мискантуса (посадка 2009 г.), % от абсолютно сухого вещества

Год отбора образцов	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Жировосковая фракция
2016	52.6 ± 1	24.1 ± 0.5	23.1 ± 0.5	2.5 ± 0.1
2017	52.9 ± 1	24.5 ± 0.5	22.0 ± 0.5	2.1 ± 0.1
2018	50.4 ± 1	23.2 ± 0.5	22.1 ± 0.5	1.6 ± 0.1
2019	51.3 ± 1	23.9 ± 0.5	21.9 ± 0.5	2.0 ± 0.1

личными погодными условиями вегетационного периода, что свидетельствовало о высокой адаптивности растения к факторам внешней среды.

Структурный анализ надземной биомассы показал, что различия между разновозрастными плантациями мискантуса в целом были невелики. Варьирование продуктивности составило от 10.8 (посадка 2016 г.) до 14.3 т/га (посадка 2009 г.). Самый высокий стеблестой отмечен в посадках 2016 г. при минимальной его густоте в 202 шт./м², самый низкий — в посадках 2005 г. при средней густоте стояния 223 шт./м². Наивысшая продуктивность мискантуса 2009 г. посадки в значительной степени была сопряжена с соответствующей максимальной густотой стеблестоя — 302 шт./м².

Потенциальная продуктивность мискантуса достигает 40 т сухой массы/га, реальная — зависит от почвенно-гидротермических условий выращивания и вида растения. По усредненным данным [15], урожайность 3-летних посадок мискантуса в условиях Англии составляла: у *Miscanthus giganteus* — 13.8–18.7, *M. sacchariflorus* — 11–12, *M. sinensis* — 4.6–10.9 т/га, в Германии — 22.8–29.1, 12–13 и 9.1–12.8 т/га, в Португалии — 34.7–37.8, 35–36 и 16.1–22.4 т/га соответственно.

В наших опытах на юге Западной Сибири (на территории Новосибирской обл.) продуктивность разновозрастных посадок *M. sacchariflorus* обычно варьировала в пределах 10–16 т/га, при среднем показателе ≈ 12 т. Сопутствующие внешние факторы роста и развития растений — приход фотосинтетической активной радиации, продол-

жительность вегетационного периода и его погодные условия — позволяли получать соответствующую урожайность культуры.

Отметим, что в ИЦиГ СО РАН проводят изучение и других дикорастущих и культурных энергетических растений, в т.ч. из семейства злаковых, например, канареечник тростниковидный (*Phalaroides arundinaceae* Raush) — урожай зеленой массы равен 30–35 т/га, содержание целлюлозы — 44.2% (абсолютно сухого сырья — а.с.с.), высота побегов — 220 см, овсяница тростниковидная (*Festuka arundinaceae* Schreb) — урожай зеленой массы равен 39–45 т/га, содержание целлюлозы — 40% (а.с.с.), высота побегов — 158 см, ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) — урожай зеленой массы равен 33–38 т/га, содержание целлюлозы — 55.4% (а.с.с.), высота побегов — 150 см. Однако по комплексу биологических, хозяйственных и биохимических показателей мискантус представляется наиболее перспективным.

Химический анализ надземной биомассы мискантуса (табл. 4) подтвердил его ценность как источника энергии и сырья для переработки, прежде всего в целлюлозно-бумажной промышленности, производстве биоразлагаемых упаковочных материалов, а также других отраслях [16]. Высокое содержание целлюлозы (53%) при относительно низком уровне лигнина и жировосковой фракции характеризует мискантус как перспективную урожайную сырьевую культуру со значительным экономическим потенциалом возделывания и переработки.

Таблица 5. Качество корма и питательная ценность зеленой массы мискантуса 3-го года посадки в разные фазы вегетации (средние)

Фаза вегетации	Влажность, %	Химический состав, % сухого вещества				Питательная ценность 1 кг корма	
		протеин	жир	клетчатка	зола	к.е.	ОЭ, МДж/кг
Весеннее отрастание (начало июня)	77.4	19.8	2.0	27.1	11.4	0.86	10.2
Наращение листьев (конец июня)	63.9	12.1	2.2	28.9	6.5	0.78	9.27
Флаговый лист (сере- дина августа)	46.3	6.9	1.0	41.5	5.5	0.61	8.51

Проведенное исследование кормовых качеств мискантуса [17] показало их снижение в течение вегетационного периода (табл. 5). По мере прохождения фенофаз в надземной биомассе уменьшалось количество протеина и жира и увеличивалось содержание клетчатки. Установлено, что ее содержание в растениях мискантуса для рациона крупного рогатого скота является благоприятным лишь при укосе до конца июня. Напомним, что оптимальное содержание клетчатки в кормах для КРС составляет 22–27, для свиней – 5–7, птицы – 4–6%. При чрезмерно высоком содержании клетчатки существенно уменьшается перевариваемость питательных веществ рациона.

Содержание обменной энергии (ОЭ) 9–10 МДж/кг в начале вегетации также свидетельствовало о возможности получения в этот период корма с довольно хорошим качеством. К концу вегетации содержание клетчатки в растениях заметно превышало оптимальные показатели, рекомендуемые для рациона животных; это обстоятельство существенно снижает кормовые качества данной культуры. Однако именно высокое содержание целлюлозы и возможность ее переработки в ценные продукты является существенным достоинством мискантуса.

Результаты опытов свидетельствовали, что содержание элементов-биофилов в растениях разновозрастных посадок мискантуса в период уборки в среднем составило: азота – 0.19, фосфора – 0.16, калия – 0.46, магния – 0.034% от сухого вещества. Следовательно, с каждой 1 т скашиваемого мискантуса из почвы отчуждалось \approx 1.5 кг азота, 1.3 – фосфора, 3.5 – калия и 0.3 кг – магния. Учитывая, что средняя урожайность мискантуса в наших опытах равнялась 12 т/га, ежегодный вынос элементов питания растений за счет почвенных запасов составлял: азота – 17–20, фосфора – 11–17, калия – 35–40, магния – 2–3 кг/га.

По сравнению с другими урожайными культурами, такие масштабы отчуждения мискантусом питательных элементов из почвы представляются невысокими.

Исследованные почвы в естественном состоянии обладают невысоким в целом уровнем плодородия (табл. 1), при их длительном сельскохозяйственном использовании в годы перед закладкой рассматриваемых опытов почвенное плодородие было существенно истощено. Выращивание мискантуса в течение 10 лет способствовало значительному повышению содержания гумуса в почве агроценоза (табл. 6), как по сравнению с исходной старопахотной почвой, так и соседним парующимся участком. Отметим, что количество гумуса в почве под мискантусом возросло не только в верхнем, но и в нижележащих почвенных слоях. Можно предположить, что легкий гранулометрический состав исследованной почвы сдерживал процесс гумусонакопления, в тяжелых почвах он проходил бы намного интенсивнее. Ранее в научной печати сообщали об обеспечении посадками мискантуса положительного баланса гумуса в агроценозах [5, 6, 18].

В сибирских условиях наиболее информативным показателем обеспеченности выращиваемых культур почвенным азотом является содержание нитратов [19]. Содержание нитратного азота в почве опытов осенью 2019 г. показано в табл. 6. Низкие запасы органического вещества в почве существенно лимитировали процессы минерализации и нитратообразования, тем не менее, в верхнем слое почвы пара накапливалось 12–13 мг N-NO₃/кг. Увеличившиеся запасы почвенного органического вещества под посадкой мискантуса в течение вегетации обеспечивали, вероятно, более высокую эффективность процессов нитрификации. В то же время интенсивный рост биомассы мискантуса обуславливал практически

Таблица 6. Агрохимические свойства почвы опыта с мискантусом (2019 г.), (посадка 2009 г.)

Слой почвы, см	Мискантус				Пар			
	Гумус, %	N-NO ₃ , мг/кг	K _{обм}	Mg _{обм}	Гумус, %	N-NO ₃ , мг/кг	K _{обм}	Mg _{обм}
			мг/100 г				мг/100 г	
0–20	1.37	0.8	3.9	3.6	0.96	12.4	6.0	3.1
20–40	1.08	0.8	2.7	3.1	0.79	5.9	2.4	3.0
40–60	0.53	0.7	2.2	3.1	0.41	2.5	2.1	2.5
60–80	0.37	0.6	4.8	8.2	0.23	2.2	4.3	8.2
80–100	0.31	0.5	6.9	15.1	0.21	2.2	6.6	15.1
HCP ₀₅	0.15	0.1	0.4	0.8	0.11	1.5	0.7	0.6

полное потребление растениями имеющихся запасов подвижного минерального азота по всему почвенному профилю. В этой связи представляется целесообразной оптимизация азотного режима данной почвы. Однако в подобных экстенсивных агроценозах (без внесения удобрений) дополнительное положительное влияние на фонд минерального азота будет оказывать гумусное состояние почв, перманентно улучшающееся при выращивании мискантуса.

По данным зарубежных исследователей [20, 21], азотные удобрения необходимы в основном на почвах с низким содержанием N, при достаточно интенсивных и эффективных процессах минерализации почвенного органического вещества влияния N-удобрений на урожайность мискантуса не наблюдали, по крайней мере со 2–3-го года вегетации. Однако для поддержки корневищ при закладке плантации целесообразно внесение азотных удобрений в дозе N60.

Слабая отзывчивость мискантуса на внесение удобрений во многом связана с его способностью к эффективной реутилизации питательных элементов. В конце вегетации из побегов в корневища перемещается примерно 50% поглощенного азота и фосфора и 30% калия и магния [20]. Весной эти резервы мобилизуются для роста новых побегов, делая мискантус в определенной степени независимым от уровня почвенного плодородия. Низкую потребность мискантуса в почвенных запасах элементов питания ранее отмечали ряд авторов [5, 6, 15].

Обеспеченность зерновых (злаковых) культур обменным калием на исследованной почве легкого гранулометрического состава по нашим грациям [22, 23] является неустойчивой, т.е. для них (в отличие от картофеля) калий не находится в первом минимуме и внесение других макроэлементов, в первую очередь, азота, существенно повышает урожайность. Известна способность рас-

тений семейства злаковых усваивать труднодоступный калий из кристаллической решетки алюмосиликатов. В длительных исследованиях Ротамстедской опытной станции (Великобритания) на легких почвах, в которые более 80-ти лет не вносили калийные удобрения, зерновые культуры, выращиваемые все это время, могли ежегодно усваивать 15–25 кг K₂O/га [24].

Выращивание в течение 10 лет мискантуса в наших опытах сопровождалось достоверным снижением содержания обменного калия в верхнем почвенном слое относительно почвы пара (табл. 6), ниже по профилю уровень калия практически не изменился. Это подтверждает результаты проведенных ранее длительных исследований [22, 25], свидетельствующих, что значимые изменения содержания подвижных форм калия и при дефицитном, и при профицитном его балансе в агроценозах, проявляются, главным образом, в верхнем (пахотном) слое почв. Ежегодный вынос калия отчуждаемой биомассой мискантуса (до 40 кг/га) обеспечивался за счет структурного калия почвенных минералов, не извлекающегося стандартными вытяжками.

Содержание обменного магния в почве за 10 лет опытов не изменилось, и было одинаковым и под мискантусом, и при длительном паровании (табл. 6). Это связано с невысоким его содержанием в урожае культуры и эффективной реутилизацией. Ранее было показано [25], что снижение содержания подвижных форм магния в почве при ее сельскохозяйственном использовании связано не столько с потреблением выращиваемыми культурами (вынос урожаем), сколько (главным образом) с процессами выщелачивания элемента из верхних почвенных слоев, значительно усиливающимися при внесении минеральных удобрений, прежде всего аммонийных азотных и калийных, ионы аммония и в меньшей степени калия

Таблица 7. Содержание форм фосфора в почве опыта с мискантусом (2019 г.), (посадка 2009 г.), мг/кг

Слой почвы, см	Мискантус			Пар		
	по Чирикову	по Францесону	по Карпинскому	по Чирикову	по Францесону	по Карпинскому
0–20	292	12.6	5.53	306	10.6	6.23
20–40	266	11.9	1.45	283	10.3	1.68
40–60	289	14.7	0.21	321	13.9	0.52
60–80	349	17.6	0.14	356	16.3	0.21
80–100	265	7.0	0.10	280	6.0	0.15
<i>HCP</i> ₀₅	31	1.3	0.52	24	1.4	0.51

эффективно вытесняют магний из почвенного поглощающего комплекса.

Реакция почвенного раствора при длительном выращивании мискантуса не изменилась по сравнению как с исходной старопахотной почвой, так и с почвой сопутствующего пара, pH_{H_2O} во всех случаях был равен 5.75.

Специфической особенностью исследованных почв является довольно высокое содержание подвижного фосфора как в естественном состоянии (≈ 200 мг/кг), так и старопахотном. В целом для региона характерно богатство почвообразующих пород апатитами и фосфоритами и преобладание в фосфорном фонде почв высокоосновных фосфатов кальция и их оклюдированных форм. В связи с этим при повышенном содержании валового фосфора в почвах доступность его запасов обычно низкая [26, 27].

Содержание подвижного фосфора (по Чирикову) в почве опыта (табл. 7) было примерно одинаковым и под посевом мискантуса и в паровом поле, при довольно равномерном распределении его по всему почвенному профилю с некоторым увеличением в иллювиальном горизонте. По действующим стандартным грациям такое содержание соответствует очень высокой обеспеченности почвы фосфором. Однако по данным [26, 27], концентрация почвенного фосфора, определенная по методу Чирикова, на 74% обусловлена содержанием в почве высокоосновных фосфатов кальция и слабо отражает обеспеченность фосфором выращиваемых культур.

По мнению [28], наиболее чувствительным способом оценки фосфорного состояния западносибирских почв является метод Францесона. Содержание легкоподвижного фосфора в почве нашего опыта по грациям [28] соответствовало средней степени обеспеченности растений фосфором. Распределение этой формы фосфатов по почвенному профилю в целом аналогично по-

движному фосфору, с пиком в иллювиальном горизонте и дальнейшим резким снижением. Обращает на себя внимание факт заметного повышения содержания легкообменного фосфора в верхнем слое почвы под мискантусом по сравнению с паром и явная тенденция к соответствующему его увеличению в нижележащих почвенных слоях. Причиной этого явления могла быть как более интенсивная фиксация фосфора в труднодоступные формы в условиях парующейся почвы, так и его определенная биогенная аккумуляция в верхних почвенных горизонтах под многолетней посадкой мискантуса, сопровождавшаяся, возможно, некоторым повышением степени мобильности имевшихся почвенных фракций фосфатов.

Важным показателем способности твердой фазы почвы отдавать в раствор ионы фосфора является степень их подвижности, определяемая по методу Карпинского–Замятиной. В табл. 7 показаны результаты анализа почвы опыта, выполненные данным способом (пересчитанные из мг/л в мг/кг почвы). Этот показатель фосфорного состояния почвы, в отличие от других рассмотренных форм элемента, имел максимальную величину в верхнем почвенном горизонте и резко снижался с глубиной, отражая как высокую обеспеченность растений доступным фосфором, так и доминирование в фосфатном фонде нижележащих почвенных слоев фракции труднорастворимых высокоосновных фосфатов кальция типа апатита. Отмеченная тенденция к некоторому снижению величины данного показателя в почве под мискантусом по сравнению с паром связана с отчуждением наиболее мобильной части фосфатного фонда почвы при многолетнем выносе урожая.

Таким образом, результаты длительных исследований свидетельствовали, что культивирование плантаций мискантуса способствует решению ряда значимых экологических вопросов [29]: создает

культурный агроландшафт, рациональный в имеющихся почвенно-климатических условиях; обеспечивает получение устойчивого урожая качественной растениеводческой продукции, повышая эффективность использования низко плодородных земель; улучшает гумусное состояние и стабилизирует фонд подвижных форм зольных элементов почвы, тем самым препятствуя нарастающему истощению ее плодородия и деградации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В многолетних полевых опытах показана эффективная возможность выращивания мискантуса в зоне северной лесостепи и подтайги Западной Сибири. Региональные гидротермические условия позволяют ежегодно получать сухой массы мискантуса 10–15 т/га; плантации культуры можно беспрерывно возделывать в течение не менее 15 лет без снижения урожайности. Содержание в надземной биомассе мискантуса в фазе уборки 53% целлюлозы делает его перспективным сырьем для переработки; в начале вегетации зеленую массу можно использовать на кормовые цели. Подтверждена способность посадок мискантуса успешно произрастать на почвах с низким уровнем плодородия, оказывая на них положительное средообразующее воздействие. Установлено, что за 10 лет беспрерывного выращивания мискантуса на почве легкого гранулометрического состава содержание в ней гумуса возросло на 0.3–0.4%, несмотря на интенсивное использование растениями почвенного мобильного азота, генерируемого соответствующими минерализационными процессами.

Отмечена тенденция к накоплению подвижных форм зольных элементов в верхнем почвенном слое, связанная, возможно, как с биогенной аккумуляцией, так и с повышением степени мобильности их соединений. В целом исследования показали очевидную перспективность выращивания мискантуса в континентальных регионах России, в т.ч. на низкопродуктивных землях, препятствуя их прогрессирующей деградации, улучшая эколого-агрохимическое состояние агроценозов и обеспечивая агрономическую целесообразность производства.

Авторы благодарны сотрудникам ИЦиГ СО РАН Поцелуеву О.М. и Галицыну Г.Ю. за содействие в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewandowski I., Scurlock J.M.O., Lindvall E., Myrsini C. The development and current status of perennial rhizom-

atous grasses as energy crops in the US and Europe // *Biomass and Bioenergy*. 2003. V. 25 (4). P. 335–361.

2. Heaton E.A., Flavell R.B., Mascia P.N. et al. Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects // *Current Opinion in Biotechnology*. 2008. V. 19. P. 202–209.
3. Zub H.W., Brancourt-Hulmel M. Agronomic and physiological performances of different species of *Miscanthus*, a major energy crop. A review. *Agronomy for sustainable development*, Springer Verlag. EDP Sciences. INRA. 2010. № 30. 214 p.
4. Clark L.V., Brummer J.E., Głowacka K. et al. A footprint of past climate change on the diversity and population structure of *Miscanthus sinensis* // *Annals of Botany*. 2014. № 114. P. 97–107.
5. Jones M.B., Finnan J., Hodkinson T.R. Morphological and physiological traits for higher biomass production in perennial rhizomatous grasses grown on marginal land // *GCB Bioenergy*. 2015. № 7. P. 375–385.
6. Nijssen M., Smeets E., Stehfest E., Detlef P. van Vuuren. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands // *GCB Bioenergy*. 2012. № 4. P. 130–147.
7. Figala J., Vranová V., Rejšek K., Formánek P. Giant miscanthus (*Miscanthus* × *Giganteus* Greef et Deu.) – A promising plant for soil remediation: A Mini Review // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015. № 63. P. 2241–2246.
8. Сысо А.И., Смоленцев Б.А., Якименко В.Н. Почвенный покров новосибирского Академгородка и его эколого-агрономическая оценка // *Сибирский экологический журнал*. 2010. Т. 17. № 3. С. 363–377.
9. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
10. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
11. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. и др. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с.
12. Капустянчик С.Ю., Данилова А.А., Лихенко И.Е. Продуктивность мискантуса сорта “Сорановский” первого года вегетации и дыхательная активность почвы // *Пермский аграрный вестник*. 2016. № 4. С. 82–87.
13. Smith L.L., Barney J.N. The relative risk of invasion: Evaluation of *miscanthus giganteus* seed establishment // *Invasive Plant Science and Management*. 2014. № 7. P. 93–106.
14. Bonin C.L., Mutegi E., Chang H., Heaton E.A. Improved feedstock option or invasive risk? Comparing establishment and productivity of fertile *miscanthus giganteus* to *miscanthus sinensis* // *Bioenergy Research* 2017. V. 10 (2). P. 317–328.
15. Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Andersson B. et al. Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes // *Agronomy Journal*. 2003. V. 95. P. 1274–1280.
16. Будаева В.В., Севастьянова Ю.В., Гисматулина Ю.А. и др. Особенности бумагообразующих свойств целлюлозы мискантуса // *Ползуновский вестник*. 2015. № 1. С. 78–82.

17. *Капустянчик С.Ю., Поцелуев О.М., Ломова Т.Г., Бакшаев Д.Ю.* Продуктивность и питательная ценность мискантуса сорта “Сорановский” / Почвы России: вчера, сегодня, завтра: сборник статей. Киров: Изд-во ВятГУ, 2017. С. 84–90.
18. *Зинченко В.А., Яшин М.* Энергия мискантуса // Лес-проминформ. 2011. № 6. С. 134–140.
19. *Кочергин А.Е., Гамзиков Г.П.* Эффективность азотных удобрений в черноземной зоне Западной Сибири // Агрохимия. 1972. № 6. С. 3–11.
20. *Himken M., Lammel J., Neukirchen D. et al.* Cultivation of Miscanthus under West European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization // Plant and Soil. 1997. V. 189. P. 117–126.
21. *Lewandowski I., Kicherer A.* Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus giganteus // European Journal of Agronomy. 1997. № 6. P. 163–177.
22. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
23. *Якименко В.Н.* Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 10. С. 16–24.
24. *Johnston A.E., Goulding K.W.T.* The use of plant and soil analysis to predict the potassium supplying capacity of soil // Proc. 22-nd IPI Coll. – Soligorsk, USSR, 1990. P. 177–204.
25. *Якименко В.Н.* Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // Агрохимия. 2019. № 3. С. 19–29.
26. *Антипина Л.П., Малыгина Л.П., Попцов С.П.* Оценка фосфатного состояния и оптимальные параметры его в почвах Западной Сибири // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 1992. № 2. С. 12–15.
27. *Аверкина С.С., Синещиков В.Е., Ткаченко Г.И.* Оценка методов определения фосфатов в черноземах Новосибирской области // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2011. № 11–12. С. 5–10.
28. *Кочергин А.Е.* Эффективность удобрений на черноземах Западной Сибири // Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Западной Сибири. М.: Наука, 1968. С. 316–336.
29. *Минеев В.Г.* Экологические функции агрохимии в современном земледелии // Агрохимия. 2000. № 5. С. 5–13.

Evaluation of the Ecological and Agrochemical State of Agrocenosis with Long-Term Growing of Miscanthus in Western Siberia

S. Yu. Kapustyanchik^a, N. V. Burmakina^a, and V. N. Yakimenko^{b,#}

^a *Institute of Cytology and Genetics, Siberian Division, Russian Academy of Science
prosp. Lavrentyeva 10, Novosibirsk 630090, Russia*

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

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

Long-term field studies have shown the possibility of permanent cultivation of miscanthus for at least 15 years on low-fertile soils in the hydrothermal conditions of the agricultural zone of Western Siberia. Keeping 53% of the pulp in the aboveground biomass of miscanthus in the harvesting phase makes it a promising raw material for processing; at the beginning of the growing season, the green mass can be used for feed purposes. It was found that long-term plantings of miscanthus with an average annual yield of 12 tons of dry matter/ha had a positive environmental impact on agrocenosis. An increase of 0.3–0.4% in the humus content in the soil under the 10-year plantation of miscanthus was detected; a tendency to accumulate mobile forms of ash elements in the upper soil layer was noted.

Key words: miscanthus, agrocenosis, yield, soil, agrochemical properties.

УДК 631.42:632.112

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ДРУГИХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВЕННЫХ КОЛОНКАХ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ

© 2020 г. А. С. Фрид^{1,*}, Т. И. Борисочкина¹¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 17.01.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Исследование миграции химических элементов с использованием промывания почвенных колонок имеет давнюю историю. В этих исследованиях скорости потока влаги в колонках значительно превышают скорости потоков влаги в природных условиях. Поэтому исследователи вместо анализа миграции в равновесных условиях сорбции должны анализировать миграцию с кинетикой сорбции. Это осложняет интерпретацию результатов и описание их математическими моделями миграции. Проанализированы 2 серии опытов с почвенными колонками, содержащими разные наборы измеренных показателей. Показано, что имели место различные распределения концентраций в выходных кривых и внутри почвенных колонок. При анализе опытных данных использовали модели диффузии и конвективной диффузии (дисперсии). В первой серии опытов формально допустимые величины коэффициентов диффузии в почве получены только для Са и Сu, а коэффициент конвективной диффузии (дисперсии) – для Са, Mg, К, Сu. Установлено, что SO_4^{2-} , Mn и Ni двигались по колонке со скоростью воды, т.е. в виде легко подвижных форм. Во второй серии опытов с ^{54}Mn , несмотря на использование комплексообразователей в промывающих растворах, столь легкоподвижные формы ^{54}Mn не обнаружены, по-видимому, по причине изотопного обмена с Mn почвы. Из найденных параметров моделей миграции рассчитаны оценки таких характеристик, как коэффициент распределения между твердой и жидкой фазами и коэффициент конвективной диффузии (дисперсии) в почвенных растворах.

Ключевые слова: промывание почвенных колонок, уточнение задач, модели и параметры миграции, тяжелые металлы, макроэлементы.

DOI: 10.31857/S0002188120090057

ВВЕДЕНИЕ

Опыты с промыванием почвенных колонок имеют давнюю историю. Сначала наиболее популярными были вопросы изучения гидродинамических характеристик (опыты с метками воды, несорбирующимися анионами и другими веществами) [1]. Затем стали изучать промывание сорбирующихся веществ. Для математического описания соответствующих задач использовали и используют в настоящее время в основном модели, разработанные для хроматографии (они же – модели миграции).

И в хроматографии, и в опытах с почвами часто колонки заполнены сорбентами, но задачи в этих направлениях исследований несколько различаются. Для хроматографических процессов

важно разделить смесь веществ на чистые компоненты, которые должны выходить из колонки отдельно (аналитические и препаративные задачи). А в опытах с почвой важно оценить очистку промывных вод от нежелательных веществ и/или оценить прогноз проникновения загрязняющих (или почвообразующих) веществ вглубь почвы (в том числе и легкорастворимых солей при орошении); интересен вопрос и о формах, в которых передвигаются вещества.

Известно, что условия проведения опытов в колонках как правило сильно отличаются от процессов в почвах естественного залегания, в первую очередь по скорости движения (а то и по направлению) влаги, что значительно изменяет (и/или нарушает) условия равновесия между формами почвенной влаги, формами мигрирую-

щих веществ с разной прочностью сорбции. Лизиметрические опыты в данном смысле занимают промежуточное положение. Видимо понимая данную ситуацию, исследователи при проведении опытов с почвенными колонками основное внимание уделяют оценке адекватности самих миграционных моделей и их параметров [2, 3]. Но и в этом случае каждый новый эксперимент ставит один и тот же вопрос: “так что же характеризуют полученные параметры — почвенные свойства, свойства мигранта, условия эксперимента или модель переноса [1]?”

Цель работы — провести анализ опытов по изучению миграции в почвенных колонках тяжелых металлов (ТМ) и других элементов с помощью математических моделей и указать на возникающие при этом вопросы и трудности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проанализированы 2 серии опытов: 1-я серия — опыты по исследованию миграции ТМ, проведенные в колонках с монолитами с нарушенной структурой (авторские данные), и 2-я серия — опыты коллектива авторов по изучению миграции с использованием изотопной метки и промывания водой с различными органическими веществами-комплексообразователями [4].

Для первой серии опытов на участке вне зоны активного воздействия техногенных выбросов из стенок разреза на песчаной дерново-подзолистой почве (Albeluvisols, WRB) вырезали монолиты почвы с ненарушенной структурой (срезы и удаляя растительность) размером $10 \times 10 \times 20$ см, помещали в металлические каркасы из белой жести того же размера, доставляли в лабораторию. Зазор между стенками колонки и монолитом парафинировали для ликвидации передвижения влаги по стенкам. Одновременно отбирали смешанные образцы почвы для анализов.

Почвенные монолиты (колонки) устанавливали на воронки с полиэтиленовой сеткой и беззольными фильтрами. Верхний 3 см слой снимали, просеивали через сито 3 мм. В навеску этой почвы (в расчете на 1 см слой колонки) вносили Mn, Zn, Cu и Ni в виде сульфатов по 100 мг/кг, и навеску помещали на поверхность колонки, покрытую тонкой капроновой сеткой. Почву в колонках в таком виде компостировали 2 нед при $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности 60% от ПВ. В контрольную колонку ТМ не вносили.

Промывание дистиллированной водой после компостирования проводили в течение 5 сут, общий объем прошедшей воды — 5 л (соответствовал среднегодовой норме осадков в месте взятия проб почвы). Поддерживали постоянную высоту

столба воды над поверхностью почвы. Фильтрационные воды собирали в приемники и анализировали. После 5-ти сут промывки и стока гравитационной влаги монолиты разрезали на 1 см слои, из которых делали солянокислые вытяжки (1 н. HCl) при соотношении почва : раствор = 1 : 10 и 1-часовом взбалтывании на ротаторе.

Во 2-й серии опытов [4] использовали образцы супесчаной подзолистой почвы (Albeluvisols Harlic, WRB) из гор. АОА1, сформированной на древнеаллювиальных отложениях, стационара “Вербилки” (Московская обл.). Почвой заполняли стеклянные колонки длиной до 30 см и диаметром 1.0–1.5 см (без пузырьков воздуха); на поверхность вносили по 1 мл раствора $^{54}\text{MnSO}_4$, содержащего 1 мг Mn. В течение 2-х сут колонки непрерывно промывали дистиллированной водой, поверхностными водами стационара, экстрактами из листьев древесных пород, растворами фульвокислот с молекулярными массами 320 и 11200 и 0.01 М раствором ЭДТА. Концентрация органических веществ в водах была равна 0.6 мг/мл, скорость фильтрации в среднем — 0.1 мл/мин. Повторность опытов двух–трехкратная.

По окончании промывания колонки расчленили на слои в 1 см и определяли концентрации ^{54}Mn на радиометрической установке.

Для математического анализа полученных результатов использовали точные решения моделей диффузии и конвективной диффузии (дисперсии), подбирая начальные и граничные условия, наиболее правдоподобно отражающие постановку опытов и полученные в опытах результаты. Оценку параметров этих моделей осуществляли подбором, минимизируя различия между экспериментом и расчетом по моделям с учетом аналитических ошибок измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первая серия опытов. Слой почвы 0–20 см имел следующие характеристики: гигроскопическая влажность — 0.58%, гранулометрический состав (%) по фракциям (мм): 1–0.25 — 0, 0.25–0.05 — 84.9, 0.05–0.01 — 7.9, 0.01–0.005 — 2.0, 0.005–0.001 — 2.9, <0.001 — 2.3, минералогический состав фракции <0.001 мм (%): каолинит — 15.8, гидрослюды — 16.6, смектиты и смешаннослойные слюды — 67.6. Агрохимическая характеристика представлена в табл. 1.

На рис. 1 представлены выходные кривые (концентрации в фильтратах) для измеренных в опыте показателей, на рис. 2 — кривые содержания кислоторастворимой формы ТМ в зависимости от глубины колонки.

Зафиксированные в выходных кривых элементы естественным образом разделялись на

Таблица 1. Агрохимическая характеристика песчаной дерново-подзолистой почвы (первая серия опытов)

Глубина слоя, см	рН _{KCl}	H_T^*	Поглощенные основания		P ₂ O ₅ по Кирсанову	K ₂ O по Масловой	Гумус
			Ca	Mg			
		ммоль(+)/кг			мг/кг		%
0–5 (A1)	4.5	42	9	1	105	33	1.20
5–20 (A2)	4.75	–	6	1	–	25	0.81

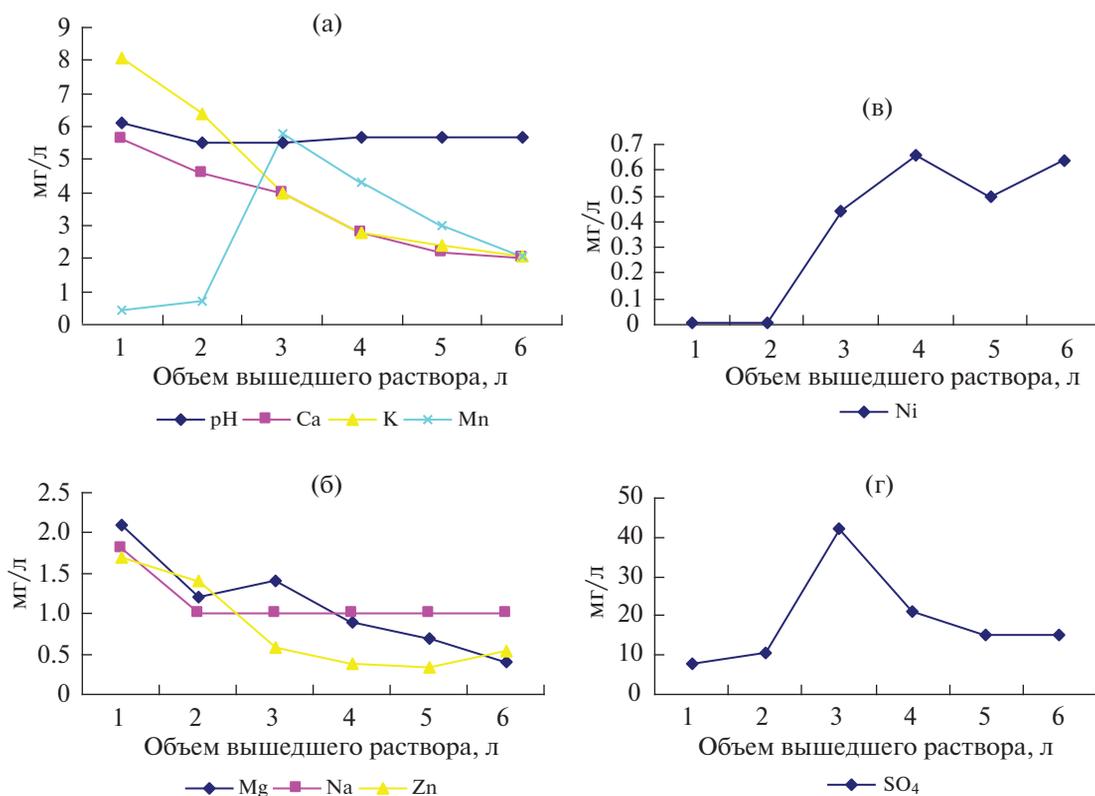
Примечание. H_T – гидролитическая кислотность. Прочерк – отсутствие данных. То же в табл. 2–5.

2 группы: 1 – элементы, которые не вносили в колонку (Ca, Mg, K, Na), 2 – элементы, которые внесли в верхний 1-см слой колонки (Mn, Zn, Cu, Ni, сульфат-ион). Концентрация элементов 1-й группы в выходящем растворе уменьшалась со временем опыта приблизительно по экспоненте (рис. 1). Для элементов 2-й группы такую закономерность отметили для Zn и Cu (для Cu концентрация практически вообще не менялась (0.02–0.01 мг/л, и на рис. 1 она не показана), для Mn, Ni и сульфат-иона на выходной кривой видны характерные для хроматографии пики концентраций. Эти обстоятельства учитывали далее при подборе вариантов моделей, их начальных и граничных условий.

Для согласования данных по выходным кривым элементов 1-й группы с составом почвы опирались на данные по поглощенным Ca и Mg и по обменному K по Масловой (табл. 1). Для элементов 2-й группы (внесенных в колонку) учитывали внесенное количество и содержание их кислоторастворимой формы в опытной и контрольной колонках (рис. 2).

Анализируя далее результаты данного опыта, надо иметь в виду, что в принципе и обменные катионы, и кислоторастворимые формы ТМ лишь условно могут характеризовать миграционно-подвижное количество элементов.

На рис. 2 можно видеть: 1 – в контрольной колонке концентрация кислоторастворимых Cu и

**Рис. 1.** Выходные кривые (первая серия опытов) при внесении тяжелых металлов.

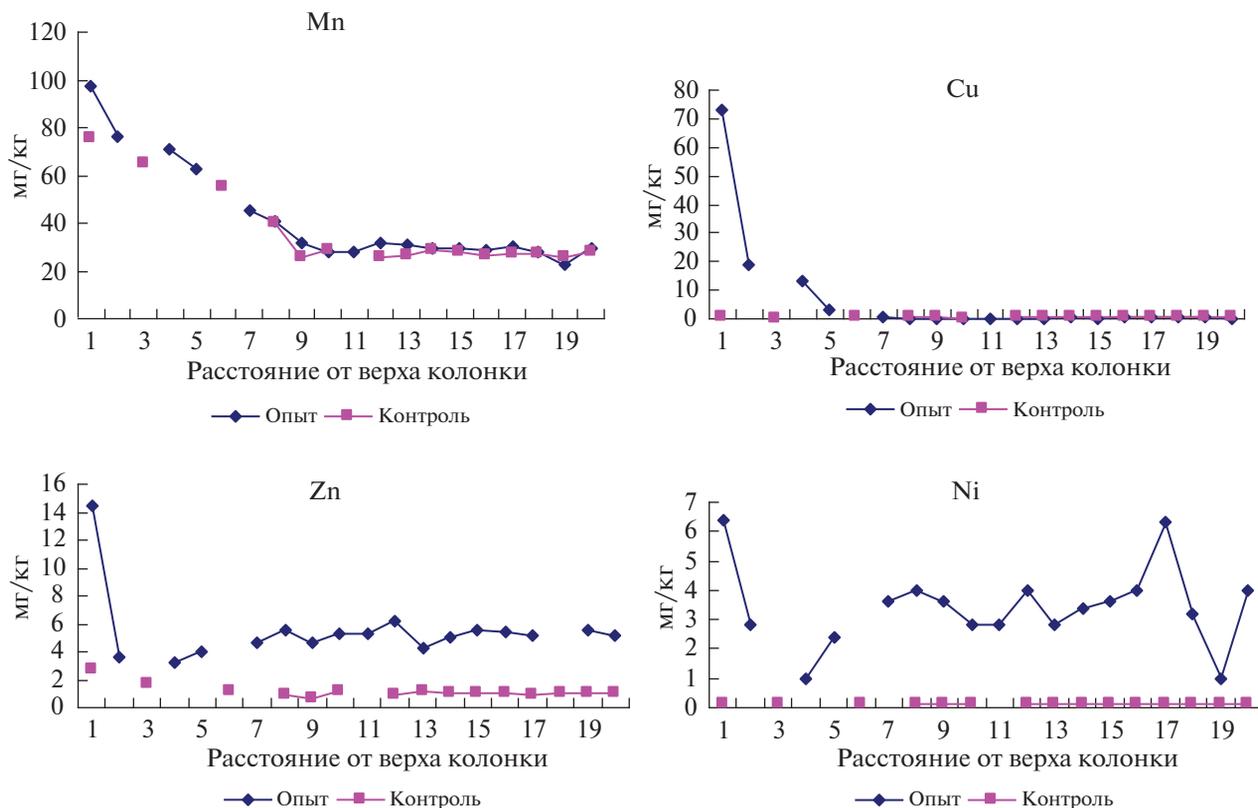


Рис. 2. Содержание кислоторастворимой формы тяжелых металлов по глубине колонки при внесении ТМ (опыт) и без внесения (контроль).

Ni одинакова по глубине, концентрация Zn – немного, а Mn – сильно повышена в верхних слоях колонки; 2 – при внесении ТМ концентрация кислоторастворимых Zn и Ni сильно повысилась на всех глубинах, концентрация Cu тоже сильно повысилась в верхних слоях, Mn – лишь немного повысилась в самых верхних слоях колонки. При этом концентрации Zn и Ni в слое внесения (0–1 см) во много раз меньше внесенного количества (100 мг/кг почвы).

Посмотрим на результаты опыта с точки зрения баланса веществ (табл. 2). Не для всех элементов оказалось достаточно данных, но там, где баланс содержания до и после промывки колонок удалось оценить, наибольшие расхождения составили 26 отн. % для сульфат-иона и 20% для Ni. Как показано ниже, даже эти показатели укладывались в пределы аналитических ошибок измерения концентрации. Поэтому с этой стороны нет оснований предполагать грубые ошибки в данных эксперимента. С другой стороны, это говорит о том, что кислоторастворимая форма изученных ТМ близка к миграционно-подвижной.

Данные табл. 2 дали возможность оценить и общую подвижность элементов (вынос фильтра-

том) в условиях опыта. Наибольший вынос (доля от внесенного количества, %) был отмечен у Mn (130) и сульфат-иона (77), наименьший – у меди (0.5), в долях от общего количества (в %) он был наибольшим у калия (39), наименьшим – у меди (0.49). Напомним, что в этом случае в расчетах были использованы кислоторастворимая и обменная формы элементов в почве.

Проанализируем далее результаты опыта для отдельных элементов с помощью моделей миграции. Начнем с 1-й группы, где изученные элементы не вносили в колонку.

Кальций. Выше было показано (рис. 1а), что для Ca выходная кривая – убывающая, следовательно, с одной стороны, можно использовать модель диффузии из колонки, имеющей исходную концентрацию, представленную в табл. 1 (и принимаемую в качестве миграционно-подвижной), в раствор приблизительно нулевой концентрации (пренебрегая влиянием потока влаги). Дополнительно допускаем, что длина колонки (18 см) значительно больше глубины диффузионного истощения и потому может считаться полубесконечной с границей внизу колонки.

Таблица 2. Условные балансы элементов в первой серии опытов, мг

Составляющая баланса	Элемент										
	Mn	Zn	Cu	Ni	Ca	Mg	K	Na	SO ₄ ²⁻		
Внесено в колонку контроль	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
опыт	12	12	12	12	0	0	0	0	0		134
Кислотораствори- мая (или обменная) форма в колонке после промывки											
контроль	73.5	2.49	0.84	0.22	281	27	47.5	нд	нд		нд
опыт	80.4	12.2	11.6	7.69	нд	нд	нд	нд	нд		нд
Вышло с фильтратом											
контроль	~0	~0	~0	~0	нд	нд	нд	нд	нд		нд
опыт	15.7	3.38	0.06	2.26	16.1	5.1	18.6	5.4	103		103
Сумма до промывки	12 + 73.5 = 85.5	12 + 2.49 = 14.5	12 + 0.84 = 12.8	12 + 0.22 = 12.2	0 + 281 = 281	0 + 27 = 27	0 + 47.5 = 47.5	нд	нд		≥134
Сумма после промывки	15.7 + 80.4 = 96.1	3.38 + 12.2 = 15.6	0.06 + 11.6 = 11.7	2.26 + 7.69 = 9.95	>16.1	>5.1	>18.6	>5.4	>103		>103
Разница	-10.6 (12%)	-1.1 (7.3%)	+1.1 (9.0%)	+2.2 (20%)	-	-	-	-	~31 (26%)		
Вышло с фильтра- том в опыте											
% от среднего	17	23	0.49	20	5.7	19	39	-	-		-
Величина суммы											
% от внесенного	130	28	.50	19	-	-	-	-	≤77		

Примечание. нд – нет данных, в скобках – разница от средней величины суммы (%).

Тогда решение уравнения диффузии для концентрации (C) и количества (Q) вещества, вышедшего из колонки, имеет известный вид [5]:

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erf}(x/\sqrt{4Dt}), \quad (1)$$

$$Q(t) = C_0 \sqrt{4Dt/\pi}, \quad (2)$$

где x – расстояние от нижнего края колонки, t – время, C_0 – начальная концентрация миграционно-подвижного вещества в колонке, D – коэффициент диффузии вещества в почве в целом, erf – интеграл вероятности. Возведя формулу (2) в квадрат, получим

$$D = \frac{Q(t)^2}{t} \frac{\pi}{4C_0^2}, \quad (2a)$$

по которой можно рассчитать величину D , зная количество вышедшего из колонки вещества и предполагая содержание обменного Са в слое 5–20 см в качестве C_0 (аналитическая ошибка этой величины составляет в этом случае ± 15 отн. % [6]. Так как Са в опыте не вносили, то можно считать, что выход его из колонки происходил только в течение 5 сут промывания, а 2 нед компостирования не имели для миграции никакого значения.

Процедура расчетов была следующей. Для каждого из 6-ти сроков измерения концентрации вытекающего раствора сначала рассчитывали величину $Q(t)$, затем величину $Q(t)^2/t$, последнюю усредняли и подставляли в формулу (2a). Необходимо иметь в виду, что точность определения количества Са в растворах данного диапазона концентрации составляет $\pm (15–30)$ отн. % [7]. Оценив величину D , из формулы (1) легко рассчитать глубину истощения почвы ($x_{\text{ист}}$) кальцием от нижнего края колонки, например, до уровня 0.9 от C_0 :

$$C(x, t)/C_0 = 0.9 = \operatorname{erf}(x_{\text{ист}}/\sqrt{4Dt}), \quad (3)$$

величине 0.9 для erf соответствует $x_{\text{ист}}/\sqrt{4Dt} = 1.16$, отсюда $x_{\text{ист}} = 2.32\sqrt{Dt}$.

При этом можно использовать и конвективно-диффузионную модель вымывания из колонки при том же начальном условии и той же границе (внизу колонки), для которой применили условие массообмена с раствором низкой концентрации. Решение уравнения для этого случая взято из работы [8], оно громоздко и здесь не приведено. Процедура была следующей: подбирали такие величины параметров модели, чтобы расчетная и экспериментальная кумулятивные выходные кривые были близки между собой, затем для оценки глубины истощения рассчитывали профиль концентрации внутри колонки. Результаты расчетов по обоим моделям представлены в табл. 3.

Величины диффузионного параметра по 2-м моделям различаются почти на порядок, при этом они меньше, чем для разбавленных растворов. По глубине истощения почвы оба варианта моделей не противоречат предположению о полубесконечности среды. Из литературы известны величины D для почвенного раствора (не для почвы в целом) в пахотной глинистой почве – 3.8×10^{-6} см²/с [9] и полученные с помощью радиоактивной метки величины D при 25°C для кварцевого песка (0.68×10^{-6}) и для дерново-подзолистой песчаной почвы (0.25×10^{-6} см²/с) [10]. Учитывая, что в опыте использовали дерново-подзолистую песчаную почву, полученные величины D_k хорошо согласуются с литературными данными (заметим, что в той же работе [10] для серой лесной среднесуглинистой почвы получена величина 0.12×10^{-6} , а для чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого – 0.07×10^{-6}). Таким образом, можно сделать вывод, что для Са диффузионная модель оказалась менее адекватной, чем конвективно-диффузионная.

Магний. Выходная кривая для Mg аналогична кривой для Са, поэтому использовали те же модели и алгоритмы. По диффузионной модели величина D оказалась значительно больше того, что известно для разбавленных водных растворов (табл. 3), а по конвективно-диффузионной модели величина D_k значительно меньше и кажется вполне приемлемой. Из литературных данных известна лишь одна величина D – 1.7×10^{-8} см²/с для неизвестной почвы [11, 12], которая еще меньше на 2 порядка. Скорее всего, это связано с различиями почв, чем с сильным занижением концентрации фактически миграционно-подвижного Mg. В любом случае конвективно-диффузионная модель в этом случае более адекватна, а предпосылка о полубесконечной среде не опровергнута.

Калий. В этом случае ситуация аналогична той, что для Са и Mg (табл. 3). Для почв (если не брать радиоактивные аналоги калия – Rb и Cs) в литературе приведены следующие величины D : $(0.01–0.1) \times 10^{-6}$ см²/с [11], $(0.0015–0.11) \times 10^{-6}$ (светло-серая лесная и дерново-подзолистая суглинистые почвы) [13]. Полученные нами величины D_k , как более адекватные, лишь немного больше вышеуказанных.

Натрий. Выходная кривая (рис. 1б) имеет несколько странный вид, необъяснимый используемыми в этом случае моделями миграции – концентрация раствора не зависит от времени. Хотя для этой концентрации указана точность измерения $\pm(20–30)\%$ [7, 14], похоже, что измерения проводили на нижней границе чувствительности. Кроме того, нет данных о содержании Na в почве. По этим причинам модели миграции не применяли.

Таблица 3. Оценки параметров моделей миграции в первой серии опытов

Элемент	Диффузионная модель			Конвективно-диффузионная модель			
	C_0 (почва)	$D \times 10^{6*}$, см ² /с	Глубина истощения почвы за 5 сут ($x_{ист}$), см	$D_k \times 10^{6*}$, см ² /с	$V \times 10^5$, см/с	$V/V_{вл}^{**}$	Глубина истощения почвы за 5 сут ($x_{ист}$), см
Ca	6 ммоль(+)/кг	$\frac{1.9}{8-15}$	2.1	$\frac{0.3-0.6}{8-15}$	0.09–0.1	0.008–0.009	~1.5
Mg	1 ммоль(+)/кг	$\frac{20}{5-7}$	6.8	$\frac{0.8-1.2}{5-7}$	0.25	0.022	~2.2
K	25 мг/кг	$\frac{65}{20}$	12.3	$\frac{0.4}{20}$	0.3	0.026	~1.8
Zn	5.5 мг/кг	$\frac{45}{8-21}$	10.3	$\frac{400}{8-21}$	≤0.07	≤0.006	***
	1.0 мг/кг	$\frac{1400}{8-21}$	57				
Cu	–	$\frac{0.14-0.16}{7-8}$	–	$\frac{\sim 0.5}{7-8}$	≤0.01	≤0.00086	***
Mn	–	–	–	$\frac{370}{7}$	12	1.0	***
SO ₄ ²⁻	–	–	–	$\frac{210-300}{10.8}$	13	1.1	***
Ni	–	–	–	–	1) 8.3	0.72	***
					2) 3.1	0.27	
					3) 1.7	0.15	
					4) 0.8	0.069	

*Под чертой приведены величины D для разбавленных растворов из справочников [12].

** $V_{вл}$ – скорость влаги при промывке в расчете на сечение колонки в целом (10 см/сут или 11.6×10^{-5} см/с).

***При внесении вещества сверху колонки происходит перераспределение вещества, а не истощение.

Цинк. В этом случае имеем экспериментальные данные и для выходной кривой (рис. 1б), и для кислоторастворимого Zn внутри контрольной и опытной колонок (рис. 2). Выходная кривая качественно не отличалась от вышеописанных, т.е. не содержала пика концентрации. Распределение по глубине кислоторастворимого цинка в опытной колонке не очень понятно: с одной стороны, содержание в ней примерно в 5 раз больше, чем в контрольной, а с другой стороны, четкий градиент концентрации от места внесения цинка виден только с соседним слоем (1–1.5 см). Другими словами, с одной стороны, не видно типичной картины конвективного переноса, как на выходной кривой, так и внутри опытной колонки, а с другой стороны, внесенный Zn как-то “размазался” по всей колонке.

Что же могло вызвать такое “размазывание”? Физико-химически его можно объяснить тем, что какая-то часть внесенного Zn и после компости-

рования осталась легкоподвижной и, перемещаясь с потоком влаги, сорбировалась частично твердой фазой почвы. Формально можно предположить, что конвективно-диффузионное размытие Zn в колонке было столь велико, что четкий пик концентрации не мог сформироваться.

В результате этих рассуждений использовали для Zn 2 модели миграции: диффузионную, аналогичную вышеописанной (формулы (1)–(3)) для полубесконечной среды с границей у нижнего конца колонки, и конвективно-диффузионную для полубесконечной среды с границей и мгновенным источником на верхнем конце колонки (соответствующее решение уравнения давно известно и приведено, например, в [15]). Из табл. 3 видно, что оценки величин D и D_k очень велики, для D они просто невозможны, а для D_k они могут быть частично оправданы сильным конвективным перемешиванием внутри колонки.

Известные в литературе данные для D значительно меньше, например, в сводке [12] — 3×10^{-7} см²/с и ниже, в наших данных для D и D_k разных почв — 2.3×10^{-6} и ниже (наибольшие величины — для орошаемых засоленных почв Египта) [16–18].

Медь. Концентрация на выходной кривой практически постоянная (как для Na) и очень низкая (0.01–0.02 мг/л) с полуколичественной точностью определения $\pm 50\%$ [19], поэтому выходную кривую не анализировали, тем более, что из опытной колонки вымылось лишь 0.5% имеющейся меди.

Для кислоторастворимой формы Cu ситуация более простая, чем для Zn (рис. 2) — от слоя внесения уменьшение концентрации имело вполне диффузионный характер, снижаясь до тех же величин, что в контрольной колонке. В таком случае имеем диффузию из слоя внесения в полубесконечную среду в течение 19 сут (компостирование + промывка). Решение уравнения диффузии имеет вид [5]:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{h+x}{\sqrt{4Dt}} + \operatorname{erf} \frac{h-x}{\sqrt{4Dt}} \right), \quad (4)$$

где C_0 — начальная концентрация вещества в слое внесения на границе полубесконечной среды, h — толщина слоя внесения. Оценка параметра D представлена в табл. 3. Использовали также конвективно-диффузионную модель для тех же условий, но для срока 5 сут (время промывания); решение получено как частный случай общего решения 3.24 из [20] (здесь не приведено из-за громоздкости).

Имеются следующие литературные данные о величинах D для меди в почвах и близких средах: водонасыщенные каолинит — 4.2×10^{-6} см²/с и монтмориллонит — $(0.27-0.95) \times 10^{-6}$ (сводка [9]); наши данные для разных почв в полевых условиях — $(0.01-6.3) \times 10^{-8}$ [21–24], отдельно для орошаемых засоленных почв Египта — $(1.2-3.6) \times 10^{-6}$ [16]. Таким образом, полученные в данной работе оценки (табл. 3) вполне разумны и подтверждают слабую зависимость D и D_k от потока влаги в отличие от других элементов, что свидетельствует о малой доле легкоподвижных форм Cu в данных условиях.

Марганец. В этом случае имеется выходная кривая с четко выраженным пиком (рис. 1а), свидетельствующая о конвективно-диффузионном процессе, и распределение по колонкам кислоторастворимого Mn (рис. 2), которые лишь немного различаются между собой практически только в слое 0–2 см. То есть внутри опытной колонки конвективно-диффузионный процесс заметно не

проявился. В то же время, по величинам баланса вещества (табл. 2) получилось, что количество Mn, вышедшее из колонки, было несколько больше, чем было внесено, и больше стало кислоторастворимого Mn в опытной колонке по сравнению с контрольной, хотя относительную разницу в балансе (12%) можно конечно отнести и к ошибкам измерения ($\pm 25\%$ по [19]).

В результате этих обстоятельств можно сделать вывод, что основная часть легко-миграционно-подвижного Mn вышла из колонки, и параметры этого процесса могут быть оценены по алгоритму из работы [15] (табл. 3). За время опыта из опытной колонки вынесено Mn на 31% больше, чем было внесено (табл. 2), следовательно, была вынесена и какая-то часть кислоторастворимого Mn. Отметим еще, что и в контрольной колонке не было равномерного распределения Mn по глубине (рис. 2), что скорее всего связано с некоторым загрязнением поверхности исходной почвы.

Найденная оценка D_k на 2 порядка превышает величину D для разбавленных растворов, а величина V равна скорости движения влаги в колонке (табл. 3), что указывает на перенос в этом случае водорастворимого Mn и на большое влияние потока влаги на перемешивание раствора в порах почвы. Только для орошаемых засоленных почв Египта найденные величины D и D_k приближались к параметрам для растворов [16], а в остальных случаях они значительно меньше [9, 11, 12, 21].

Сульфат-ион. В этом случае имеем типичную выходную кривую с пиком (рис. 1г). Обычно считается, что сульфат-ион слабо сорбируется почвами, но несколько сильнее, чем хлорид-ион, который часто используют в подобных опытах как метку воды [1]. Информации об исходном содержании сульфата в колонках не имеется. Из-за этого баланс сульфата несколько неопределенный (табл. 2), но вынесено из опытной колонки 77% от внесенного, что подтверждает возможность некоторой сорбции его почвой. Параметры миграции оценивали по выходной кривой так же, как для Mn (табл. 3). В этом случае так же, как для Mn, оценка величины D_k намного больше, чем D для раствора, а скорость конвективного переноса та же, что для воды.

Никель. Для этого элемента модельное описание процесса выглядит наиболее сложным. Выходная кривая показывает 2 пика, а кислоторастворимая форма не только сильно увеличилась внутри опытной колонки (как у Zn), но и показывает еще 2–3 пика, которые возможно вышли бы из колонки при более продолжительном промывании. В то же время баланс Ni не нарушен — весь

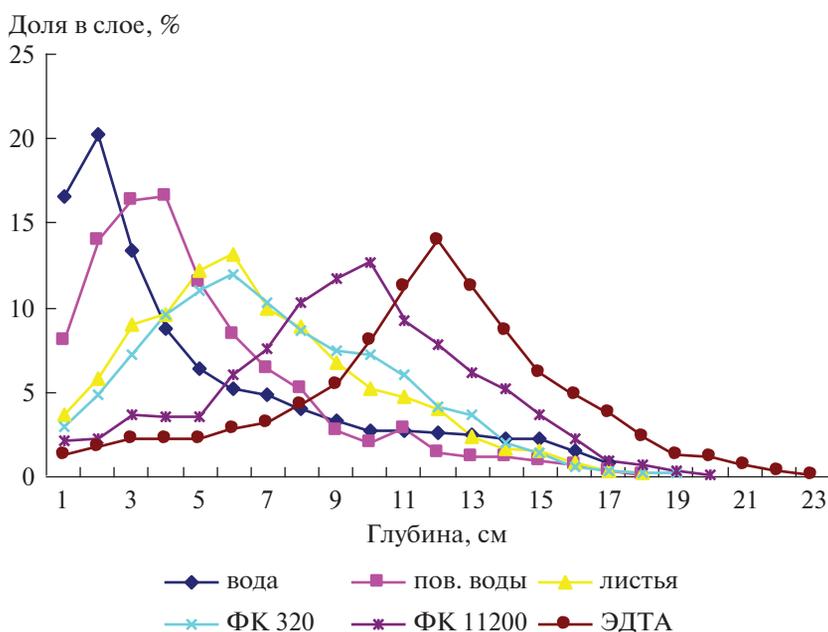


Рис. 3. Распределение ^{54}Mn по глубине почвенных колонок после 2-суточного промывания растворами: дистиллированной водой (вода), водами с поверхности почвы (пов. воды), водным экстрактом листьев (листья), водным раствором фульвокислот с молекулярной массой 320 (ФК-320), то же с молекулярной массой 11200 (ФК-11200), водным раствором ЭДТА (ЭДТА).

прирост осуществился за счет внесенного количества элемента.

Все говорит в пользу того, что имеет место существование в почве нескольких форм Ni, медленно обменивающихся между собой. Для такой многокомпонентной ситуации можно использовать упрощенный хроматографический подход с оценкой только скоростей движения пиков концентрации (табл. 3). Визуально видны 4 пика (формы Ni) с размахом скорости передвижения по колонке в 10 раз, причем самый быстрый пик двигался со скоростью 0.7 от скорости воды. Пик, намеченный в конце выходной кривой, полностью не оформился (не видна спадающая ветвь), поэтому нами не оценивался.

Таким образом, в первой серии опытов, где в колонку вносили смесь сульфатов ТМ, пришлось иметь дело с разнообразными ситуациями. Например, диффузионная модель показала формально приемлемые величины параметра D только для Ca и Cu, а конвективно-диффузионная модель — уже для Ca, Mg, K и Cu. Очень легкоподвижные формы в данной почве,двигающиеся со скоростью воды, выявились для Mn, Ni, сульфат-иона.

Вторая серия опытов. В этом случае состав вытекающего раствора не определяли, а измеряли только содержание метки ^{54}Mn в слоях толщиной 1 см почвенных колонок с разным составом промывного раствора (рис. 3).

Показано, что характер всех кривых соответствует модели конвективно-диффузионного переноса с одним основным пиком и несколькими слабовыраженными на восходящих и нисходящих ветвях. Поэтому ограничились оценкой параметров только для главных пиков. Результаты оценки представлены в табл. 4.

Отметим сразу, что во 2-й серии опытов линейная скорость воды была на порядок больше, чем в первой. Хотя почвы качественно близки (песчаная дерново-сильноподзолистая и супесчаная подзолистая), параметры миграции Mn в них сильно различались: 1 — скорость конвективного переноса в первой серии равна скорости потока влаги, а во второй серии — на 2–3 порядка меньше; 2 — величина D_k в первой серии на 2 порядка больше, чем D в разбавленных растворах, а во второй серии — того же порядка, что и в растворах.

Укажем возможные причины таких различий. В первой серии опытов оценивали миграцию стабильных изотопов Mn, во второй — миграцию радиоизотопной метки ^{54}Mn , хотя с этой меткой вносили и стабильные изотопы Mn, да и в самой почве были наверняка соединения его стабильных изотопов. Считаем, что в подобных опытах с почвой на поведение метки влияют не только процессы, одинаковые со стабильным Mn, но и изотопный обмен со стабильным Mn почвы, который заметно замедляет миграцию метки, не сказываясь на миграции стабильных изотопов.

Таблица 4. Оценки параметров конвективно-диффузионной модели миграции ⁵⁴Mn во второй серии опытов (для основного пика)

Вариант промывки	$D_k \times 10^6$, см ² /с	$V \times 10^5$, см/с	$V/V_{вл}$
Дистиллированная вода	5.9–6.9	0.7–0.87	0.005–0.007
Поверхностные воды	12–13	1.3–1.7	0.01
Экстракт листьев	14–18	2.8–3.2	0.02
ФК-320	13–21	2.8–3.0	0.02
ФК-11200	12–25	5.3	0.04
ЭДТА	6.8–14	6.7	0.05

Примечания. 1. Величина коэффициента диффузии D для разбавленных растворов $\sim 7 \times 10^{-6}$ см²/с. Рассчитанная средняя линейная скорость воды в колонках $V_{вл} \sim 130 \times 10^{-5}$ см/с. 2. Растворы: дистиллированная вода, вода с поверхности почвы (поверхностные воды), водный экстракт листьев, водный раствор фульвокислот с молекулярной массой 320 (ФК-320), то же с молекулярной массой 11200 (ФК-11200), водный раствор ЭДТА (ЭДТА). То же в табл. 5.

Таблица 5. Оценки коэффициентов распределения (K_2 , K_d) для сорбции элементов и коэффициентов конвективной диффузии в почвенных растворах (D_{k1}) при миграции в почвенных колонках

Элемент (вариант)	K_2	K_d , мл/г	$D_{k1} \times 10^6$, см ² /с
Первая серия опытов			
Ca	160	62	150
Mg	63	24	130
K	53	20	44
Zn	≥230	≥88	≥190000
Cu	≥1600	≥610	≥1600
Mn	0.51	0.19	1100
SO ₄ ²⁻	0.38	0.14	660
Ni-1	1.1	0.40	–
Ni-4	19	7.3	–
Вторая серия опытов (⁵⁴ Mn)			
Вода	230	88	3000
Поверхностные воды	140	53	3600
Экстракт листьев	69	26	2300
ФК-320	69	26	2400
ФК-11200	34	13	1300
ЭДТА	27	10	600

Это довольно очевидное предположение можно было бы проверить, если бы изучали состав выходного раствора и распределение химических форм стабильных изотопов Mn по глубине почв в колонках.

В табл. 4 варианты опыта расположены по возрастанию скорости конвективного переноса ⁵⁴Mn (примерно в 8 раз), это возрастание вероятно связано с усилением комплексобразования метки с органическими веществами растворов и, соответственно, удержанием ее в водорастворимой форме. В то же время, величины D_k в этой серии опытов изменяются слабее (до 3 раз) и при том же порядке рассмотрения проходят через максимум.

Общее обсуждение. Используя известные теоретические детализации параметров уравнения конвективной диффузии, например, в [25] для многофазных сред, подобных почве, можно по величине $V/V_{вл}$ (табл. 3, 4) оценить такую величину, как коэффициент распределения мигрирующего вещества между твердой и жидкой фазами (K_2 – безразмерный на единицу объема и K_d (мл/г) на единицу массы твердой фазы; $K_2 = K_d d_0$, где d_0 – плотность твердой фазы).

По дисперсионной составляющей уравнения конвективной диффузии можно оценить и коэффициент конвективной диффузии в почвенном растворе D_{k1} . Результаты этих оценок представлены в табл. 5. Для расчетов использовали упрощенные формулы конвективной и дисперсионной составляющих общего миграционного переноса.

Для конвективной составляющей

$$V = V_{вл} \frac{l_0/l_1}{\theta_1 + \theta_2 K_2}, \tag{5}$$

где l_0/l_1 – коэффициент извилистости для жидкой фазы (почвенного раствора), θ_1 и θ_2 – объемные доли жидкой и твердой фаз почвы.

Для дисперсионной составляющей

$$D_k = \frac{(l_0/l_1)^2 \theta_1 D_{k1}}{\theta_1 + \theta_2 K_2}, \tag{6}$$

где D_{k1} – коэффициент конвективной диффузии в жидкой фазе (почвенном растворе). При оценке величин D_{k1} использованы параметры K_2 , полученные из формулы (5). В обеих формулах (5) и (6) в качестве одного из упрощений принята линейность изотермы сорбции.

Найденные таким образом величины коэффициентов распределения имеют вполне обычный порядок, наименьшие – у слабосорбирующегося в легких почвах аниона, а также у легковымывающихся Mn и Ni. Для ⁵⁴Mn, как и ожидалось (см. выше), коэффициент распределения значительно больше, чем у стабильных изотопов Mn.

Если величины D_k только у нескольких элементов (Zn, Mn, SO₄²⁻) значительно превышали показатель D для разбавленных растворов, то величины D_{k1} уже на 2–3 порядка были больше послед-

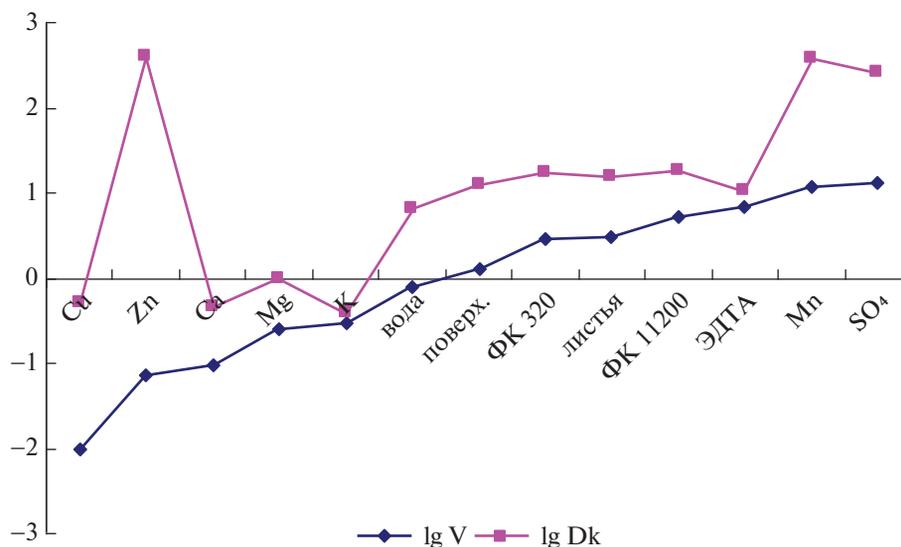


Рис. 4. Зависимость коэффициентов конвективной диффузии (дисперсии) элементов D_k от скорости их конвективного переноса V в почвах в целом для совокупности 2-х серий колоночных опытов.

них для всех элементов (кроме К) и вариантов обеих серий опытов. Это и понятно, т.к. гидродинамическое смешивание происходит именно в почвенном растворе.

Представляли интерес связи между параметрами миграции, оцененными независимо друг от друга. Так как разброс величин параметров суммы 2-х серий опытов составил несколько порядков, то использовали их логарифмическое преобразование. В результате неплохая связь обнаружена только между величинами D_k и V (рис. 4). Показано, что из общей закономерности резко выпадает только Zn, для которого получено труднообъяснимое сочетание очень высокой величины D_k и очень низкой V . Если исключить этот элемент, то получим уравнение регрессии

$$\lg(D_k \times 10^6) = 0.5384 + 1.157 \lg(V \times 10^5) + 0.3567(\lg(V \times 10^5))^2,$$

где уровень значимости уравнения — 0.005, коэффициенты регрессии — 0.02–0.001, коэффициент детерминации — 0.88, ошибка уравнения — 0.38. В упрощенном виде (без квадратичного члена) уравнение имеет вид:

$$\lg(D_k \times 10^6) = 0.838 + 0.9338 \lg(V \times 10^5),$$

где уровень значимости уравнения — 0.025, коэффициенты регрессии — 0.001, коэффициент детерминации — 0.77, ошибка уравнения — 0.50. Отметим, что найденная закономерность получилась общей для разных мигрирующих элементов и разных условий проведения экспериментов. Упрощенный вариант регрессии соответствует

известной зависимости для определения параметра гидродинамической дисперсии (шага смешения) [1, 26].

Похожая работа с почвенной колонкой описана в работе [27], где нарушенная почва сначала была насыщена раствором CaCl_2 , а затем пропускали раствор CuSO_4 . Анализировали выходные кривые на количество Cl^- , SO_4^{2-} , Cd^{2+} , Cu^{2+} и электропроводность во времени на разных глубинах колонки. Для конвективно-дисперсионной модели оценивали фактор замедления (величина, близкая K_2): по данным электропроводности для сульфат-иона он был равен 1.0–1.4 (у нас — 0.38), для иона меди ~12.6, по выходной кривой для иона меди ~14 (у нас — намного больше, скорее всего из-за других условий подготовки почвы и значительно меньших концентраций почвенного раствора).

В другой типичной для этого направления работе [2] авторы пытались совместить независимые результаты, полученные в сорбционных и колоночных опытах для Cd, т.е. применить параметры изотерм и кинетики сорбции в конвективно-дисперсионной модели миграции для выходных кривых. Из этого мало что получилось, и авторам тоже пришлось решать обратные задачи для оценки параметров (но с меньшими упрощениями, чем у нас) — кроме параметров переноса и изотермы сорбции привлекали параметры кинетики обменной и необменной сорбции. При этом оценки параметров зависели как от почвы, так и от условий проведения колоночных опытов.

В работе [3] также изучали Cd, причем исследованная песчаная почва была исходно загрязнена ТМ, в том числе Cd, а авторы еще вносили стабильную метку ^{111}Cd , что сближает эту работу со второй серией опытов, исследованной нами. Показано, что в модели переноса надо учитывать нелинейность изотерм сорбции, кинетику сорбции, а параметры модели для метки и почвенного Cd где-то были близкими, а где-то — нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыты с промыванием почвенных колонок в основном сводятся к проверке адекватности моделей миграции, к возможности использовать для прогнозов некоторых параметров (характеристик), оцененных из более простых независимых от миграции экспериментов. Однако в подобных колоночных опытах используют достаточно большие скорости движения влаги, которые практически не встречаются в почвах естественного залегания. При таких высоких скоростях нарушаются условия равновесия между жидкой и твердой фазами почвы (возникает необходимость учета кинетики сорбции—десорбции веществ), усиливаются гидродинамические эффекты перемешивания в почвенном растворе, которые могут быть несущественными в естественных условиях. В результате параметры миграционных уравнений получаются индивидуальными в каждом опыте, не сопоставимыми с параметрами в естественных условиях, в меньшей степени отражают свойства почв и мигрирующих веществ и в большей степени — условия эксперимента. По-видимому, надо изменить постановку задачи на оценку форм, в которых передвигаются вещества, и на идентификацию возможных процессов при миграции в почве (усиленных высокой скоростью потока влаги), чему могут помочь миграционные модели. В этом (и в дальнейшем) состоит наша версия ответа на вопрос, поставленный в начале работы.

Чтобы разобраться в каждом конкретном опыте в указанных выше вопросах, необходим комплекс измерений: концентраций веществ в вытекающих растворах (выходных кривых), концентраций этих же веществ по длине почвенной колонки (хотя бы после окончания промывки). Если используют радиоактивную (или другую) метку мигрирующих веществ, то это не упрощает работу, а требует дополнительного исследования метки в выходном растворе и в почве как самостоятельного вещества.

При указанном выше подходе параметры моделей миграции оцениваются решением обратных задач тем или иным способом. Может потребоваться не одна модель миграции: одни — для выходной кривой, другие — для почвы и разных

мигрирующих веществ или для разных их форм. Иногда используют компостирование внесенных в колонку веществ перед промывкой. В течение компостирования несомненно происходит диффузия, что тоже необходимо учитывать при моделировании. Суммарные данные 2-х серий экспериментов, разобранных в данной работе, позволили найти довольно тесную связь между коэффициентами конвективной диффузии (дисперсии) и скоростями конвективного переноса веществ.

Параметры моделей миграции, оцениваемые при решении обратных задач, можно назвать первичными (внешними), при раскрытии которых, исходя из теоретических представлений, можно оценить и параметры 2-го уровня (вторичные), такие как коэффициенты сорбции (распределения между фазами почвы), дисперсионные коэффициенты почвенного раствора и другие (в зависимости от сложности модели).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раймундо-Раймундо Э., Никольский Ю.Н., Губер А.К., Ландерос-Санчес С. Оценка адекватности параметров переноса некоторых химических веществ, полученных в колоночных экспериментах // Почвоведение. 2012. № 7. С. 754—762.
2. Selim H.M., Buchter B., Hinz C., Ma L. Modeling the transport and retention of cadmium in soils: multireaction and multicomponent approaches // Soil Sci. Am. J. 1992. V.56. № 4. P. 1004—1015.
3. Seuntjens P., Tirez K., Simunek J., van Genuchten M.Th., Cornelis C., Geuzens P. Aging effects on cadmium transport in undisturbed contaminated sandy soil columns // J. Environ. Qual. 2001. V. 30. P. 1040—1050.
4. Шестаков Е.И., Карпунин А.И., Кауричев И.С., Рачинский В.В. Миграция и трансформация соединенный марганца в подзолистых почвах // Почвоведение. 1989. № 12. С. 35—47.
5. Галлямов М.О. Диффузия в полимерах: визуализация решений типичных задач диффузии. М.: КРАСАНД, 2014. 248 с.
6. Прохорова З.А., Фрид А.С. Изучение и моделирование плодородия почв на базе длительного полевого опыта. М.: Наука, 1993. 189 с.
7. ГОСТ 27384-87.
8. Van Genuchten M.Th., Alves W.J. Analytical solutions for the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation // US Department of Agriculture Technic. 1982. Bul. № 1661. 151 p.
9. Shackelford C.D. Laboratory diffusion testing for waste disposal. A Review // J. Contam. Hydrol. 1991. V. 7. P. 177—217.
10. Граковский В.Г. Диффузия ионов в почве // Технологическое воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля. Научн. тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1991. С. 44—53.
11. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.

12. Фрид А.С. Опыт экспериментальной оценки доступности веществ почвы корням растений на основе миграционной концепции // *Агрохимия*. 1996. № 6. С. 36–46.
13. Артемьева З.С., Фрид А.С., Титова В.И. Миграционная доступность калия растениям на суглинистых почвах // *Агрохимия*. 2019. № 7. С. 16–26.
14. ГОСТ 27384–84.
15. Рыжинский М.В., Фрид А.С., Прохоров В.М. Сравнение точного и приближенного решений уравнения вынужденной диффузии при определении параметров хроматографического переноса // *Журн. физ. химии*. 1971. Т. 45. № 11. С. 2875–2879.
16. Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И. Миграция тяжелых металлов в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами (подведение итогов) // *Агрохимия*. 2016. № 11. С. 46–57.
17. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей миграции Zn и Cd в пахотных почвах в зоне воздействия металлургического комплекса // *Агрохимия*. 2018. № 6. С. 63–67.
18. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей вертикальной миграции в почвах тяжелых металлов в окрестности завода по производству свинца и сурьмы // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2019. Вып. 97. С. 150–164.
19. ГОСТ 27384–2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств.
20. *Malkovich R.Sh. Matematika diffuzii v poluprovod. (BookFi.org).djvu*
21. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей миграции тяжелых металлов и других элементов из пиритных хвостов в первые два месяца после попадания на карбонатную песчаную почву // *Агрохимия*. 2018. № 2. С. 88–98.
22. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей миграции тяжелых металлов в ненарушенных лесных почвах в зоне воздействия сталелитейного завода // *Агрохимия*, 2018. № 3. С. 72–76.
23. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Миграционное поведение тяжелых металлов и фтора в почвах Оренбургской техногенной биогеохимической провинции и его прогноз на 2020 год // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 79–90.
24. Frid A.S., Borisochkina T.I. Vertical migration of pollutants in the soils of the Orenburg technogenic biogeochemical province // *SCIRESA J. Environ.* 2019. V. 3. Iss. 2. P. 46–69.
25. Рыжинский М.В., Фрид А.С. Обобщение уравнения конвективной диффузии на многофазную среду // *Бюл. научн.-тех. информ. по агроном. физике*. Л., 1973. № 17–18. С. 17–21.
26. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Метод. руково / Под ред. Шеина Е.В. М.: Изд-во МГУ, 2001. 200 с.
27. Vogeler I. Copper and calcium transport through an unsaturated soil column // *J. Environ. Qual.* 2001. V. 30. P. 927–933.

Methodical Regularity of Studying Migration of Heavy Metals and Other Substances in Soil Columns at Pollution

A. S. Frid^{a,#} and T. I. Borisochkina^a

^a*Soil Institute V.V. Dokuchaev
Pyzhevsky per. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia*

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

Study of migration of chemical elements by washing soil columns has a long history. In these studies, the flow rates of moisture in the columns are significantly higher than the flow rates of moisture in natural conditions. Therefore, instead of analyzing migration under equilibrium sorption conditions researchers have to analyze migration with sorption kinetics. This complicates the interpretation of the results and their description by soil models. Two series of experiments with soil columns containing different sets of measured parameters were analyzed. It was shown that there were different distributions of concentrations in the output curves and within soil columns depending on the studied element. We used models of diffusion and convective diffusion (dispersion) in the analysis of experimental data. We obtained formally admissible values of diffusion coefficients in soil only for Ca and Cu and convective diffusion coefficient (dispersion) for Ca, Mg, K, Cu. It was found that SO_4^{2-} , Mn and Ni moved along the column at the speed of water. They are very mobile components. In the second series of experiments with ^{54}Mn isotope, washing solutions with complexing agents were used. Very mobile forms of Mn have not been recorded apparently due to isotopic exchange with soil Mn. Parameters of migration models are found. Estimates of the coefficients of the distribution of elements between the liquid and solid phases and the coefficient of convective diffusion are calculated.

Key words: irrigation of soil columns, clarification of the task, migration models and parameters, heavy metals, macronutrients.

УДК 631.811.98:632.95

К ВОПРОСУ О НОРМАТИВНО-ПРАВОВОМ РЕГУЛИРОВАНИИ БИОСТИМУЛЯТОРОВ¹

© 2020 г. О. И. Яхин^{1,*}, А. А. Лубянов², И. А. Яхин²

¹ *Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук 450054 Уфа, просп. Октября, 71, Россия*

² *Научно-производственное предприятие “Эко Природа” 452533 с. Улькунды, Дуванский р-н, ул. Валиева, 33, Республика Башкортостан, Россия*

**E-mail: yakhin@anrb.ru*

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Интенсивное развитие направления исследований биостимуляторов привело к созданию научно обоснованных подходов к разработке их определения и классификации, выявлению новых сведений о физиологической активности и механизмах действия, а также открыло широкие перспективы получения и практического использования в сельском хозяйстве. Производство и применение агрохимикатов и пестицидов регулируется законодательством, в то время как вопросы нормативно-правового регулирования биостимуляторов, по данным мировой литературы, являются актуальным предметом обсуждения для регулирующих органов, ученых, производителей этих препаратов. В обзоре проведен концептуальный анализ формирования законодательства для биостимуляторов. Согласно современным представлениям, биостимуляторы рассматриваются как перспективная категория/группа в системе государственного регулирования.

Ключевые слова: нормативно-правовое регулирование, биостимуляторы.

DOI: 10.31857/S0002188120090124

ВВЕДЕНИЕ

Направление исследований биостимуляторов в последние годы получило широкое признание академического сообщества [1–3]. Достигнут значительный прогресс в разработке ключевых концепций [1, 4–12], терминологии [1, 2, 6], классификации [1, 6, 13, 14], а также фундаментальных основ создания и применения биостимуляторов [15–19]. Изучение биологической активности и механизмов действия биостимуляторов включает рассмотрение физиологических [10, 20–25], биохимических [26–32], молекулярных [33–35], генетических [10, 36], токсикологических [10, 37] и экологических аспектов [38–41]. Биостимуляторы предназначены для стимуляции роста растений, повышения эффективности использования питательных элементов, уменьшения негативного действия абиотических стрессовых факторов, увеличения продуктивности и улучшения качества урожая сельскохозяйствен-

ных культур [42–50]. Это обуславливает большие перспективы их применения в агротехнологиях [7, 9–11, 51].

В связи с тем, что направление исследований биостимуляторов характеризуется высокой практической значимостью, следует отметить существующую практику законодательного регулирования применения препаратов для защиты, питания и регуляции роста растений в сельском хозяйстве. Нормативно-правовое регулирование биостимуляторов широко обсуждают и рассматривают в последние годы правительственные и неправительственные организации: Европарламент, Еврокомиссия, национальные министерства и ведомства, Европейский Совет производителей биостимуляторов (European Biostimulants Industry Council – EBIC), Коалиция по биостимуляторам (Biostimulant Coalition), Союз производителей биологических препаратов (The Biological Products Industry Alliance – BPIA) и др. Различным аспектам регулирования биостимуляторов посвящен ряд статей, опубликованных в научных журналах, а также авторитетных интернет-источ-

¹ Работа выполнена частично в рамках государственного задания (№ АААА-А16-116020350027-7) ИБГ УФИЦ РАН.

никах. Цель и задачи настоящего обзора – систематизация существующих представлений и концептуализация формирования законодательства в области регулирования биостимуляторов.

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ БИОСТИМУЛЯТОРОВ

При обсуждении нормативно-правового регулирования биостимуляторов одной из первых следует упомянуть работу Ciavatta и Cavani (2006), в которой были рассмотрены вопросы включения биостимуляторов в законодательство об удобрениях [52]. Рассматривая препараты с “биостимулирующей активностью” и акцентируя внимание на гуминовых кислотах, аминокислотах, пептидах, исследователи отмечали отсутствие их регулирования европейскими, итальянскими правовыми нормами. Согласно приведенным в цитируемой выше статье сведениям, 12 июля 1995 г. состоялось первое совещание рабочей группы “Хелаторы и биостимуляторы”. Спектр рассматривавшихся вопросов включал обсуждение в рамках существовавшего на тот момент законодательства понятийно-категориального аппарата и терминологии, поиск оптимального определения, разработку методологии регулирования, а также аналитических методов контроля [52]. Исключительно важной в контексте развития концепции регулирования биостимуляторов является работа A. Wasak (2008), которая рассмотрела актуальные вопросы на основе информации экспертов в области биорегуляторов и компаний, производящих биостимуляторы, из Польши, Европы и Америки, и отметила необходимость их решения на уровне ЕС и в мировом масштабе [5]. Из этой работы следуют важные концептуальные выводы о необходимости: 1 – упрощения требований к регистрации “экологичных” органических/натуральных препаратов с целью их более быстрого внедрения и снижения затрат и 2 – отделения биостимуляторов от удобрений, что обусловлено фундаментальными различиями механизмов их действия. Первое может предполагать меньшее количество испытаний для *a priori* “безопасных” препаратов, например, оценку только острой токсичности. Второе логично обосновывается тем, что удобрения содержат много питательных веществ и обеспечивают растения макро- и микроэлементами, а биостимуляторы стимулируют физиологические процессы [5].

Учитывая уникальные свойства биостимуляторов, Европейский Совет производителей биостимуляторов (European Biostimulant Industry

Council – EBIC) с 2011 г. проводил активную работу по разработке предложений для создания соответствующей нормативно-правовой базы с целью развития инноваций и препаратов нового поколения, а также защиты потребителей в Европе [53]. EBIC поддержал включение биостимуляторов в расширенное определение “удобрительных материалов” (*fertilising materials*) в рамках предварительного обсуждения пересмотра Регламента ЕС № 2003/2003 об удобрениях и предложил подход к регулированию, основанный на требованиях к препаратам, аналогичный для нутрицевтиков/функциональных пищевых продуктов. При этом отмечена необходимость гибкого подхода, но в то же время предусматривающего требования к эффективности и безопасности в соответствии с существующими правилами Евросоюза (ЕС), что позволит регулирующим органам предоставлять фермерам возможность выбора эффективных и безопасных препаратов. Согласно позиции EBIC, необходимость регулирования биостимуляторов на уровне ЕС обусловлена фрагментацией “регуляторного ландшафта” и отсутствием единого рынка, что увеличивает затраты на продвижение продукции и задерживает формирование этого высоко инновационного сектора [53].

Следует отметить важную роль исследования du Jardin (2012) для формирования современной и научно обоснованной нормативно-правовой базы биостимуляторов. В нем особое внимание было акцентировано на необходимости признания “оригинальности/самостоятельности” биостимуляторов [6]. Согласно этой точке зрения, биостимуляторы не должны рассматриваться как “удобрения”, потому что их основной функцией не является доставка питательных веществ растению, хотя они могут стимулировать питание растений, в то же время многие биостимуляторы могут проявлять защитные свойства, но не как пестициды, не являясь “средствами защиты растений” в рамках закона ЕС. Более того, du Jardin (2012) отмечал необходимость пересмотра действующих определений удобрений и средств защиты растений в регламентах ЕС [6]. Проведенная работа реализовала научный подход для создания правовой базы ЕС для биостимуляторов, основанный на обосновании концепции биостимуляторов, выявлении в научных базах данных, охватываемых термином “биостимулятор” веществ и материалов, и разработке основанного на описанных в научной литературе механизмах действия определений [54]. Полученные результаты исследования были обсуждены заинтересованными сторонами и компетентными органами

государств-членов ЕС на заседании Рабочей группы Комиссии по удобрениям.

Summegeg и соавт. (2013), отмечая ограниченное законодательное регулирование биостимуляторов и их классификацию как “специализированных удобрений”, акцентировали внимание на необходимости дополнительных методов тестирования и валидации для оценки требований к биостимуляторам при разработке нового законодательства [55]. Соответственно в качестве эффективной системы для биологических испытаний и классификации биостимулирующих веществ и препаратов было предложено использование высокопроизводительного анализа изображений (high efficiency and throughput image analysis).

Яхин и соавт. (2014) обсуждали возможность “выделения биостимуляторам определенного места в системе регуляторов роста, пестицидов и агрохимикатов и целесообразность международной унификации” в этой сфере [7]. Chojnacka и соавт. (2014), обсуждая законодательство биостимуляторов и рассматривая их как отличающуюся от удобрений категорию, отмечали потенциал перехода от “традиционной модели N–P–K” до более интегрированных подходов к питанию растений, включающих технологии применения биостимуляторов [56]. Траоп и соавторы (2014) рассматривали биостимуляторы и добавки для удобрений как отличающиеся друг от друга, а также от категории удобрений, основываясь на характеристиках, связанных с их функциональностью, и отмечали, что биостимуляторы регулируются либо в соответствии с законами об удобрениях, либо законами о средствах защиты растений, а в некоторых случаях – по обеим схемам [57].

Работа du Jardin (2015) продолжила начатую им в 2012 г. концептуализацию подходов к научному обоснованию и созданию нормативно-правового регулирования биостимуляторов [1, 6]. При этом было сформулировано определение, направленное на разграничение биостимуляторов, с одной стороны, и удобрений, пестицидов, агентов биоконтроля – с другой. Эти исследования во многом определили потенциал дальнейшего развития концепции регулирования биостимуляторов, в частности, для будущих нормативных актов в ЕС. В то же время отмечали, что основной причиной сложной ситуации с регулированием и отсутствием гармонизированного законодательства в ЕС и США является отсутствие официального определения и признания регулируемыми органами концепции регулирования биостимуляторов [1]. При этом отмечали, что т.к. многие биостимуляторы могут улучшать эффективность удобрений, то возможна ситуация, когда биостимуляторы

могли бы быть включены в закон ЕС об удобрениях. Однако du Jardin (2015) рассматривал такой вариант как нереалистичный в связи с трудоемкостью процедуры внесения изменений в соответствующие регламенты. Кроме того, согласно европейскому закону об удобрениях (Регламент ЕС № 2003/2003), определение удобрений является очень ограничительным и не может включать биостимуляторы в связи с тем, что основная функция любого удобрения – обеспечение растений питательными веществами, а биостимуляторы способствуют росту растений за счет других механизмов [1]. Согласно Rademacher (2015), биостимуляторы, имеющие в составе сложные смеси ингредиентов, отличаются и от регуляторов роста растений (*PPP*), хотя такие препараты могут содержать *PPP*-подобные компоненты [58]. По мнению Matyjaszczyk (2015), понятия “регуляторы роста и развития растений” и “биостимуляторы” не являются синонимами; также относимые к биостимуляторам препараты не действуют как удобрения [59]. При обсуждении ситуации с биостимуляторами в контексте Европейского законодательства о биостимуляторах Liegeois (2015) акцентировал внимание на необходимости рассмотрения биостимуляторов в качестве отдельной категории [60]. В то же время Varoccio и соавт. (2015) отмечали, что хотя Европейский Регламент по удобрениям не предусматривает конкретной категории для биостимуляторов, его пересмотр подготавливает включение этого типа препаратов и возможность их свободной реализации во всей Европе [61]. При этом отмечено, что биостимуляторы являются очень неоднородным классом с широким спектром действия, и подчеркивалась важность разработки аналитических методов для подтверждения их подлинности. Основываясь на результатах анализа различных коммерческих препаратов на основе животного и растительного материала при выявлении связи между их аминокислотным составом и исходным сырьем были обнаружены значительные различия в аминокислотном составе образцов, что позволило установить различия в их происхождении. Для определения аминокислот применяется кислотный гидролиз образцов с дальнейшим использованием аминокислотного анализатора и метода внутреннего стандарта. Данный подход позволяет характеризовать биостимуляторы различного происхождения в зависимости от их аминокислотного состава [61]. Согласно Matyjaszczyk (2015), для производителей биостимуляторов недостатки регистрации препарата как средства защиты растений обусловлены длительной процедурой регистрации и высокими затратами на тестирование, в связи с чем практикуется регистрация их как

удобрений для облегчения вывода на рынок [59]. Kamilova и соавт. (2015) концептуализировали необходимость регистрации микробиологических средств защиты растений и биостимуляторов/биоудобрений для размещения на рынке, делая акцент на том, что правильно выполненная регистрация обеспечит правовую основу для препаратов, позволяя включить в существующие или создать новые коммерческие ниши [62]. Chojnacka (2015) отмечала необходимость принимать во внимание специфику биологических препаратов при разработке законодательства для их регистрации, в частности, сложность идентификации действующего вещества [63]. Яхин и соавт. (2015) на основе многолетних экспериментальных и теоретических исследований разработали инновационную научно обоснованную фундаментальную платформу для законодательного регулирования биостимуляторов [15].

Sukalac и Thibierge (2016) обсуждали важность новых подходов для регулирования биостимуляторов, развития сельского хозяйства, интеграции технологий в производственные системы и необходимость изменения существующих парадигм, принимая во внимание широкий спектр этой группы препаратов и многочисленные контекстуальные факторы [64]. Le Mire и соавт. (2016), характеризуя стратегию ЕС по поддержке разработки новых методов “биостимуляции” и биоконтроля в сельском хозяйстве, отмечали, что она осуществляется с помощью различных законодательных процедур [65]. Яхин и соавт. (2016) при рассмотрении перспектив применения биостимуляторов в агротехнологиях предложили категоризировать биостимуляторы в системе нормативно-правового регулирования на основе современных научных представлений и “рассмотреть необходимость введения “новой” категории препаратов – биостимуляторов и придания ей “официального” статуса либо как подгруппы существующих категорий, либо как отдельной самостоятельной категории”, а также выделить регуляторы роста растений из категории пестицидов в отдельную категорию [10].

В работе Яхина и соавт. (2017) получила дальнейшее развитие разработка фундаментальных основ направления исследований биостимуляторов и научных основ их регулирования, что позволило глобально концептуализировать необходимость и перспективы выделения биостимуляторов из существующих категорий и определить положение биостимуляторов в перспективной системе нормативно-правового регулирования [11]. Florián (2017) отмечал, что биостимуляторы широко используются в ЕС на протяжении многих

лет, это специфическая и весьма обширная группа препаратов, но имеющая недостаточное регулирование на уровне ЕС [66]. Согласно Adams и Luzzi (2017), научный прогресс в сфере биостимуляторов позволяет рассматривать их как класс препаратов [67]. Европейским комитетом по стандартизации (European Standardization Committee – CEN) был создан новый Технический комитет (CEN/TC 455) по биостимуляторам [68, 69]. Его сферой деятельности является стандартизация отбора проб, наименований, спецификаций (в том числе требования безопасности), маркировки и методов испытаний для установления требований к биостимуляторам, включая микроорганизмы. При этом исключаются средства защиты растений, удобрения, известковые материалы, улучшители почвы, питательные среды и ингибиторы, которые уже включены в стандартную документацию на европейском уровне [69]. Sukalac и соавт. (2017), рассматривая использование стандартов для биостимуляторов, обсуждали перспективы европейского регламента, планировавшего включить биостимуляторы среди других удобрительных препаратов [68]. Соответствующий законопроект включал требование доказательного подтверждения, что биостимуляторы обеспечивают действие, заявляемое производителем. Стандарт также направлен на усиление требований, предъявляемых к препаратам, разрешенным в соответствии с национальными законами в ЕС [68].

При обсуждении регулирования микробиологических пестицидов и биостимуляторов в ЕС отмечено, что целью пересмотра Регламента об удобрениях (ЕС) № 2003/2003 является включение биостимуляторов в новый регламент, перед этим необходимо пересмотреть правила защиты растений для устранения имеющихся неопределенностей [70]. При этом Brødsgaard (2018) отмечал, что регулирование в отношении конкретных биопрепаратов и, соответственно, необходимые требования к данным для получения разрешения на реализацию часто фактически определяют их производители. По Desfontaines и соавт. (2018), биостимулятор не может соответствовать правилам, применяемым к средствам защиты растений или биоконтроля, на которые распространяется Регламент ЕС № 1107/2009, даже если граница “биостимулятор–биоконтроль” не очень четкая [71]. Dmytryk и Chojnacka (2018), обсуждая применение препаратов на основе водорослей в соответствии с действующим и будущим европейским законодательством, а также новые законодательные инициативы, отметили предложение четкого разграничения действия средств защиты расте-

ний и биостимуляторов и необходимость исключения биостимуляторов из пестицидов при одновременном включении требований к ним в отношении маркировки в соответствии с правилами, касающимися удобрений [72]. Новое регулирование будет способствовать созданию новых производственно-сбытовых цепочек, увеличению разнообразия и доступности биологических препаратов и окажет положительное действие на устойчивость сельского хозяйства [72]. В связи с тем, что микроорганизмы и консорциумы, их биологически активные соединения и многокомпонентные смеси являются компонентами многих перспективных биостимуляторов, Woo и Pere (2018) акцентировали внимание на включении стимулирующих рост растений микроорганизмов (Plant Growth Promoting Microbes – **PGPM**) в систему регистрации и настоятельной необходимости в разработке новых подходов для регистрации микроорганизмов или их консорциумов, обладающих различными полезными функциями (как биостимулятор, биоудобрение, биопестицид) для регулирования многофункциональных препаратов [73]. По мнению Cardinale и соавт. (2018), регистрация биостимуляторов в соответствии с менее строгими правилами, чем при регулировании средств защиты растений, может обеспечить большие перспективы для применения природных препаратов по сравнению с синтетическими [74]. При рассмотрении стратегий интегрированной защиты растений биостимуляторы обсуждались как “непестицидные” препараты [75]. По мнению Huber (2018), интенсивное развитие в сфере биопестицидов и биостимуляторов и высокий спрос на эти препараты обуславливают необходимость разработки специальных научно обоснованных стратегий их регистрации [76]. Согласно Cannings (2018), надлежащая нормативная база откроет доступ к рынку, будет стимулировать инновации, конкуренцию, инвестиции в исследования и разработки, а отрасль биостимуляторов в значительной степени способствовать циркулярной экономике [77]. При этом отмечено, что формирующаяся в Европе нормативно-правовая база способствует развитию производства биостимуляторов [77].

В работе He (2019), посвященной рассмотрению вопросов регулирования биостимуляторов, внимание было акцентировано на необходимости их регистрации для вывода на рынок, а также на том факте, что биостимуляторы не являются ни пестицидами, ни удобрениями, ни регуляторами роста растений; особо следует отметить концептуально важное изменение определения регулятора роста растений как “влияющего на

жизненные процессы растений, такие как их рост, не являясь питательным веществом или биостимулятором” [78]. Согласно проектным документам Агентства по охране окружающей среды США (United States Environmental Protection Agency; EPA) (2019), связанным с регулированием регуляторов роста, включая биостимуляторы, биостимуляторы – это относительно новая, но растущая категория препаратов, содержащих природные вещества и микроорганизмы, которые используют для стимуляции роста растений, повышения устойчивости к вредителям растений и снижения абиотического стресса [79]. Особенно важно отметить концептуальную позицию, согласно которой законодательство для биологических препаратов не должно быть только лишь механистически перенесенным (‘cut and paste’) из существующего законодательства для традиционных средств защиты растений [80].

В 2019 г. Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) был разработан “Международный кодекс поведения в области устойчивого использования удобрений и управления ими” [81]. Согласно Приложению 1, статья 3: индустрии удобрений следует “тщательно разрабатывать и оценивать добавки к удобрениям (например, ингибиторы нитрификации, ингибиторы уреазы, биостимуляторы) и выпускать их на рынок, только если они продемонстрируют свою безопасность для почвенной биоты, окружающей среды, здоровья животных и человека, а также действенность в повышении эффективности применения удобрений и/или снижении побочного воздействия на окружающую среду”. Planques и соавт. (2019), обсуждая роль стандартизации в развитии мирового рынка биостимуляторов, отмечали наряду с началом работы Европейского технического комитета (CEN/TC 455) по биостимуляторам создание Международным техническим комитетом (ISO/TC 134) по удобрениям, кондиционерам почвы и полезным веществам специальной группы для сбора информации и оценки возможности разработки набора стандартов для этой категории препаратов [82]. Разработанный на основе предложений и проекта Европейской комиссии и принятый Европейским парламентом 5 июня 2019 г. Регламент (ЕС) 2019/1009 устанавливает правила размещения на рынке ЕС удобрительных продуктов, поправки к Регламентам (ЕС) № 1069/2009 и (ЕС) № 1107/2009 и отменяет Регламент (ЕС) № 2003/2003 [83–85]. Удобрительные препараты в нем разделены на 7 функциональных категорий: 1) удобрения (fertiliser), 2) материалы для известкования (liming material), 3) улучшители почвы (soil improver), 4) питатель-

Таблица 1. Определения биостимуляторов в национальных законодательствах и в соответствии с руководящими принципами международных объединений

Страны/международные объединения	Определения	Ссылка
ЮАР	“Биоудобрение” (“Bio-fertilizer”), “Биостимулятор для растений” (“Plant Bio-Stimulant”), “Энхансер/Стимулятор роста растений” (“Plant Growth Enhancer”) или “Усилитель для растений” (“Plant Strengthener”) – любое вещество или микроорганизм, или их комбинация, которые применяются на семенах, растениях или корневой среде с целью стимулирования естественных процессов в растениях для улучшения эффективности использования питательных веществ и/или устойчивости к абиотическому стрессу (2016).	[86]
Дания	Биостимуляторы – микроорганизмы или химические вещества, которые не являются пестицидами, со способностью улучшать использование питательных веществ растениями, их устойчивость к абиотическому стрессу или характеристики качества урожая (2017).	[87]
Франция	Природное вещество для использования в качестве биостимулятора представляет собой вещество растительного, животного или минерального происхождения, за исключением микроорганизмов, “не генетически модифицированное”, которое получают с помощью способа (описание соответствующего процесса приводится в отдельном пункте) (2019).	[88]
Евросоюз	Растительный биостимулятор является удобрительным “продуктом” /препаратом/ в ЕС, функция которого состоит в том, чтобы стимулировать процессы питания растений независимо от содержания питательных веществ в “продукте” /препарате/ с единственной целью улучшения одной или нескольких из следующих характеристик растения или ризосферы растения: (а) эффективность использования питательных веществ, (б) устойчивость к абиотическому стрессу, (с) качественные показатели, или (д) доступность “ограниченных” питательных веществ в почве или ризосфере (2019).	[85]
ФАО	Биостимулятор: продукт, который стимулирует процессы роста растений через синтез субстанций, способствующих росту, и/или процессы питания растений независимо от содержания питательных веществ с целью улучшения одного или нескольких факторов: эффективности использования или усвоения питательных веществ растениями; устойчивости растений к абиотическому стрессу; или качественных признаков культур (2019).	[81]

ные среды (growing medium), 5) ингибиторы (inhibitor), 6) биостимуляторы (plant biostimulant), 7) смешанные удобрительные препараты (fertilising product blend) [85]. При этом отмечено, что определенные вещества, смеси и микроорганизмы, относимые к биостимуляторам, не являются источником питательных веществ, но стимулируют процессы питания растений. Таким образом, биостимуляторы на уровне Евросоюза вынесены в отдельную категорию законодательно. Важно отметить, что определения термина “биостимулятор” наряду с Евросоюзом уже приняты в законодательстве ЮАР, Дании, Франции (табл. 1).

ВЫВОДЫ

1. Достижения в области фундаментальных и прикладных исследований обеспечили значительный прогресс в развитии направления исследований биостимуляторов и открыли широкие перспективы их применения в сельском хозяйстве.

2. В результате взаимодействия академического сообщества, экспертов, специалистов в области регулирования средств защиты растений и удобрений в мире сформировалась концепция нормативно-правовой базы для законодательного регулирования биостимуляторов в дополнение к традиционному регулированию средств защиты растений и удобрений/пестицидов и агрохимикатов.

3. Современные представления в сфере нормативно-правового регулирования создают основания для категоризации, включающей удобрения, пестициды, регуляторы роста растений и выделяющей биостимуляторы в самостоятельную категорию/группу.

4. Критерии безопасности и эффективности составляют концепцию базовых регуляторных требований к биостимуляторам.

5. Определения термина “биостимулятор” включены в законодательства ряда стран.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Du Jardin P.* Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation // *Sci. Hortic.* 2015. V. 196. P. 3–14.
2. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А.* Терминология в сфере исследований биостимуляторов // *Агрохимия.* 2018. № 6. С. 3–22.
3. *Saporta R., Bou C., Frías V., Mulet J.M.* A Method for a fast evaluation of the biostimulant potential of different natural extracts for promoting growth or tolerance against abiotic stress // *Agronomy.* 2019. V. 9 (3). P. 143.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9030143>
4. *Herve J.J.* Biostimulants, a new concept for the future; prospects offered by the chemistry of synthesis and biotechnology // *Comptes Rendus de l'Academie d'Agriculture de France.* 1994. V. 80. P. 91–102.
5. *Basak A.* Biostimulators – definitions, classification and legislation // *Biostimulators in modern agriculture. General aspects* / Ed. Gawrońska H. Warsaw, Poland: Wieś Jutra, 2008. P. 7–17.
6. *Du Jardin P.* The Science of plant biostimulants. A bibliographic analysis ordered by the European Commission (Contract 30–CE0455515/00–96, “Ad hoc study on bio–stimulants products”). 2012. 37 p.
7. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А.* Современные представления о биостимуляторах // *Агрохимия.* 2014. № 7. С. 85–90.
8. *Calvo P., Nelson L., Klopper J.W.* Agricultural uses of plant biostimulants // *Plant Soil.* 2014. V. 383. № 1–2. P. 3–41.
9. *Brown P., Saa S.* Biostimulants in agriculture // *Front. Plant Sci.* 2015. V. 6. P. 671.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671>
10. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А.* Биостимуляторы в агротехнологиях: проблемы, решения, перспективы // *Агрохим. вестн.* 2016. № 1. С. 15–21.
11. *Yakhin O.I., Lubyaynov A.A., Yakhin I.A., Brown P.H.* Biostimulants in plant science: a global perspective // *Front. Plant Sci.* 2017. V. 7. P. 2049.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
12. *Du Jardin P., Xu L., Geelen D.* Agricultural functions and action mechanisms of plant biostimulants (PBs): an Introduction // *The Chemical Biology of Plant Biostimulants* / Eds. Geelen D., Xu L. John Wiley & Sons Ltd, 2020. P. 3–30.
13. *Kauffman G.L., Kneivel D.P., Watschke T.L.* Effects of a biostimulant on the heat tolerance associated with photosynthetic capacity, membrane thermostability, and polyphenol production of perennial ryegrass // *Crop Sci.* 2007. V. 47. P. 261–267.
14. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А.* Классификация биостимуляторов // *Агрохимия.* 2018. № 3. С. 90–95.
15. *Yakhin O.I., Lubyaynov A.A., Yakhin I.A.* Theory, concepts and methodology of biostimulants science // *Abstracts Book of the 2nd World Congress on the use of Biostimulants in Agriculture.* Florence, Italy. 2015. P. 83.
16. *Povero G., Mejia J.F., Di Tommaso D., Piaggese A., Warrior P.A.* Systematic approach to discover and characterize natural plant biostimulants // *Front. Plant Sci.* 2016. V. 7. P. 435.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00435>
17. *Povero G.* Exploring natural resources for biostimulants // *The Chemical Biology of Plant Biostimulants* / Eds. Geelen D., Xu L. John Wiley & Sons Ltd, 2020. P. 183–204.
18. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А.* Физиологическая активность биостимуляторов и эффективность их применения // *Агрохимия.* 2016. № 6. С. 72–94.
19. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А., Калимуллина З.Ф., Батраев Р.А., Маркелова Е.М., Нугаматуллина Г.Б., Иштимиров Э.И.* Научные основы создания и применения биостимуляторов // IX Съезд общ-ва физиологов растений России “Физиология растений – основа создания растений будущего”. Казань. 2019. С. 499.
<https://doi.org/10.26907/978–5–00130–204–9–2019–499>
20. *Yakhin I.A., Yakhin O.I.* Physiological activity of ecologically safe plant growth regulator Stifun // *Bulg. J. Plant Physiol. Sp. Iss.* 1998. P. 307.
21. *Meyer F.R., Orioli Jr. V.O., Bernardes J.V.S.* Aplicação foliar de bioestimulante à base de extrato de alga (*Ecklonia maxima*) na cultura da soja // *Anais do V Seminário de Pós-Graduação – V Simpós.* 2018. V. 5. P. 1–5.
22. *Pohl A., Grabowska A., Kalisz A., Sękara A.* Preliminary screening of biostimulative effects of Göemar BM-86 on eggplant cultivars grown under field conditions in Poland // *Acta Agrobot.* 2018. V. 71. № 4. P. 1–10.
23. *Dalal A., Bourstein R., Haish N., Shenhar I., Wallach R., Moshelion M.* Dynamic physiological phenotyping of drought-stressed pepper plants treated with ‘productivity-enhancing’ and ‘survivability-enhancing’ biostimulants // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. P. 905.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00905>
24. *Paradiković N., Teklić T., Zeljković S., Lisjak M., Špoljarević M.* Biostimulants research in some horticultural plant species – A review // *Food Energy Sec.* 2019. V. 8(2). e00162.
<https://doi.org/10.1002/fes3.162>
25. *Wang S., Tian X., Liu Q.* The Effectiveness of foliar applications of zinc and biostimulants to increase zinc concentration and bioavailability of wheat grain // *Agronomy.* 2020. V. 10(2). P. 178.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10020178>
26. *Yakhin I.A., Yakhin O.I., Shakirova F.M.* The influence of stifun on the balance of phytohormones in wheat

- roots // *Plant Physiol. Bioch.* 2000. V. 38. Suppl. P. 255.
27. Яхин О.И., Лубянов А.А., Гареева Г.Б., Батраев Р.А., Маркелова Е.М., Яхин И.А., Калимуллина З.Ф., Яппаров И.Ф. Влияние абиотических стрессовых факторов и регуляторов роста на содержание фенольных соединений у высших растений // Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты: Мат-лы докл. VIII Международ. симп. М., 2012. С. 506–511.
 28. Lorenzo P., Souza-Alonso P., Guisande-Collazo A., Freitas H. Influence of *Acacia dealbata* Link bark extracts on the growth of *Allium cepa* L. plants under high salinity conditions // *J. Sci. Food Agr.* 2019. V. 99(8). P. 4072–4081.
 29. Casadesús A., Polo J., Munné-Bosch S. Hormonal effects of an enzymatically hydrolyzed animal protein-based biostimulant (Pepton) in water-stressed tomato plants // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. P. 758. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00758>
 30. Ngoroyemoto N., Gupta S., Kulkarni M.G., Finnie J.F., Van Staden J. Effect of organic biostimulants on the growth and biochemical composition of *Amaranthus hybridus* L. // *Sci. Afric. J. Bot.* 2019. V. 124. P. 87–93.
 31. Salvi L., Brunetti C., Cataldo E., Nicolai A., Centritto M., Ferrini F., Mattii G.B. Effects of *Ascophyllum nodosum* extract on *Vitis vinifera*: Consequences on plant physiology, grape quality and secondary metabolism // *Plant Physiol. Biochem.* 2019. V. 139. P. 21–32.
 32. Barrajón-Catalán E., Álvarez-Martínez F.J., Borrás F., Pérez D., Herrero N., Ruiz J. J., Micol V. Metabolomic analysis of the effects of a commercial complex biostimulant on pepper crops // *Food Chem.* 2020. V. 310. 125818. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125818>
 33. Deng Q., Xia H., Lin L., Wang J., Yuan L., Li K., Zhang J., Lv X., Liang D. Sunred, a natural extract-based biostimulant, application stimulates anthocyanin production in the skins of grapes // *Sci. Rep.* 2019. V. 9 (1). P. 2590. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39455-0>
 34. Fleming T.R., Fleming C.C., Levy C.C., Repiso C., Hennequart F., Nolasco J.B., Liu F. Biostimulants enhance growth and drought tolerance in *Arabidopsis thaliana* and exhibit chemical priming action // *Ann. Appl. Biol.* 2019. V. 174 (2). P. 153–165.
 35. Omidbakhshfard M.A., Sujeeth N., Gupta S., Omranian N., Guinan K.J., Brotman Y., Nikoloski Z., Fernie A.R., Mueller-Roeber B., Gechev T.S. A Biostimulant obtained from the seaweed *Ascophyllum nodosum* protects *Arabidopsis thaliana* from severe oxidative stress // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21 (2). P. 474. <https://doi.org/10.3390/ijms21020474>
 36. Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А., Вахитов В.А. Протекторная роль биорегулятора стифуна при негативном действии кадмия // Докл. РАСХН. 2007. № 4. С. 19–21.
 37. Онацкий Н.М., Яхин И.А., Рыбалкин С.П., Михина Л.В., Яхин О.И., Ибатуллина Р.Б. Токсикологическая оценка препарата стифун и обоснование ПДК в воздухе рабочей зоны // Токсикол. вестн. 2001. № 5. С. 20–24.
 38. Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А., Гареева Г.Б., Маркелова Е.М., Кабиров Р.Р., Ханисламова Г.М., Фазлутдинова А.И. Использование многокомпонентной тест-системы для экологической оценки регулятора роста растений стифуна // *Агрехимия.* 2013. № 3. С. 65–71.
 39. Pukalchik M., Kydraliev K., Yakimenko O., Fedoseeva E., Terekhova V. Outlining the potential role of humic products in modifying biological properties of the soil – a review // *Front. Environ. Sci.* 2019. V. 7. P. 80. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00080>
 40. Szczałba M., Kopta T., Gąstoł M., Sękara A. Comprehensive insight into arbuscular mycorrhizal fungi, *Trichoderma* spp. and plant multilevel interactions with emphasis on biostimulation of horticultural crops // *J. Appl. Microbiol.* 2019. V. 127. P. 630–647.
 41. Mattarozzi M., Di Zinno J., Montanini B., Manfredi M., Marengo E., Fornasier F., Ferrarini A., Careri M., Visioli G. Biostimulants applied to maize seeds modulate the enzymatic activity and metaproteome of the rhizosphere // *Appl. Soil Ecol.* 2020. V. 148. 103480. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103480>
 42. Yakhin I.A., Yakhin O.I., Vakhitov V.A. Stifun as an element of ecologically safe technology of crop production // In proceedings of the International conference: Problems of ecological security in agriculture. Sergiev Posad. 1999. V. 4. P. 56–61.
 43. Лубянов А.А., Яхин О.И., Калимуллина З.Ф., Батраев Р.А., Яппаров И.Ф., Гайнетдинова Е.М. Ответные реакции культурных растений при применении регулятора роста стифуна в условиях абиотических стрессовых факторов // Изв. ОренбургГАУ. 2011. № 4 (32). С. 44–46.
 44. Bulgari R., Cocetta G., Trivellini A., Vernieri P., Ferrante A. Biostimulants and crop responses: a review // *Biol. Agric. Hortic.* 2015. V. 31. № 1. P. 1–17.
 45. Bulgari R., Franzoni G., Ferrante A. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions // *Agronomy.* 2019. V. 9 (6). P. 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
 46. Colla G., Nardi S., Cardarelli M., Ertani A., Lucini L., Canaguier R., Rouphael Y. Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture // *Sci. Hortic. Amsterdam.* 2015. V. 196. P. 28–38.
 47. Halpern M., Bar-Tal A., Ofek M., Minz D., Muller T., Yermiyahu U. Chapter two – the use of biostimulants for enhancing nutrient uptake // *Adv. Agron.* 2015. V. 130. P. 141–174.
 48. Rouphael Y., Giordano M., Cardarelli M., Cozzolino E., Mori M., Kyriacou M.C., Bonini P., Colla G. Plant- and seaweed-based extracts increase yield but differentially modulate nutritional quality of greenhouse spinach through biostimulant action // *Agronomy.* 2018. V. 8 (7). P. 126. <https://doi.org/10.3390/agronomy8070126>
 49. Ronga D., Biazzi E., Parati K., Carminati D., Carminati E., Tava A. Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions // *Agronomy.* 2019. V. 9(4). P. 192. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040192>

50. Mukherjee A., Patel J.S. Seaweed extract: biostimulator of plant defense and plant productivity // *Inter. J. Environ. Sci. Technol.* 2020. V. 17. P. 553–558.
51. Blanke M. Biostimulantien – von Algenextrakten bis Shrimpschalen – eine Branche (er-) findet sich // *Erwerbs-Obstbau.* 2016. V. 58. № 2. P. 81–87.
52. Ciavatta C., Cavani L. Problematiche per l’inserimento dei biostimolanti nella legislazione dei fertilizzanti // *Fertilitas Agrorum.* 2006. V. 1. P. 11–15.
53. European Biostimulants Industry Council (EBIC). The unique properties of biostimulants require an appropriate regulatory framework so the biostimulants sector can to make its full contribution to smart, sustainable and inclusive growth in Europe. http://www.biostimulants.eu/wp-content/uploads/2011/12/EBIC_Position_7Options_29Nov2011.pdf (29.11.2011).
54. Du Jardin P., Liégeois E. Science and regulation of Biostimulants: outcomes of a scientific review at the request of the European Commission // *Abstracts Book of the 1st World Congress on the use of Biostimulants in Agriculture.* Strasbourg, France. 2012. P. 116.
55. Summerer S., Petrozza A., Cellini F. High throughput plant phenotyping: a new and objective method to detect and analyse the biostimulant properties of different products // *In I World Congress on the Use of Biostimulants in Agriculture.* 2013. 1009. P. 143–148.
56. Chojnacka K., Michalak I., Dmytryk A., Wilk R., Górecki H. Innovative natural plant growth biostimulants // *Advances in Fertilizer Technology / Eds. Shishir S., Pant K.K.* 2014. P. 452–489.
57. Traon D., Amat L., Zotz F., du Jardin P. A Legal framework for plant biostimulants and agronomic fertiliser additives in the EU. Report to the European Commission, DG Enterprise & Industry // *Arcadia International.* 2014. 115 p.
58. Rademacher W. Plant growth regulators: backgrounds and uses in plant production // *J. Plant Growth Regul.* 2015. V. 34 (4). P. 845–872.
59. Matyjaszczyk E. Wprowadzenie biostymulatorów do obrotu handlowego w Polsce. Sytuacja bieżąca i uwarunkowania prawne // *Przemysł Chemiczny.* 2015. V. 94/10. P. 1841–1844.
60. Liegeois E. The European legislation on biostimulants, where do we stand? // *Abstracts Book of the 2nd World Congress on the use of Biostimulants in Agriculture.* Florence, Italy. 2015. P. 42.
61. Baroccio F., Barilaro N., Riva M., Poccia A., Marianella R.M. Characterization of biostimulants of different origin according to their aminoacidic composition // *Там же.* P. 224.
62. Kamilova F., Okon Y., de Weert S., Hora K. Commercialization of microbes: manufacturing, inoculation, best practice for objective field testing, and registration // *In Principles of plant-microbe interactions.* Springer, Cham., 2015. P. 319–327.
63. Chojnacka K. Innovative bio-products for agriculture // *Open Chem.* 2015. <https://doi.org/10.1515/chem-2015-0111>
64. Sukalac K., Thibierge J. Making sense of biostimulants: a multistakeholder approach to developing a user’s manual // *Acta Hort.* 2016. P. 127–134.
65. Le Mire G., Nguyen M.L., Fassotte B., Delaplace P., du Jardin P., Verheggen F., Jijakli M.H. Review: implementing plant biostimulants and biocontrol strategies in the agroecological management of cultivated ecosystems // *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2016. 20. P. 299–313.
66. Florián M., Vaculík P. Finding a space for biostimulants – view of a national competent authority // *Abstracts Book of the 2nd World Congress on the use of Biostimulants in Agriculture.* Florence, Italy. 2015. P. 222.
67. Adams S.R., Luzzi B.M. Building the credibility of biostimulants; an industry perspective // *The 3rd World Congress on the use of Biostimulants in Agriculture.* Miami, Florida (USA). 2017. P. 51.
68. Sukalac K., Planques B., Tiprez S., Tilbury L. Using standards to promote best agricultural practices and credibility of biostimulant claims // *The 3rd World Congress on the use of Biostimulants in Agriculture.* Miami, Florida (USA). 2017. P. 52–53.
69. CEN/TC 455 – Plant Biostimulants https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0:::FSP_ORG_ID:2279055&cs=1F04757AD7A7D81CCF8FDCB-FEF1883680 (10.02.2020).
70. Brodsgaard H.F. The EU regulation of microbial pesticides and biostimulants // *Abstract Book for the Plant Biologicals Network annual symposium.* 2018. P. 21.
71. Desfontaines L., Rotin P., Ozier-Lafontaine H. Les Biostimulants: Qu’en savons-nous? Quelles alternatives pour l’agriculture Guyanaise? // *Innovations Agronomiques.* 2018. V. 64. P. 31–46.
72. Dmytryk A., Chojnacka K. Algae as fertilizers, biostimulants, and regulators of plant growth // *Algae Biomass: Characteristics and Applications.* Springer, Cham., 2018. P. 115–122.
73. Woo S.L., Pepe O. *Microbial consortia*: promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture // *Front. Plant Sci.* 2018. V. 9. P. 1801. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01801>
74. Cardinale F., Korwin Krukowski P., Schubert A., Visentin I. Strigolactones: mediators of osmotic stress responses with a potential for agrochemical manipulation of crop resilience // *J. Exp. Bot.* 2018. V. 69(9). P. 2291–2303.
75. Matyjaszczyk E. “Biorationals” in integrated pest management strategies // *J. Plant Dis. Protec.* 2018. V. 125(6). P. 523–527.
76. Huber L. Biopesticide and biostimulant growth prompts need for registration // *Agropages. Biol. Special.* 2018. P. 32–35.
77. Cannings R. EU Fertilizing product regulation for biostimulants – current state of play & next steps // *Agropages. Biol. Special.* 2018. P. 56–59.
78. He X. Biostimulant regulations in Europe and the US // *Agropages.* 2019. Market Insight. 2019. P. 42–43.
79. Environmental Protection Agency (EPA). Pesticides; draft guidance for pesticide registrants on plant regulator label claims, including plant biostimulants; notice of availability agency: Environmental Protection Agency (EPA). ACTION: Notice // *Federal Register.* 2019. V. 84. № 59. P. 11538–11540.
80. Biologicals 2019. An analysis of corporate, product and regulatory developments in 2018/2019. Agrow biologi-

- cals review 2019 // Agrow Agribusiness Intelligence. P. 2–8.
81. ФАО. Международный кодекс поведения в области устойчивого использования удобрений и управления ими. Рим, 2019. 56 с. <http://www.fao.org/publications/card/en/c/CA5253RU/>
 82. Planques B., Tiprez S., Dalier C., Hall W., Rodrigues H., Liu G., Xu K. How the standardization can support the global market of biostimulants? // IV World congress on the use of biostimulants in agriculture. Barcelona, Spain. 2019. P. 26.
 83. Circular economy package. Annexes to the 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. Brussel, 74 p. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europa/com/2016/0157/COM_COM\(2016\)0157_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europa/com/2016/0157/COM_COM(2016)0157_EN.pdf) (17.3.2016).
 84. European Parliament legislative resolution of 27 March 2019 on the 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 (COM(2016)0157 – C8–0123/2016 – 2016/0084(COD)). https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0306_EN.html
 85. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 // Official Journal of the European Union. L 170/1. 2019. 114 p. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj>
 86. Guidelines for registration of group 3 fertilizers. Issued by the Registrar: ACT 36 OF 1947, Private Bag X 343, Pretoria 0001 Republic of South Africa. 2016. 8 p. [https://www.nda.agric.za/doiDev/sideMenu/Act-No36_1947/AIC/DAFF%20GROUP%203%20FERTILISER%20GUIDELINE%20Final%2011%20february%202016%20\(2\).pdf](https://www.nda.agric.za/doiDev/sideMenu/Act-No36_1947/AIC/DAFF%20GROUP%203%20FERTILISER%20GUIDELINE%20Final%2011%20february%202016%20(2).pdf)
 87. Danish National Actionplan on Pesticides 2017 – 2021. Facts, caution and consideration. Copenhagen, 2017. 39 p. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/den191480.pdf>
 88. Décret no 2019–329 du 16 avril 2019 relatif aux substances naturelles à usage biostimulant et aux préparations naturelles peu préoccupantes en contenant // Journal Officiel De La République Française, 2019. 2 p. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/Fra185752.pdf>

Regarding the Challenge of Biostimulants Legal and Regulatory Framework

O. I. Yakhin^{a,#}, A. A. Lubyantsev^b, and I. A. Yakhin^b

^a Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the RAS
prosp. Oktyabrya 71, Ufa, 450054, Russia

^b R&D Company “Eco Priroda”
ul. Valieva 33, Ulkundy, Duvan district, Republic Bashkortostan 452533, Russia

[#] E-mail: yakhin@anrb.ru

The intensive development of the line of biostimulant research has led to the formation of scientifically based approaches to the elaboration of definition and classification, the reveal of new information about physiological activity and mechanisms of action, as well as opened up broad prospects for manufacture and practical use in agriculture. The production and application of agrochemicals and pesticides are regulated by legislation, while according to world literature the challenge of the biostimulant legal and regulatory framework is a topical subject of discussion for regulatory authorities, scientists, and manufacturers of these products. The review provides a conceptual analysis of the formation of biostimulant legislation. Based on modern concepts biostimulants are considered as a promising category/group in the system of state regulation.

Key words: legal and regulatory framework, biostimulants.