

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Оценка окультуренности почв по комплексу агрохимических показателей

С. А. Шафран

3

Удобрения

Влияние минеральных удобрений и агротехнических приемов на урожайность и качество зерна яровой пшеницы в разных метеоусловиях центральной лесостепной зоны Зауралья

Ю. В. Суркова, И. Н. Цымбаленко, С. Д. Гилев

11

Элементный состав вытяжки из костры конопли для оценки использования в качестве экологически безопасного биоудобрения

И. Г. Макарская, С. Э. Старых, И. И. Серегина, С. Л. Белопухов, И. И. Дмитриевская

18

Регуляторы роста растений

Влияние дифенилмочевины на энергозапасующие реакции фотосинтеза в онтогенезе растений рапса

Н. П. Татаринцев, Н. С. Захарченко, А. Н. Шмарев, В. Д. Креславский, Д. В. Демин, Г. А. Семенова, А. П. Глинушкин

24

Пестициды

Защита ярового рапса от фитотоксического действия остатков метсульфурон-метила с помощью цеолитов

Ю. Я. Спиридонов, Н. Д. Чкаников, А. В. Пастухов, В. А. Абубикеров, М. М. Ильин, И. Ю. Спиридонова

30

Антидоты гербицидов на основе сиднонимина

И. А. Черепанов, Ю. Я. Спиридонов, В. А. Абубикеров, И. Ю. Спиридонова, Н. В. Калганова, Д. А. Лапшин, С. К. Моисеев

36

Способ снижения летучести метил никотиноата с диспенсеров путем его перевода в солевые формы для отлова трипсов

А. Ю. Лобур, Н. Г. Тодоров, К. А. Кузнецов

46

Агроэкология

Влияние известкования дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой на урожайность сельскохозяйственных культур (результаты многолетнего микрополевого эксперимента)

С. Е. Витковская, К. Ф. Шаврина

52

Развитие микроорганизмов, связанных с циклом азота, при минимизации обработки почвы и прямом посеве в почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР

В. М. Гармашов, Л. В. Гармашова

60

Экотоксикология

Миграция ^{90}Sr в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС)

В. Г. Граковский, А. С. Фрид

65

ДИСКУССИЯ

Стратегический уровень управления состоянием агроценозов

И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин

80

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод совместного определения остаточных количеств абамектина и индоксакарба в сельскохозяйственных культурах

Е. Ю. Алексеев, В. И. Долженко

88

Правила для авторов

94

Contents

No. 4, 2022

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Assessment of Soil Fertility by the Complex of Agrochemical Indicators
S. A. Shafran 3

Fertilizers

- Influence of Mineral Fertilizers and Agrotechnical Techniques on the Yield and Quality of Spring Wheat Grain in Different Weather Conditions of the Central Forest-Steppe Zone of the Trans-Ural
Yu. V. Surkova, I. N. Tymbalenko, S. D. Gilev 11
- Elemental Composition of Extract from Hemp Bark for Evaluation of Use as an Environmentally Safe Biological Fertilizer
I. G. Makarskaya, S. E. Starykh, I. I. Seregina, S. L. Belopukhov, I. I. Dmitrevskaya 18

Plant Growth Regulators

- Effect of Diphenylurea on Energy-Storing Reactions of Photosynthesis in Ontogenesis of Rape Plants
N. P. Tatarintsev, N. S. Zakharchenko, A. N. Shmarev, V. D. Kreslavsky, D. V. Demin, G. A. Semenova, A. P. Glinushkin 24

Pesticides

- Protection of Spring Rapeseed from the Phytotoxic Effect of Metsulfuron-Methyl Residues Using Zeolites
Yu. Ya. Spiridonov, N. D. Chkanikov, A. V. Pastukhov, V. A. Abubikerov, M. M. Ilyin (jr.), I. Yu. Spiridonova 30
- Sydnone Imine Based Herbicide Antidotes
I. A. Cherepanova, Yu. Ya. Spiridonov, V. A. Abubikerov, I. Yu. Spiridonov, N. V. Kalganova, D. A. Lapshinc, S. K. Moiseev 36
- Method of Reducing the Volatility of Methyl Nicotinoate from Dispensers by Converting It into Salt Forms for Catching Thrips
À. Y. Lobur, N. G. Todorov, K. A. Kuznetsov 46

Agroecology

- Liming Impacts of Light Loamy Sod-Podzolic Soil by Ddolomite on Yield of Agricultural Crops (Results of Long-Term Microfield Experiment)
S. E. Vitkovskaya, K. F. Shavrina 52
- Development of Microorganisms Associated with the Nitrogen Cycle, while Minimizing Tillage and Direct Sowing in the Soil and Climatic Conditions of the South-East of the Central Chernozem Region
V. M. Garmashov, L. V. Garmashova 60

Ecotoxicology

- Migration of ⁹⁰Sr in the Soils of the East Ural rRadioactive Trace (VURS)
V. G. Grakovskiy, A. S. Frid 65

DISCUSSION

- Strategic Level of Agrocenosis State Management
I. M. Mikhailenko, V. N. Timoshin 80

RESEARCH METHODS

- Method for Joint Determination of Residual Amounts of Abamectin and Indoxacarb in Agricultural Crops
E. Yu. Alekseev, V. I. Dolzhenko 88

- Rules for Authors 94

ОЦЕНКА ОКУЛЬТУРЕННОСТИ ПОЧВ ПО КОМПЛЕКСУ АГРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

© 2022 г. С. А. Шафран

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

E-mail: shafran38@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2021 г.

После доработки 12.12.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

Рассмотрены вопросы оценки степени окультуренности различных почв по комплексу агрохимических показателей, оказывающих влияние на урожайность зерновых культур. Научной основой для разработки индексов окультуренности почв послужили разработанные ВНИИА “Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур”, в которых были представлены данные о влиянии комплекса агрохимических свойств почв на урожайность зерновых культур, возделываемых в основных природно-климатических зонах страны. Результаты исследования показали, что индексы агрохимической окультуренности зерновых культур варьируют в широких пределах в зависимости от степени обеспеченности различных почв подвижными формами фосфора, калия, а также минеральным азотом для озимых зерновых культур. На почвах Нечерноземной зоны на величину индекса агрохимической окультуренности немалое влияние оказывала реакция почвенной среды. Размах изменений индексов агрохимической окультуренности почв составлял трех–пятикратные величины.

Ключевые слова: индекс окультуренности, агрохимические свойства, зерновые культуры, урожайность, минеральный азот, подвижные формы фосфора, калия, реакция почвенной среды.

DOI: 10.31857/S0002188122040111

ВВЕДЕНИЕ

Понятия окультуривание и окультуренность почв впервые были высказаны в начале XX века в работах М.А. Егорова, Н.П. Карпинского, В.А. Францессона и других ученых. Под термином окультуренность почв понимались совокупность изменения их свойств под воздействием протекающих в ней процессов в результате вовлечения ее в сельскохозяйственное производство. Уровнем плодородия почв, по общепринятому в литературе мнению, является количественная характеристика продуктивности почв, выраженная в урожае тех или иных сельскохозяйственных культур и отражающая степень окультуренности почвы в конкретных условиях [1].

Известно, что на урожайность сельскохозяйственных культур оказывает влияние множество факторов, среди которых особое место занимают удобрения. По данным ФАО, в мировом производстве сельскохозяйственной продукции 40% приходится на удобрения [2]. В связи с этим весьма актуальной является изучение эффективного их применения в зависимости от физико-химиче-

ских и других свойств почв. Для того, чтобы минеральные удобрения могли более рационально использоваться, в 1964 г. в нашей стране была создана Государственная агрохимическая служба, основной задачей которой являлось проведение работ по массовому агрохимическому обследованию сельскохозяйственных угодий и обеспечение всех сельскохозяйственных предприятий результатами в виде картограмм или паспортов полей. К 1971 г. закончился первый цикл обследования почв Нечерноземной зоны, а к 1976 г. — во всей стране, что позволило решить ряд первоочередных задач по снижению кислотности почв и повышению их фосфатного уровня. К концу 70-х гг. прошлого столетия в России стали разворачиваться работы по комплексному агрохимическому окультуриванию полей, цель которых заключалась в переводе малоплодородных почв в более высокую категорию. Для организации этой работы на научной основе были разработаны “Временные нормативы затрат удобрений на комплексное агрохимическое окультуривание полей” [3], в которых были приведены не только

затраты фосфорных и калийных удобрений на формирование оптимального содержания подвижных форм фосфора и калия в основных типах почв, но и урожайность зерновых культур, которую можно получить при достижении этих показателей. Научной основой для разработки данного документа послужили результаты полевых опытов с искусственно созданными фосфатными фонами, проведенными учреждениями Геосети ВИУА и агрохимической службы, что стало одной из первых попыток установления зависимости между агрохимическими свойствами почв и продуктивностью сельскохозяйственных культур.

Создание в стране агрохимической службы позволило систематически контролировать динамику плодородия почв по определенным показателям. В начале это были степень кислотности, содержание подвижных форм фосфора и калия на всех уровнях управления производством: сельскохозяйственное предприятие, административный район, область (край, республика) и страна в целом. Эти показатели давали основание для проведения целенаправленной работы по известкованию и фосфоритованию почв, по снабжению субъектов страны минеральными удобрениями. Вместе с тем эти сведения не позволяли оценить уровень плодородия, поскольку перечисленные показатели каждый в отдельности могли находиться на различных уровнях по отношению к влиянию на величину урожайности. Например, содержание подвижного фосфора относится к высокой группе обеспеченности, а калия – к низкой и т.п. Это дало основание для разработки комплексного (интегрального) показателя, характеризующую степень плодородия почв и уровень их окультуренности. Определение коэффициента окультуренности основано на установлении зависимости варьирования урожая от агрохимических свойств почв, а также на их комплексном действии на продуктивность растений [1].

Авторами было предложено определять индекс окультуренности по каждому агрохимическому показателю по формуле:

$$\text{Иотн} = \frac{X_{\text{факт}} - X_{\text{мин}}}{X_{\text{опт}} - X_{\text{мин}}},$$

где $X_{\text{факт}}$ – фактическая величина агрохимического показателя, $X_{\text{опт}}$ и $X_{\text{мин}}$ – оптимальная и минимальная величины для данной почвы.

В то же время авторами не были обоснованы минимальная и оптимальная величины параметров, что вызывало определенные сомнения в использовании их при расчетах.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал, отражающий влияние комплекса агрохимических свойств различных почв на урожайность основных сельскохозяйственных культур, возделываемых в нашей стране. Обобщение результатов этих опытов и их статистическая обработка позволили разработать нормативы эффективности минеральных удобрений, внесенных под ведущие культуры. В этих нормативах отражены данные, характеризующие вклад агрохимических свойств почв в формирование урожайности. Одной из таких разработок явились региональные “Нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур” [4], для этого было использовано 3488 наблюдений, охватывающих основные почвенные разновидности.

В нашем исследовании была поставлена цель – разработать индексы агрохимической окультуренности различных почв для зерновых культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Научной основой для разработки индексов агрохимической окультуренности почв послужили упомянутые нормативы, в которых представлены данные, отражающие влияние содержания подвижных форм фосфора и калия в различных сочетаниях по группам обеспеченности. Низкому содержанию подвижного фосфора соответствовало 3 группы содержания калия – низкое, среднее и повышенное, средней степени обеспеченности фосфором соответствовали также 3 группы содержания калия, повышенному содержанию фосфора также соответствовали эти 3 группы по степени обеспеченности K_2O . В этих случаях схема состояла из 9 вариантов; если на величину урожая ряда культур (например, озимая пшеница) заметное влияние оказывала реакция почвенной среды (дерново-подзолистые и серые лесные почвы), учитывали также величину рН.

В опытах с озимой пшеницей и озимой рожью представилась возможность учесть в расчетах содержание в почвах минерального азота, определенного перед внесением азотных удобрений. В такой ситуации число вариантов достигало 27-ми и даже 54-х.

Выборки при разработке нормативов формировались по типам и подтипам почв в пределах федеральных округов. В тех случаях, когда выборки по какому-либо объекту не были достаточно представительными, их объединяли с таким же типом или подтипом почв соседнего округа.

Принцип расчета индексов окультуренности заключался в сопоставлении максимальной уро-

Таблица 1. Индексы агрохимической окультуренности почв для яровой пшеницы, баллы

Содержание в почве, мг/кг		Дерново-подзолистые	Серые лесные	Черноземы выщелоченные	Черноземы обыкновенные и южные	Лугово-черноземные и черноземовидные
P ₂ O ₅	K ₂ O					
>100	>120	100	100	100	100	100
	81–120	90	95	95	92	93
	≤80	82	90	90	85	88
51–100	>120	96	94	93	89	91
	81–120	87	88	88	82	85
	≤80	78	83	82	75	79
≤50	>120	63	88	88	82	85
	81–120	57	84	82	78	79
	≤80	54	79	77	56	73

Таблица 2. Индексы агрохимической окультуренности почв для ячменя ярового и овса, баллы

Содержание в почве, мг/кг		Ячмень яровой		Овес
P ₂ O ₅	K ₂ O	Дерново-подзолистые	Серые лесные	Дерново-подзолистые
>100	>120	100	100	100
	81–120	91	94	91
	≤80	82	88	83
51–100	>120	59	91	96
	81–120	53	85	87
	≤80	48	79	79
≤50	>120	56	85	91
	81–120	51	79	83
	≤80	46	72	75

жайности, полученной в вариантах с наиболее высоким содержанием элементов питания и благоприятной реакцией почвенной среды. Максимальная урожайность оценивалась в 100 баллов. Расчет проводили по формуле:

$$\text{Инд} = \frac{Ув \times 100}{У_{\text{макс}}},$$

где Инд – индекс агрохимической окультуренности, баллы; Ув – урожайность варианта, ц/га; У_{макс} – максимальная урожайность, ц/га; 100 – коэффициент пересчета в баллы.

Подобные расчеты проводили в тех случаях, когда коэффициенты агрохимической окультуренности определяли по содержанию подвижных форм фосфора и калия, а также степени кислотности.

При установлении индексов агрохимической окультуренности почв с учетом содержания минерального азота в почвах сначала расчеты вы-

полняли по вышеописанной формуле для данных со средней степенью обеспеченности N_{мин}. Затем с помощью разработанных коэффициентов определяли индексы для групп почв с низкой и повышенной степенью обеспеченности минеральным азотом. Эти коэффициенты варьировали в зависимости от типа почв от 0.49 до 0.78 при попадании индекса агрохимической окультуренности в низкую группу обеспеченности и от 1.23 до 1.43 – в повышенную.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали, что индексы агрохимической окультуренности варьируют в широких пределах в зависимости от степени обеспеченности подвижными формами фосфора и калия. Подобную закономерность наблюдали для всех без исключения типов почв, на которых проводили исследования. Вместе с тем отмечено,

что размах изменений между изученными объектами в отдельных случаях несколько различался. Например, для дерново-подзолистых почв, черноземов обыкновенных и южных разница в величине индекса агрохимической окультуренности для яровой пшеницы в варианте с низким содержанием P_2O_5 и K_2O почти в 2 раза оказалось выше по сравнению с вариантом, характеризовавшимся повышенной степенью обеспеченности почв этими питательными веществами (табл. 1). В то же время для других типов почв, несмотря на достаточно заметное уменьшение индекса окультуренности при снижении содержания P_2O_5 и K_2O , разница между вариантами не превышала 30%.

Аналогичную ситуацию отмечали также для ячменя ярового и овса. Отличие состояло только в том, что исследование с этими культурами были проведены только на дерново-подзолистых и серых почвах. Тем не менее полученные результаты подчинялись той же закономерности, а именно, с повышением степени обеспеченности почв подвижными формами фосфора и калия возрастал индекс агрохимической окультуренности почв. При этом отмечали, что ячмень яровой лучше отзывался на повышение содержания P_2O_5 и K_2O по сравнению с овсом на дерново-подзолистых почвах, что можно объяснить различными биологическими особенностями этих культур (табл. 2). На серых лесных почвах индексы окультуренности для ячменя ярового мало отличались от аналогичных показателей для яровой пшеницы.

Известно, что на урожайность сельскохозяйственных культур кроме фосфорных и калийных оказывают большое влияние азотные удобрения. Однако в силу высокой подвижности оценить степень обеспеченности почвы азотом, как это делается в отношении фосфора и калия с периодичностью в 5–10 лет, не представляется возможным. Для диагностики азотного питания растений необходимо ежегодное обследование, максимально приближенное ко времени внесения азота в почву. Для условий России наиболее приемлемым стало определение содержания минерального азота по содержанию нитратного азота в почве для установления нуждаемости в весенней подкормке озимых зерновых культур и во внесении азота под яровую пшеницу в условиях континентального климата (среднее Поволжье и Сибирь).

В период интенсивного применения минеральных удобрений и внедрения интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур в нашей стране было проведено большое количество полевых опытов, обобщение которых позволило установить зависимость между содер-

Таблица 3. Индексы агрохимической окультуренности дерново-подзолистых почв для озимой ржи, баллы

Содержание в почве, мг/кг		Содержание $N_{\text{мин}}$, мг/кг		
P_2O_5	K_2O	≤ 5.0	5.1–10.0	> 10.0
Центральный федеральный округ				
≤ 50	≤ 80	29	44	59
	81–120	36	53	70
	> 120	45	67	89
51–100	≤ 80	40	59	78
	81–120	46	68	90
	> 120	55	82	109
> 100	≤ 80	52	77	102
	81–120	58	86	114
	> 120	67	100	133
Северо-Западный федеральный округ				
≤ 50	≤ 80	26	39	52
	81–120	33	50	67
	> 120	42	64	85
51–100	≤ 80	31	47	63
	81–120	39	59	78
	> 120	48	73	97
> 100	≤ 80	42	64	85
	81–120	50	76	101
	> 120	66	100	133
Приволжский федеральный округ				
≤ 50	≤ 80	28	42	56
	81–120	36	54	72
	> 120	45	67	90
51–100	≤ 80	36	54	72
	81–120	44	65	87
	> 120	53	79	106
> 100	≤ 80	50	74	99
	81–120	58	86	115
	> 120	67	100	134

жением минерального азота в почве, урожайностью озимых зерновых культур и эффективностью азотных удобрений. Эти данные были использованы при разработке индексов агрохимической окультуренности почв озимых зерновых культур. Порядок расчетов в данном случае несколько отличался от определения индексов агрохимической окультуренности для яровых культур. Сначала устанавливали искомые показатели для почв, которые характеризовались средним содер-

Таблица 4. Индексы агрохимической окультуренности черноземов выщелоченных для озимой пшеницы, баллы

Содержание в почве, мг/кг		Содержание N _{мин} , мг/кг		
P ₂ O ₅	K ₂ O	≤5.0	5.1–10.0	>10.0
Центральный федеральный округ				
≤50	≤80	37	52	74
	81–120	46	65	93
	>120	49	69	99
51–100	≤80	48	68	99
	81–120	58	81	116
	>120	60	85	122
>100	≤80	59	83	119
	81–120	67	95	136
	>120	71	100	143
Южный и Северо-Кавказский федеральный округ				
≤50	≤80	31	46	59
	81–120	36	53	68
	>120	41	61	79
51–100	≤80	41	61	79
	81–120	46	68	87
	>120	51	76	97
>100	≤80	57	85	109
	81–120	62	92	118
	>120	67	100	128
Приволжский федеральный округ				
≤50	≤80	28	43	56
	81–120	33	50	65
	>120	37	57	74
51–100	≤80	40	61	79
	81–120	44	68	88
	>120	49	75	98
>100	≤80	56	86	112
	81–120	60	93	121
	>120	65	100	130

жанием минерального азота (5.1–10.0 мг/кг). При этом за 100 баллов принимали вариант с повышенной и высокой степенью обеспеченности P₂O₅ и K₂O. Полученные данные с помощью специальных коэффициентов пересчитывали на низкую (≤5.0 мг/кг) и повышенную (>10.0 мг/кг) группу минерального азота. Наличие в нормативах исходной информации в разрезе федеральных округов позволило выявить влияние не только

содержания питательных веществ на индекс окультуренности, но в определенной мере сопоставить результаты, полученные в различных природно-климатических зонах.

Согласно данным (табл. 3), видно, что увеличение содержания в почвах подвижных форм фосфора и калия более чем в 2 раза, способствовало приросту индекса окультуренности дерново-подзолистых почв независимо от их географического расположения. Наряду с этим степень обеспеченности почв минеральным азотом также положительно воздействовала на их окультуривание. Таким образом, комплексное влияние содержания доступных форм азота, фосфора и калия дает возможность в несколько раз увеличить индекс агрохимической окультуренности дерново-подзолистых почв и создать условия для получения урожаев озимой ржи в 4.5–5.0 раза превышающих аналогичные показатели низко окультуренных почв.

Аналогичные исследования были проведены и с озимой пшеницей на наиболее распространенных почвенных разновидностях. Ареал ее возделывания достаточно широк и охватывает 4 федеральных округа, среди которых имеются различные по генезису почвы. Наиболее представительными в общей выборке оказались данные для выщелоченных черноземов. Исследования, выполненные для данной почвенной разновидности, показали, что озимая пшеница несколько лучше реагировала на изменение содержания питательных веществ в почве по сравнению с озимой рожью. Однако индексы агрохимической окультуренности, как величина относительная, мало различались между этими культурами. В целом более высокие показатели индексов окультуренности отмечены для черноземов выщелоченных Центрального федерального округа (табл. 4).

Одновременное увеличение содержания минерального азота, подвижных форм фосфора и калия способствовало повышению индексов окультуренности черноземов выщелоченных Центрального округа в 3.9 раза, Южного и Северо-Кавказского – в 4.1, Приволжского – в 4.6 раза.

Для черноземов типичных и обыкновенных Центрального федерального округа прослежена аналогичная закономерность, т.е. с улучшением агрохимических свойств почв возрастала величина индексов их окультуренности (табл. 5). Разница в урожайности между этими подтипами почв оказалась незначительной. Однако в вариантах с низкой степенью обеспеченности почв фосфором и калием различия проявились более заметно. Например, для черноземов типичных индексы окультуренности составили 37, 52, 70 баллов, а

Таблица 5. Индексы агрохимической окультуренности черноземов Центрального федерального округа, баллы

Содержание в почве, мг/кг		Содержание N _{мин} , мг/кг		
P ₂ O ₅	K ₂ O	≤5.0	5.1–10.0	>10.0
Черноземы типичные				
≤50	≤80	37	52	70
	81–120	47	66	92
	>120	49	69	96
51–100	≤80	46	65	90
	81–120	56	79	109
	>120	58	82	114
>100	≤80	59	83	115
	81–120	69	97	135
	>120	71	100	139
Черноземы обыкновенные				
≤50	≤80	32	45	64
	81–120	40	57	82
	>120	51	72	103
51–100	≤80	41	58	83
	81–120	50	70	100
	>120	60	85	122
>100	≤80	53	74	106
	81–120	60	85	122
	>120	71	100	144

для черноземов обыкновенных – 32, 45 и 64 балла. При переходе почв с низким содержанием P₂O₅ и K₂O в группу повышенного содержания эти различия практически нивелировались.

В вышеописанных результатах исследования содержание подвижных форм фосфора и калия в почвах определяли по методу Кирсанова и Чирикова, в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах для этих целей использовали метод Мачигина, градации которых заметно различаются между собой. В связи с этим данные, полученные в этих регионах, рассматривают отдельно. Тем не менее результаты исследования свидетельствовали о том, что была подтверждена та же закономерность, что и в предыдущих работах, т.е. увеличение содержания элементов питания в почвах способствовало повышению индекса агрохимической окультуренности черноземов обыкновенных и южных, черноземов карбонатных и каштановых почв (табл. 6).

Анализ результатов многочисленных полевых опытов, проведенных на дерново-подзолистых

Таблица 6. Индексы агрохимической окультуренности почв Южного и Северо-Кавказского федеральных округов для озимой пшеницы, баллы

Содержание в почве, мг/кг		Содержание N _{мин} , мг/кг		
P ₂ O ₅	K ₂ O	≤15.0	15.1–25.0	>25.0
Черноземы обыкновенные и южные				
≤15	≤200	41	61	81
	201–300	45	67	89
	>300	48	71	94
16–30	≤200	48	72	96
	201–300	52	78	104
	>300	56	83	110
>30	≤200	60	90	120
	201–300	64	96	128
	>300	67	100	133
Черноземы карбонатные				
≤15	≤200	33	42	52
	201–300	37	47	58
	>300	40	51	63
16–30	≤200	48	62	76
	201–300	52	67	82
	>300	56	71	87
>30	≤200	71	91	112
	201–300	75	96	118
	>300	78	100	123
Каштановые почвы				
≤15	≤200	31	43	56
	201–300	40	55	72
	>300	50	69	90
16–30	≤200	40	55	72
	201–300	49	67	88
	>300	59	81	106
>30	≤200	55	75	98
	201–300	63	86	113
	>300	73	100	131

почвах, показал, что реакция почвенной среды является одним из главных факторов, ограничивающих урожайность многих сельскохозяйственных культур при величине рН в интервале очень низкой и низкой группы по степени кислотности. К таким культурам относится озимая пшеница [1]. В связи с этим при разработке нормативов окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур на дерново-подзолистых и серых лесных почвах было учтено данное

Таблица 7. Индексы агрохимической окультуренности почв для озимой пшеницы

Содержание в почве, мг/кг		Индекс окультуренности, балл					
		Содержание N _{мин} , мг/кг					
		pH ≤ 5.5			pH > 5.5		
P ₂ O ₅	K ₂ O	<5	5.1–10.0	>10	<5	5.1–10.0	>10
Дерново-подзолистые почвы							
≤50	≤80	29	40	57	31	44	63
	81–120	36	50	72	40	56	80
	>120	45	63	90	50	70	100
51–100	≤80	37	51	73	40	56	80
	81–120	44	61	87	48	68	97
	>120	53	74	106	58	82	117
>100	≤80	48	66	94	53	74	106
	81–120	55	77	110	60	85	122
	>120	65	90	129	71	100	143
Серые лесные почвы							
≤50	≤80	33	47	67	38	53	76
	81–120	41	58	83	47	66	94
	>120	49	69	99	55	77	110
51–100	≤80	43	61	87	49	69	99
	81–120	52	73	104	58	82	117
	>120	59	83	119	67	94	134
>100	≤80	48	67	96	54	76	109
	81–120	55	78	112	62	88	126
	>120	63	89	127	71	100	143

обстоятельство, которому не было придано значения при обработке опытов с озимой рожью, т.к. эта культура в меньшей мере реагирует на изменения реакций почвенной среды.

Результаты исследования показали, что снижение почвенной кислотности дерново-подзолистых и серых лесных почв содействовало повышению урожайности озимой пшеницы во всех вариантах на 11–12%, достигая при этом на высоко окультуренных почвах сбора зерна 37 ц/га на обеих почвенных разновидностях без применения удобрений. В настоящее время в Московской обл., в которой средневзвешенные показатели агрохимических свойств пахотных почв находятся в пределах высокоокультуренных, урожайность зерновых культур в среднем за 2016–2020 гг. с внесением минеральных удобрений ≈60 кг/га составила 28.7 ц/га.

Анализ полученных данных индексов агрохимического окультуривания почв, показал, что снижение кислотности способствовало заметно-

му их увеличению. Прирост индексов за счет перевода почв в более благоприятные условия обеспечивал прирост степени окультуренности дерново-подзолистых почв на 4–14 баллов, серых лесных – на 5–16 баллов (табл. 7). При этом разница в величинах индексов возрастала при увеличении содержания минерального азота в обеих почвах, а более высокий размах изменений этих величин отмечен для дерново-подзолистой разновидности. Комплексное агрохимическое окультуривание полей позволяет повысить плодородие дерново-подзолистых почв почти в 5 раз, серых лесных – в 4.3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что индексы агрохимического окультуривания для яровых зерновых культур варьируют в широких пределах в зависимости от степени обеспеченности различных почв подвижными формами фосфора и калия. Подобная закономерность отмечена для всех без

исключения типов почв, на которых проводили исследования.

Вовлечение в расчеты данных содержания минерального азота в почвах для озимых зерновых культур позволило значительно расширить наши знания по исследованному вопросу. Влияние содержания минерального азота на продукционную способность проявилось весьма заметно, поскольку позволило повысить индекс окультуренности дерново-подзолистых почв для озимой ржи в 4.5–5.0 раза при повышенном и высоком содержании в них элементов питания по сравнению с низкой степенью обеспеченности.

В опытах с озимой пшеницей выявлена аналогичная закономерность. Одновременное увеличение содержания минерального азота, подвижных форм фосфора и калия способствовали повышению индексов окультуренности черноземов выщелоченных Центрального округа в 3.9 раза, Южного и Северо-Кавказского – в 4.1, Приволжского – в 4.6 раза. Подобная закономерность выявлена также и для других подтипов черноземов, даже в тех случаях, когда для диагностики питания растений использовали другие методы и градации, например, для черноземов карбонатных и каштановых почв.

В зоне распространения кислых почв немалое влияние на степень их окультуренности оказывает величина pH, от которой также зависит уро-

жайность озимой пшеницы. Снижение кислотности увеличивает индекс окультуренности дерново-подзолистых почв на 4–14 баллов, серых лесных – на 5–16 баллов.

Таким образом, определение индексов агрохимической окультуренности почв предложенным методом позволяет оценить уровень плодородия основных почвенных разновидностей России для зерновых культур. Подобные расчеты можно выполнить на всех уровнях производства, начиная от поля и заканчивая страной, поскольку каждое сельскохозяйственное предприятие располагает и может располагать необходимыми данными. Вместе с тем подобные исследования должны продолжаться и совершенствоваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: ВО “Агропромиздат”, 1990, 219 с.
2. Кудяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современной земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15.
3. Постников А.В., Шафран С.А. Временные нормативы затрат удобрений на проведение работ по комплексному агрохимическому окультурированию полей, М.: ВНИПТИХИМ, 1982. 10 с.
4. Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур. М.: ВНИИА, 2016. 96 с.

Assessment of Soil Fertility by the Complex of Agrochemical Indicators

S. A. Shafran

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

e-mail: shafran38@mail.ru

The issues of assessing the degree of cultivation of different soils on the set of agrochemical indicators affecting the yield of grain crops are highlighted. The scientific basis for the development of indices of soil fertility was the “Regional standards of return on mineral fertilizers by increasing yield of cereal crops” developed by the VNIIA, which provided data on the effect of the complex of agrochemical properties of soils on the yield of grain crops cultivated in the main natural and climatic zones of the country. The results of the study showed that the indices of agrochemical cultivation of grain crops vary widely depending on the degree of provision of different soils with mobile forms of phosphorus, potassium, as well as mineral nitrogen for winter grain crops. In the soils of the Nonchernozem zone on the value of the index of agrochemical, fertility was significantly influenced by the reaction of the soil environment. The range of fluctuations in the index of agrochemical soil fertility was three to five times the value.

Key words: index of cultivation, agrochemical properties, grain crops, yield, mineral nitrogen, mobile forms of phosphorus, mobile forms of potassium, the reaction of the soil environment.

УДК 631.82:631.5: 631.559:633.11“321”(571.1)

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И АГРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИЕМОМ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В РАЗНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАУРАЛЬЯ¹

© 2022 г. Ю. В. Суркова^{1,*}, И. Н. Цымбаленко¹, С. Д. Гилев¹

¹Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия

*E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

Поступила в редакцию 21.05.2021 г.

После доработки 18.06.2021 г.

Принята к публикации 15.11.2021 г.

Представлены результаты исследования влияния минеральных удобрений и агротехнических приемов на урожайность и качество зерна яровой пшеницы в полевых севооборотах центральной лесостепной зоны Зауралья за период 2010–2020 гг. Приведен ретроспективный анализ гидротермических условий региона за 86 лет и 11-летний период. Показана зависимость урожайности от условий влагообеспеченности и агротехнических приемов (севооборотов, предшественников, минеральных удобрений). По гидротермическим условиям исследованного периода установлено 3 уровня влагообеспеченности: острозасушливый (ГТК 0.3–0.6), на который выпало 27.3% лет; засушливый (0.7–0.9)–27.3% лет и благоприятный по условиям увлажнения – 45.4% лет. Продуктивность яровой пшеницы и качество зерна в значительной степени определяли гидротермические условия и в меньшей – агротехнические приемы. Особенно четко проявилась зависимость урожайности яровой пшеницы от условий увлажнения. В благоприятных условиях влагообеспеченности (45–50% лет) яровая пшеница в полевых севооборотах центрального Зауралья на фоне минимальной системы обработки почвы и при оптимальной обеспеченности удобрениями и средствами защиты обеспечила стабильную урожайность на уровне 22.9 ц/га. Недостаточная влагообеспеченность (ГТК 0.7–0.9) приводила к потерям 37.1% урожая, острозасушливые явления снижали урожайность на 68.1%. Оптимальные дозы азотных удобрений оказывали положительное влияние на формирование урожайности яровой пшеницы: при величине ГТК 0.7–0.9 прибавка составила 1.3, в благоприятные годы – 4.6 ц/га. В качестве лучших предшественников яровой пшеницы выделили черный пар, обеспечивший повышение урожайности пшеницы по сравнению с другими предшественниками на 38–55% и сою, после которой урожайность пшеницы увеличивалась на 15–25% в зависимости от условий влагообеспеченности. Установлена сильная корреляционная зависимость между гидротермическими условиями июля и основным показателем качества зерна – содержанием сырой клейковины. Июль в Зауралье отличается относительно стабильными условиями влагообеспеченности, что свидетельствует о потенциальных возможностях климата Зауралья для выращивания качественного зерна яровой пшеницы.

Ключевые слова: яровая пшеница, погодные условия, удобрения, обработка почвы, урожайность, качество зерна, корреляция.

DOI: 10.31857/S0002188122020132

ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором, лимитирующим урожайность и качество продукции полевых культур в Зауралье, является обеспеченность территории влагой. Согласно ретроспективному анализу гидротермических условий вегетационного периода (май–август) за 86 лет наблюдений (1929–2015 гг.), в центральной природной зоне зафиксировано 11 острозасушливых лет (ГТК <0.5), в течение

29 лет наблюдали засуху средней интенсивности (0.5–0.9); 25 лет оказались умеренно влажными (1.0–1.2) и 22 года отличались высокой влагообеспеченностью (>1.2). Таким образом, согласно ретроспективному прогнозу, практически каждый второй год в Зауралье характеризуется как засушливый или очень засушливый [1].

Засушливость климата стала одной из предпосылок ускоренного перехода на бесплужное зем-

леделие, способствующее сокращению потерь и более эффективному использованию почвенной влаги.

В настоящее время в земледелии Зауралья в основном применяют минимальную систему обработки почвы. На более чем 40% посевных площадей зерновые культуры возделывают после стерневых фонов, с ограниченным применением минеральных удобрений [2]. По литературным данным, аналогичная ситуация складывается во многих регионах страны, что отрицательно сказывается на количестве и качестве зерновой продукции [3].

Интенсивные технологии (ресурсосберегающая обработка почвы, оптимальное минеральное питание, надежная защита от вредных объектов) обеспечивают увеличение продуктивности яровой пшеницы и улучшение качества зерна. Однако большинство авторов отмечают, что уровни урожайности и качественные показатели зерна значительно варьируют в зависимости от погодных условий [4–6].

Цель работы – установить влияние гидротермических условий центральной природной зоны Зауралья и агротехнических приемов на урожайность и качественные показатели зерна яровой пшеницы, возделываемой в полевых севооборотах на фоне минимальной системы обработки почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном стационарном опыте закладки 1968 г. на центральном опытном поле Курганского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала УрФАНИЦ УрО РАН.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднесуглинистый маломощный малогумусный, в пахотном слое содержится: гумуса – 3.23–3.78%, подвижного фосфора – 54–58 мг/кг (по Чирикову) – в контроле и 75–83 мг/кг – в удобренных вариантах, обменного калия – 176–300 мг/кг (по Масловой). Обеспеченность почвы N-NO₃ перед посевом составляла: после непаро-

вых предшественников – 5–10, после пара – 10–15 мг/кг.

Яровую пшеницу сорта Зауралочка возделывали в 4-польных севооборотах (пар–пшеница–пшеница–пшеница, пар–пшеница–соя–пшеница, пар–пшеница–рапс–пшеница, кукуруза–пшеница–горох–пшеница) на фоне минимальной системы обработки почвы (зяблевая обработка БДМ на 8–10 см). Учитывая засушливые условия центрального Зауралья и опираясь на ранее полученные данные лаборатории агрохимии института [7], на 1 га севооборотной площади, кроме контрольных вариантов, применяли наиболее оптимальные дозы минеральных удобрений: в зернопаровых севооборотах – N20 (в паровом поле и под пшеницу после пара азот не вносили, под 2-ю и 3-ю культуры – N40), в зерновом – N25 (под кукурузу – N40, под пшеницу после кукурузы – N40, под горох азот не вносили, под пшеницу после гороха – N20).

Пшеницу высевали сеялкой СКП-2.1, оборудованной сошниками культиваторного типа, норма высева 4.5–5.0 млн всхожих семян/га, срок посева – 3-я декада мая. В фазе кущения пшеницы проводили химическую прополку сорняков баковой смесью, состоявшей из сложного 2-этилгексилового эфира 2.4-Д и феноксапроп-*n*-этила. В годы эпифитотий листостебельных болезней посева пшеницы защищали фунгицидами пропиконазолной или тебуконазолной групп.

Уборку урожая проводили комбайном “Сампо 500”, наблюдения и учеты в полевых и лабораторных условиях – по общепринятым методикам и ГОСТам, для математической обработки полученных данных использовали программы Excel и Statistica 6.0, а также методы дисперсионного и корреляционного анализов [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За период исследования (2010–2020 гг.) условия увлажнения отличались контрастными показателями (рис. 1). Неблагоприятные гидротермические условия в острозасушливый и засушливый периоды усугублялись недостаточным увлажнением почвы к началу весенне-полевых работ (рис. 1б).

Особенно низкие запасы продуктивной влаги весной в 1-метровом слое почвы отмечены в острозасушливые 2010, 2012 гг. (61 и 78 мм или 58 и 74% нормы), в то время как среднемноголетний показатель весенних влагозапасов выщелоченного среднесуглинистого чернозема в вариантах поверхностной обработки составлял 105 мм [9]. Нормальная влагообеспеченность почвы выявля-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002 “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, рационального применения пестицидов и биопрепаратов, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

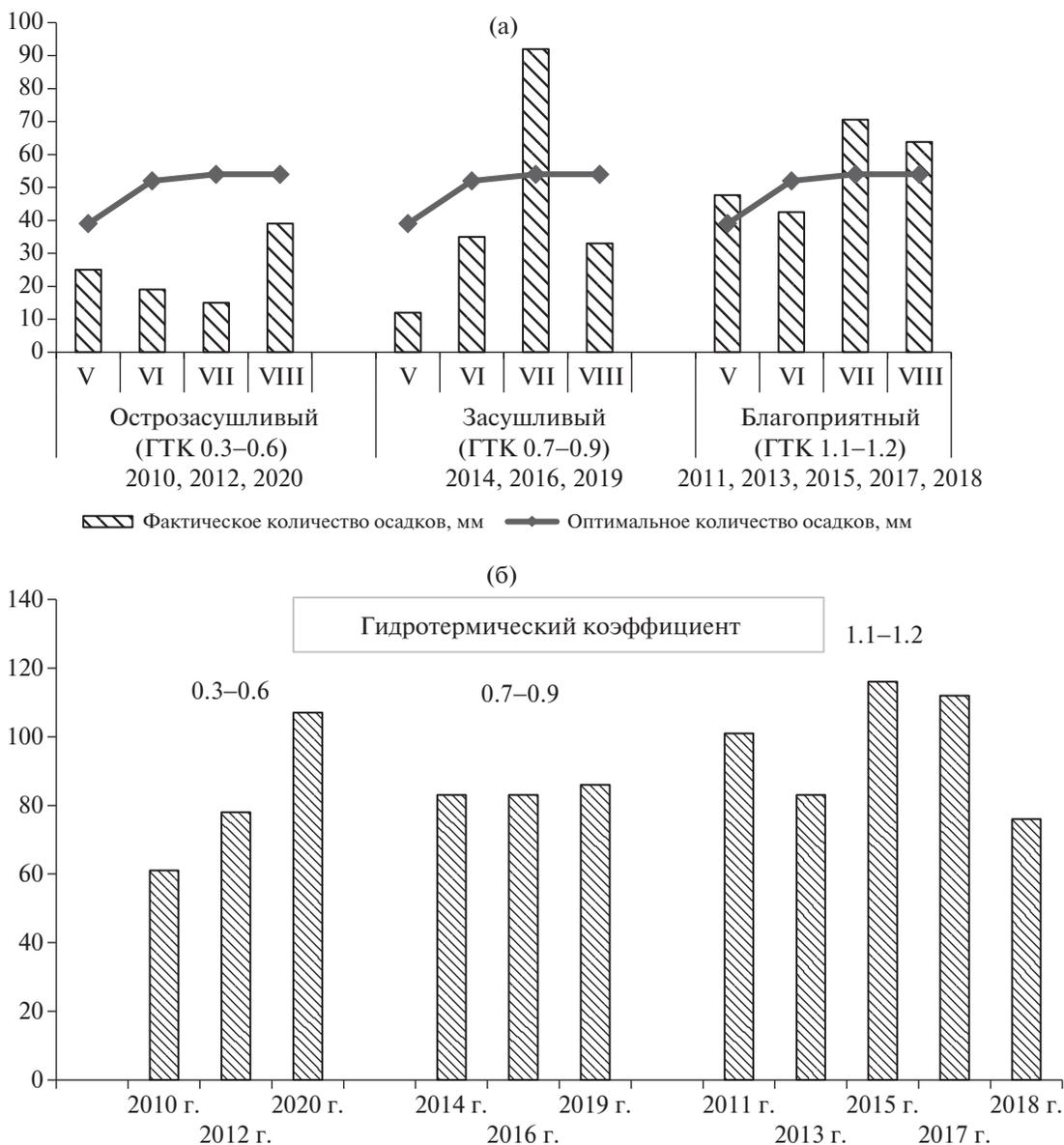


Рис. 1. Гидротермические условия вегетационных периодов (2010–2020 гг.): (а) – увлажнение, (б) – запасы продуктивной влаги в 1-метровом слое почвы перед посевом в вариантах минимальной системы обработки, мм.

на в 2020 г. (107 мм), однако в острозасушливых условиях вегетационного периода почвенные влагоресурсы быстро истощались из-за отсутствия достаточного количества летних осадков и непроизводительного расхода на испарение.

В период с ГТК 0.7–0.9 содержание влаги в годы исследования оказалось равным 83–86 мм, что составило 78–82% среднегогодовой обеспеченности. В благоприятные годы аналогичные уровни влагообеспеченности почвы наблюдали в 2013 г. (83 мм) и 2018 г. (76 мм), затем своевременные осадки вегетационных периодов “исправляли” эти несоответствия.

В процессе всего периода исследования продуктивность яровой пшеницы в значительной степени регламентировалась гидротермическими условиями и в меньшей – агротехническими приемами. Установлена сильная положительная связь между урожайностью яровой пшеницы и гидротермическим коэффициентом вегетационных периодов: $r = 0.70–0.73$.

Особенно четко проявилась зависимость урожайности яровой пшеницы от условий увлажнения. В среднем после изученных предшественников урожайность пшеницы, возделываемой без удобрений в острозасушливые годы, на которые

Таблица 1. Влияние гидротермических условий, предшественников и удобрений на урожайность яровой пшеницы на фоне минимальной системы обработки почвы (2010–2020 гг.)

Предшественник	Гидротермический коэффициент					
	0.3–0.6		0.7–0.9		1.1–1.2	
	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
Без удобрения						
Пар	10.6	43	18.3	75	24.4	100
Пшеница после пара	6.8	37	13.0	70	18.5	100
2-я пшеница после пара	5.8	37	10.5	66	15.8	100
Соя	6.9	35	14.1	72	19.5	100
Кукуруза	6.4	36	13.5	76	17.7	100
Горох	6.8	35	14.1	72	19.5	100
Рапс	5.4	34	10.8	67	16.1	100
Средние	6.7	36	13.1	71	18.3	100
На фоне удобрения						
Пар	11.0	40	18.6	68	27.4	100
Пшеница после пара	6.8	28	13.4	55	24.5	100
2-я пшеница после пара	6.9	32	12.7	59	21.5	100
Соя	7.5	31	15.8	66	24.0	100
Кукуруза	7.0	30	15.9	68	23.5	100
Горох	7.2	30	13.4	56	24.1	100
Рапс	5.8	31	13.5	73	18.5	100
Средние	7.3	32	14.4	63	22.9	100
<i>HCP</i> ₀₅	0.6–0.7					

приходилось 27.3% случаев, снижалась на 63.4% по сравнению с благоприятным по увлажнению периодом (табл. 1).

Оптимальные дозы азотных удобрений, высокая эффективность которых проявлялась в благоприятных условиях увлажнения, в острозасушливые годы оказывали больше угнетающее, чем положительное влияние на процессы формирования урожайности пшеницы. Прибавка зерна от азотных удобрений находилась в пределах ошибки опыта (0.6 ц/га).

В средnezасушливые годы (ГТК 0.7–0.9) снижение урожайности пшеницы составило 28.4% от урожайности, полученной в благоприятный период. В этих условиях минеральный азот оказался более эффективным, прибавка зерна пшеницы на фоне удобрений составила 1.3 ц/га.

В качестве лучших предшественников выделили пар и сою, обеспечившие повышение урожайности пшеницы по сравнению со 2-й после пара пшеницей как без удобрений, так и на фоне применения азотного удобрения в острозасушливые и обеспеченные влагой годы.

Следует отметить, что ретроспективный прогноз продуктивности яровой пшеницы в центральной лесостепной зоне Зауралья на основе 86-летних наблюдений [10] подтвердился исследованием за более короткий 11-летний период.

Следовательно, результаты исследования позволяют констатировать, что выщелоченные среднесуглинистые черноземы центральной лесостепной зоны Зауралья в благоприятных гидротермических условиях (до 50% лет) могут обеспечивать стабильную продуктивность яровой пшеницы в зернопаровых севооборотах без удобрения на уровне 18.3 ц/га при условии: средней обеспеченности почвы подвижным фосфором и надежной системы защиты от вредных объектов. В годы с недостаточной влагообеспеченностью (27–30% лет) потери урожая пшеницы, возделываемой без удобрений, в среднем после изученных предшественников достигали 28.4% (13.1 против 18.3 ц/га), в острозасушливые (27.3% лет) – 63.4%.

Минеральный азот на фоне оптимальной обеспеченности почвы подвижным фосфором в средние и благоприятные по увлажнению годы увеличивал урожайность пшеницы соответственно на 1.3 ц/га (на 10%) и 4.6 ц/га (на 25.1%).

Метеоусловия и минеральные удобрения оказывали существенное влияние на качество зерна яровой пшеницы [11, 12]. Средняя положительная корреляционная связь установлена между массой 1000 зерен, натурой зерна и гидротермическим коэффициентом вегетационных периодов ($r = 0.55–0.60$).

Установлено, что в благоприятные по температурному режиму и увлажнению годы (45–50% лет), в центральной природной зоне Зауралья имеется возможность получать зерно яровой пшеницы, отвечающее требованиям 1-го и 2-го классов по физическим качествам. Третий класс, согласно требованиям ГОСТа 52554-2006, можно получать при условии средней влагообеспеченности не зависимо от предшественников и фона удобрения полевого севооборота (табл. 2).

Стекловидность, которая характеризует белковый или крахмальный характер зерна, не зависела от погодных условий и в среднем за годы исследования была равна 50–60%, т.е. отвечала требованиям 2-го и 3-го классов (ГОСТ 52554-2006).

Таблица 2. Физические показатели качества зерна яровой пшеницы на фоне минимальной системы обработки почвы (2010–2020 гг.)

Предшественник	Гидротермический коэффициент					
	0.3–0.6		0.7–0.9		1.1–1.2	
	1	2	1	2	1	2
Без удобрения						
Пар	23.8	713	25.3	749	29.5	778
1-я пшеница после пара	21.3	714	23.0	744	29.4	782
2-я пшеница после пара	25.0	718	22.3	726	29.6	777
Соя	24.2	708	23.7	740	30.2	786
Кукуруза	21.9	697	23.9	749	29.3	782
Горох	21.6	708	22.5	730	29.8	784
Рапс	20.6	718	23.9	735	30.1	784
Средние	22.6	711	23.6	737	29.6	780
На фоне удобрения						
Пар	24.8	727	23.7	730	30.0	773
1-я пшеница после пара	20.5	695	21.5	713	28.6	773
2-я пшеница после пара	23.2	697	21.8	721	29.6	775
Соя	24.4	702	22.4	731	30.1	778
Кукуруза	23.0	674	23.2	741	29.8	771
Горох	22.2	696	22.2	715	29.8	771
Рапс	22.1	723	23.9	729	29.4	784
Средние	23.0	703	22.8	725	29.5	774

Примечание В графе 1 – масса 1000 зерен (г), 2 – натура зерна (г/л).

Наблюдали изменения этого показателя у пшеницы после разных предшественников от 50 до 70% (2010 г.). Азотные удобрения увеличивали стекловидность зерна на 2–7%.

В процессе исследования выявили сильную корреляционную связь гидротермических усло-

вий июля и одного из важных показателей качества зерна – содержания сырой клейковины (табл. 3). Наиболее четко проявилась положительная связь температурного режима июля и количества клейковины в зерне (средняя связь), а также сильная отрицательная связь между показателями увлажнения в этом месяце и содержанием сырой клейковины.

Для оценки степени влияния температурного режима и условий увлажнения были выделены 2 группы лет. В первую вошли годы со среднесуточной температурой меньше нормы, которая в июле составляет 19.6°C (2014 г. – 15.6, 2015 г. – 17.9, 2017 г. – 18.5°C) и количеством осадков, превышающих норму (54 мм) не менее чем в 1.5 раза (2014 г. – 102, 2015 г. – 90, 2016 г. – 131, 2017 г. – 80 мм). Вторую группу представляли остальные годы (63.6% лет).

Результаты анализа показали, что в годы со среднесуточными температурами июля меньше нормы и количеством осадков, превышавших норму (36.4% лет) без применения азотных удобрений пшеницу 3-го класса возможно получить лишь после пара и зернобобовых предшественников (табл. 4).

На фоне применения азотного удобрения содержание клейковины в среднем после всех предшественников увеличивалось на 2%, что обеспечило в неблагоприятный период формирование зерна 3-го класса по величине этого показателя.

Благоприятные условия для получения качественного зерна складывались, когда температура июля находилась в пределах и больше нормы (19.6°C), а сумма осадков не превышала норму более чем в 1.5 раза. В этот период, на который приходилось 63.6% лет, содержание клейковины в зерне составило 34.2–35.3% без удобрений и 34.8–36.8% – на фоне применения азотных удобрений.

Таблица 3. Корреляционная зависимость между метеословиями вегетационного периода и содержанием клейковины в зерне (2010–2020 гг.)

Месяц	Среднемесячная температура, °C			Осадки, мм		
	средняя	коэффициент корреляции (r)		среднее	коэффициент корреляции (r)	
		N0	N40		N0	N40
Май	13.3	–0.04	–0.07	31.7	–0.03	–0.07
Июнь	18.1	0.10	0.15	34.0	–0.26	–0.08
Июль	19.8	0.64	0.52	61.0	–0.81	–0.75
Август	18.2	–0.03	–0.11	48.6	0.28	0.23

Примечание. $r < 0.3$ – корреляционная связь между признаками слабая, $r = 0.3–0.7$ – средняя, $r > 0.7$ – сильная.

Таблица 4. Содержание клейковины в зерне яровой пшеницы в зависимости от метеоусловий июля (2010–2020 гг.), %

Предшественник	Без удобрения		На фоне удобрения	
	t < 19.6°C Σ > 78.0 мм	t > 19.6°C Σ < 78.0 мм	t < 19.6°C Σ > 78.0 мм	t > 19.6°C Σ < 78.0 мм
Пар	25.6	34.5	24.5	34.8
1-я пшеница после пара	22.7	34.7	24.9	35.1
2-я пшеница после пара	22.2	34.2	25.9	36.6
Соя	23.9	35.3	25.4	36.6
Кукуруза	21.5	34.7	25.1	36.0
Горох	24.2	35.3	24.9	36.8
Рапс	22.7	34.3	26.1	34.9
Средние	23.2	34.5	25.4	35.7

Степень деформации клейковины у сорта пшеницы Зауралочка практически не зависела от погодных условий. В среднем за годы исследования, согласно требованиям ГОСТа Р54478–2011, клейковина соответствовала II группе качества (85–90 ед. или удовлетворительно слабая клейковина). Для формирования зерна I группы качества (хорошая клейковина) благоприятные условия сложились в 2014 и 2020 гг. при ГТК 0.6.

ВЫВОДЫ

1. Ретроспективный прогноз продуктивности яровой пшеницы в центральной лесостепной зоне Зауралья на основе 86-летних наблюдений и последнего исследования в течение 11 лет, показал, что в средние и благоприятные по условиям тепло- и влагообеспеченности годы, на которые приходилось свыше 50% лет в данном регионе, яровая пшеница, возделываемая в полевых севооборотах на выщелоченных черноземах с применением минимальной системы обработки, может гарантировать урожайность без удобрений 18.3 ц/га, на фоне удобрений – на уровне 22.9 ц/га. В острозасушливые годы (27.3% лет) урожайность снижалась в среднем на 63.4, в средnezасушливые (ГТК 0.7–0.9) – на 28.4%.

2. Эффективность азотных удобрений, на фоне средней обеспеченности почвы подвижным фосфором, лимитировалась условиями увлажнения. В благоприятные годы прибавки урожая зерна от азотных удобрений в среднем после всех изученных предшественников составила 4.6 ц/га, в годы с недостаточным увлажнением (ГТК 0.7–0.9) – 1.3 ц/га, в острозасушливые – минеральный азот в оптимальных дозах оказывал больше отрицательное, чем положительное влияние на процессы формирования урожайности яровой пшеницы.

3. Среди предшественников яровой пшеницы выделились черный пар и соя. Пар обеспечил повышение урожайности пшеницы по сравнению с другими предшественниками на 32–55% в острозасушливые годы, на 15–43% – в средnezасушливые и на 11–38% – в благоприятные по увлажнению. Соя, как предшественник, обеспечивала прибавку урожая пшеницы по сравнению с последним полем традиционного пшеничного севооборота на 15–25%.

4. Установлено, что в большинстве изученных лет (свыше 50%) имеется возможность выращивать зерно яровой пшеницы, отвечающее требованиям 1-го класса по физическим качествам в благоприятные годы и не ниже 3-го класса – в среднеобеспеченные тепло и влагой. Установлена сильная корреляционная связь между гидро-термическими условиями июля и содержанием сырой клейковины в зерне пшеницы. Учитывая, что июль в Зауралье отличается стабильными условиями тепло- и влагообеспеченности, это природное явление свидетельствует о потенциальных возможностях климата Зауралья для выращивания качественного зерна яровой пшеницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. На пути к бесплужному земледелию / Под общ. ред. Гилева С.Д. Куртамыш: Куртамышская типография, 2015. 312 с.
2. Рекомендации по проведению весенне-полевых работ сельхозпредприятиями Курганской области в 2016 году. Куртамыш, 2016. 102 с.
3. Федоренко В.Ф., Завалин А.А., Милащенко Н.З. Научные основы производства высококачественного зерна пшеницы: научн. изд-е. М.: Росинформагротех, 2018. 396 с.
4. Галеев Р.Р., Самарин А.С., Андреева З.В. Влияние погодных условий на урожайность и качество мягкой яровой пшеницы в интенсивном земледелии

- лесостепи Новосибирского Приобья // Вестн. ВГАУ. 2017. № 4 (45). С. 9–15.
5. *Минина М., Дуктова Н.А., Кузнецова Н.А.* Продуктивность и качество яровой твердой пшеницы в зависимости от погодных условий // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Брянск, 2019. С. 855–860.
 6. *Панфилов А.Л.* Особенности формирования качества зерна яровой мягкой пшеницы в зависимости от погодных условий на разных склонах в лесостепной зоне Оренбургской области // Изв. Оренбург. ГАУ. 2018. № 4 (72). С. 45–50.
 7. *Волынкин В.И., Волынкина О.В., Копылов А.В.* Усовершенствованные приемы удобрения в адаптивно-ландшафтном земледелии. Куртамыш: Куртамышская типография, 2010. 493 с.
 8. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
 9. Ресурсосберегающие способы обработки почвы в адаптивно-ландшафтном земледелии Зауралья / Под общ. ред. Гилева С.Д. Куртамыш: Куртамышская типография, 2010. 194 с.
 10. Проблемы экологизации зернового производства и пути их решения в Зауралья / Под общ. ред. Гилева С.Д. Куртамыш: Куртамышская типография, 2018. 224 с.
 11. *Суркова Ю.В.* Урожайность и качество яровой пшеницы в зависимости от предшественника и фона удобренности // Аграрн. вестн. Урала. 2008. № 10. С. 56–58.
 12. *Волынкина О.В., Волынкин В.И.* Рекомендации по технологии выращивания высококачественного зерна ценных и сильных сортов яровой мягкой пшеницы в Курганской области и формированию товарных партий пшеницы. Куртамыш: Куртамышская типография, 2014. 87 с.

Influence of Mineral Fertilizers and Agrotechnical Techniques on the Yield and Quality of Spring Wheat Grain in Different Weather Conditions of the Central Forest-Steppe Zone of the Trans-Ural

Yu. V. Surkova^{a,#}, I. N. Tsymbalenko^a, and S. D. Gilev^a

^a*Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ul. Belinskogo 112a, Ekaterinburg 620142, Russia*

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

The results of the study of the effect of mineral fertilizers and agrotechnical techniques on the yield and quality of spring wheat grain in field crop rotations of the central forest-steppe zone of the Trans-Urals for the period 2010–2020 are presented. A retrospective analysis of the hydrothermal conditions of the region for 86 years and an 11-year period is given. The dependence of yield on the conditions of moisture availability and agrotechnical techniques (crop rotations, precursors, mineral fertilizers) is shown. According to the hydrothermal conditions of the studied period, 3 levels of moisture availability were established: acutely arid (HTC 0.3–0.6), which had 27.3% of years; arid (0.7–0.9)—27.3% of years and favorable for humidification conditions — 45.4% of years. Spring wheat productivity and grain quality were largely determined by hydrothermal conditions and, to a lesser extent, by agrotechnical techniques. The dependence of the yield of spring wheat on the conditions of humidification was especially clearly manifested. In favorable conditions of moisture availability (45–50% years) spring wheat in the field crop rotations of the central Trans-Urals against the background of a minimal tillage system and with optimal availability of fertilizers and protective equipment provided a stable yield of 22.9 c/ha. Insufficient moisture availability (HTC 0.7–0.9) led to losses of 37.1% of the crop, acute arid phenomena reduced yields by 68.1%. Optimal doses of nitrogen fertilizers had a positive effect on the formation of the yield of spring wheat: with a HTC value of 0.7–0.9, the increase was 1.3, in favorable years — 4.6 c/ha. As the best precursors of spring wheat, black steam was singled out, which provided an increase in wheat yield compared to other predecessors by 38–55% and soy, after which wheat yield increased by 15–25%, depending on moisture conditions. A strong correlation has been established between the hydrothermal conditions of July and the main indicator of grain quality — the content of raw gluten. July in the Trans-Urals is characterized by relatively stable conditions of moisture availability, which indicates the potential of the Trans-Urals climate for growing high-quality spring wheat grain.

Key words: spring wheat, weather conditions, fertilizers, tillage, yield, quality indicators, correlation.

УДК 631.871:633.552

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВЫТЯЖКИ ИЗ КОСТРЫ КОНОПЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО БИОУДОБРЕНИЯ

© 2022 г. И. Г. Макарская¹, С. Э. Старых¹, И. И. Серегина^{1,*},
С. Л. Белопухов¹, И. И. Дмитриевская¹

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

*E-mail: seregina.i@inbox.ru

Поступила в редакцию 03.02.2021 г.

После доработки 07.05.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

Изучили элементный состав вытяжки из гумифицированной костры конопли с целью оценки использования в качестве экологически безопасного биоудобрения. Установлено, что содержание углерода и азота в препаратах, полученных из костры конопли не зависело от степени гумификации, в то время как содержание кислорода и водорода было больше в препаратах, изготовленных из полностью перепревшей костры. Было выявлено, что гуминоподобные вещества, полученные из костры конопли, по структуре, свойствам, составу и содержанию функциональных групп близки к природному органическому веществу почвы, что позволяет рекомендовать их в качестве экологически безопасного биоудобрения для применения в условиях органического сельского хозяйства.

Ключевые слова: элементный состав, щелочноэкстрагируемое органическое вещество, вытяжка костры конопли, степень окисленности, теплота сгорания.

DOI: 10.31857/S0002188122040093

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основой ведения органического сельского хозяйства является применение в качестве удобрений растительных отходов, сидератов, а также гумусовых веществ естественного (природного) происхождения (только водные и щелочные экстракты) [1].

В связи с этим возникает необходимость поиска технологий получения экологически безопасных удобрений и комплексов, в состав которых входят гуминовые кислоты природного происхождения, костру конопли в качестве сырья для получения дополнительного количества биоорганических удобрений [2–4].

Специфические органические вещества, которые образуются после минерализации растительных остатков в виде костры технических культур, представляют собой относительно устойчивые высокомолекулярные азотсодержащие соединения сложного химического состава [5]. При использовании различных экстрагентов получают вытяжки препаратов, содержащих органическое вещество, по составу близкое гуминовым кислотам почв [6, 7]. Препараты, полученные различными методами, в том числе методом щелочной экстракции, обладают высоким потенциалом фи-

зиолого-биохимической активности и проявляют свойства регуляторов роста растений. Было показано стимулирование ими роста корневой системы растений, что способствовало активизации корневого питания [8, 9]. Несмотря на многочисленные исследования влияния различных препаратов растительного происхождения, остаются нерешенными вопросы особенностей состава и структуры органических веществ, полученных путем щелочной экстракции костры конопли и других растительных остатков.

Элементный анализ является одним из основных методов количественного определения элементов, входящих в состав гумусовых кислот, позволяет вскрыть особенности процессов трансформации органического вещества под воздействием различных антропогенных факторов [10, 11]. Данный метод служит для идентификации состава органического вещества, изучения изменений гумусовых веществ (ГВ), происходящих под влиянием различных биохимических агентов, составления простейших формул, а также для нахождения атомных отношений элементов (Н/С, О/С и С/Н) [12, 13].

Целью работы – сравнительный анализ количественного и качественного состава гумусовых

кислот дерново-подзолистой почвы (как эталона) и гумусовых веществ, выделенных из костры конопли разной степени гумификации с целью оценки их использования в качестве экологически безопасного биоудобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных вопросов были проведены аналитические исследования и сравнительная оценка элементного состава щелочной вытяжки, полученной из костры конопли и вытяжки, полученной из дерново-подзолистой почвы.

Образцы дерново-подзолистой почвы были взяты в варианте “чистый пар” длительного полевого опыта РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева г. Москва в 2019 г. [10].

Костра конопли в разной стадии гумификации была предоставлена ООО “Пенькокомбинат”, который находится в Пензенской обл., Наровчатский р-н, село Наровчата.

Вылеживание стебля (моцерация) костры конопли происходил следующим образом. Срезанные части стебля оставались в поле, проходя процесс моцерации – разложения пектинов для дальнейшего отделения волокон от центральной части стебля. Прессование производили прессподборщиками как в круглые рулоны, так и прямоугольные тюки. Тюки с полей вывозили в хранилища площадью 1500 м². Отходы складировали в виде буртов в естественных условиях. Период гумификации костры составлял от 3-х до 5-ти лет [10].

После отбора почвенных образцов методом предельного экстрагирования с помощью 0.1 н. раствора NaOH выделяли органическое вещество, представляющий собой комплекс ГВ (соотношение почва : раствор = 1 : 5 или 500 г почвы : 2.5 л щелочи). Полученный экстракт упаривали, центрифугировали и ставили на диализ до полной очистки. Затем опять упаривали до конца и получали препараты гумусовых веществ. Упаривали при температуре ≤50°C, чтобы не оказывать деструктурирующего воздействия на гумусовые вещества. Согласно методике, разделения на гуминовые и фульвокислоты не проводили, а анализировали препараты как единый комплекс гумусовых веществ. Сделано предположение, что полученные таким образом препараты более четко отражают картину их реального нахождения в почве, т.к. кроме обработки раствором слабой щелочи на них не оказывали никакого воздействия [10]. Полученные препараты имели зольность ≈5.0%.

Для получения щелочных препаратов органического вещества (**ОВ**) из костры конопли использовали тот же метод предельного экстрагирования,

что и с дерново-подзолистой почвой, до получения растворов желто-соломенного цвета [10].

Элементный анализ препаратов органического вещества проводили на автоматическом анализаторе фирмы “Паккард”. Определяли содержание углерода, водорода, азота, серы и фосфора, количество кислорода рассчитывали по разности. Степень окисленности (ω) рассчитывали по Орлову [14]. Если $\omega < 0$, то соединение восстановленное [15].

Содержание элементов представлено в массовых и в атомных процентах. Результаты элементного состава оценивали с использованием метода графостатистического анализа по Ван-Кревелену, что позволило по величине соотношения Н/С–О/С выявить процессы трансформации, предположительно формирующие соединения органической природы [12]. Теплоту сгорания гумусовых кислот определяли на основании их элементного состава по формуле Алиева [14].

Аналитические исследования проводили в трехкратной повторности. Статистическую обработку всех полученных результатов выполняли с использованием однофакторного метода дисперсионного анализа [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка элементного состава образцов дерново-подзолистой почвы и костры разной степени гумификации показали (табл. 1), что гумусовые вещества почвы (контроль) содержали наибольшее количество углерода (42.4%). При этом количество углерода в костре конопли не зависело от степени гумификации и составляло ≈39%.

Отмечено, что в результате длительного формирования гумусовых кислот дерново-подзолистой почвы происходит потеря периферических малоуглеродных фрагментов и накопление более стабильных фрагментов с повышенным содержанием углерода. Было сделано предположение, что трансформация структуры гумусовых кислот может происходить как под действием системы агротехнических приемов, так и под влиянием почвенных микроорганизмов.

Выявлены существенные отличия по содержанию водорода в анализированных образцах. При этом максимальное содержание водорода характерно для ГВ почвы (5.1%), что почти в 2 раза больше содержания данного элемента в препаратах органического вещества костры средней стадии гумификации (2.7%). Для препаратов, выделенных из костры полной степени гумификации, отмечено достоверное увеличение содержания водорода (3.2%), что свидетельствовало о более развитой периферии в их составе [14].

Важными показателями оценки элементного состава гумусовых веществ являются изменения содержания не только углерода, но и кислорода [14]. Содержание кислорода в исследованных образцах менялось в пределах 48.7–58.2%. При этом отмечена обратная зависимость между содержанием кислорода и углерода. Показано, что чем больше было содержание кислорода в исследованных препаратах гумусовых веществ, тем меньше содержание углерода. Минимальное содержание кислорода (48.7%) было в образцах почвы, для которых отмечено максимальное количество углерода (42.4%). В то же время в образцах костры содержание кислорода менялось от 55.9 до 57.8%, содержание углерода – от 39.2 до 39.7% в зависимости от степени гумификации.

Минимальное содержание кислорода (48.7%), отмеченное для ГВ почвы свидетельствовало об обеднении их периферической части кислородсодержащими фрагментами. В препаратах костры конопли содержание кислорода было большим и составляло в образцах средней степени гумификации 55.9, в образцах полной степени гумификации – 57.8%.

Содержание азота также отличалось в препаратах, полученных из исследованных образцов. Наибольшее содержание азота выявлено в ГВ дерново-подзолистой почвы и составило 3.9%. В образцах костры содержание азота было почти в 2 раза меньше, чем в образцах дерново-подзолистой почвы (контроля), составляло $\approx 2\%$ и не зависело от степени гумификации.

Как полагает Д.С. Орлов [14], выражение элементного состава ГВ в массовых процентах не дает полного представления ни о роли отдельных элементов в структуре вещества, ни о тех изменениях, которые происходят с гумусовыми веществами при различных реакциях. Поэтому для более четкой характеристики элементного состава гумусовых веществ в табл. 2 представлено содержание органогенных элементов в атомных процентах [17]. При пересчете данных исследования в атомные проценты содержание атомарного углерода в составе ГВ дерново-подзолистой почвы было сопоставимо с рассмотренными вариантами опыта и составило 30.0%. Содержание углерода в составе органического вещества костры изменялось достоверно по сравнению с контрольным вариантом, но не зависело от степени гумификации и составило 32.7–33.9%. Небольшие отличия содержания углерода при расчете в атомных процентах, а также в массовых процентах, характеризовало препараты, приготовленные из костры, одинаковым углеродным скелетом независимо от степени гумификации. Оценка размеров содержания кислорода при пересчете в

Таблица 1. Элементный состав гумусовых кислот дерново-подзолистой почвы и костры разной степени гумификации, % на беззольное вещество

Вариант	С	Н	N	O
Контроль (дерново-подзолистая почва)	42.4	5.1	3.9	48.7
Костра средней степени гумификации	39.2	2.7	2.2	55.9
Костра полной степени гумификации	39.7	3.2	2.1	58.0
<i>НРС</i> ₀₅	1.9	0.4	0.3	2.1

атомные проценты показала обратную закономерность по сравнению с содержанием углерода. В образце, полученном из дерново-подзолистой почвы, содержание кислорода составляло 25.3%, что меньше в 1.4–1.3 раза по сравнению с препаратами, выделенными из костры конопли. Повышение данного показателя в препаратах, полученных из костры конопли, могло свидетельствовать о значительной гидрофильности ГВ, что было обусловлено наличием гидроксо- и карбоксильных групп и, как следствие, определяло высокую емкость поглощения [14].

Гумусовые вещества дерново-подзолистой почвы характеризовались высоким содержанием водорода (42.4%), что в 1.5 раза больше по сравнению с препаратами, приготовленными из костры. Содержание водорода в препаратах органического вещества костры конопли зависело от степени гумификации и варьировало в пределах от 28.1 до 31.7%, что было несколько меньше содержания углерода и могло свидетельствовать о значительной доле ароматических структур в составе органического вещества. Необходимо отметить увеличение содержания водорода в составе *ОВ* костры с развитием процесса гумификации.

Установлено, что ГВ, полученные из дерново-подзолистой почвы, характеризовались наибольшим содержанием азота (2.3%). В препаратах, полученных из костры конопли, содержание азота было меньше по сравнению с контрольным вариантом в 1.4–1.5 раза и уменьшалось с развитием процесса гумификации и минерализации органических веществ. Это косвенно могло указывать на разрушение периферической части этих веществ. Содержание азота в органическом веществе, полученном из костры, было низким и составляло 1.5–2.2%.

Для выявления процессов трансформации, предположительно формирующих соединения органической природы, провели оценку соотношений Н/С, О/С, С/Н, степень окисленности гумусовых веществ, а также величину теплоты сгорания гумусовых веществ изученных образцов.

Таблица 2. Содержание органогенных элементов, атом. % на беззольные вещества

Вариант	С	Н	N	O
Контроль (почва)	30.0	42.4	2.3	25.3
Костра средней стадии гумификации	33.9	28.1	1.7	35.7
Костра полной стадии гумификации	32.7	31.7	1.5	34.0
<i>HCP</i> ₀₅	1.6	1.8	0.2	1.6

Изучение данных показателей позволило сделать предположение о примерном составе полученных органических веществ. Особый интерес представляли органические вещества, экстрагированные из растительных образцов, поскольку результаты изучения состава данных препаратов позволило их рекомендовать в качестве физиологически-активных веществ для применения в растениеводстве при выращивании сельскохозяйственных культур.

Отношение С/Н препаратов, полученных из дерново-подзолистой почвы, составляло 12.8, в то время как отношение С/Н препаратов, полученных из костры, было гораздо более высоким (20.6–21.8), что свидетельствовало о весьма низкой обеспеченности органического вещества костры конопля азотом (табл. 3).

Расчет отношения Н/С и О/С для всех вариантов опыта показал долю углерода по сравнению с другими элементами, входящими в состав гумусовых веществ полученных препаратов. Несмотря на меньшее содержание углерода в препаратах из костры конопля по сравнению с ГВ дерново-подзолистой почвы, доля ароматических структур в их составе была значительно больше. Причем, доля содержания углерода в них возрастала в результате длительного процесса гумификации [18]. Необходимо также отметить высокое содержание кислородсодержащих фрагментов в структуре данных веществ.

На основании определения атомной доли элементов в составе гумусовых кислот была предпринята попытка определения брутто-формулы гуминоподобных веществ. Согласно полученным

данным, можно сделать вывод, что структурные формулы органического вещества костры конопля в целом были сопоставимы с ГВ дерново-подзолистой почвы. В то же время отличие гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы от органического вещества костры конопля разной степени гумификации состояла в большей величине содержания водорода и азота в структуре макромолекул.

Показано, что величина теплоты сгорания гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы была больше и составила 3492 кал/г, что косвенно указывало на большую конденсированность их молекул. Полученные показатели для органического комплекса вытяжки из костры (2578–2858 кал/г) были приблизительно сопоставимы с теплотой сгорания торфов (2000–2600 кал/г).

Расчеты атомных соотношений Н/С–О/С, полученные на основе результатов элементного анализа, дали возможность оценить принципы и строение гуминовых кислот, а также предположить схему построения молекулы и соотношение в ней ароматических и алифатических структур [19]. Результаты графостатистического анализа, проведенного в нашем исследовании, представлены на рис. 1. С точки зрения оценки результатов графостатистического анализа, диаграмма атомных отношений позволила предположить некоторые аспекты трансформации гуминоподобных веществ почвы и вытяжки костры [19, 20]. На основании проведенного исследования было сделано предположение, что основными процессами, формировавшими ГВ дерново-подзолистой почвы, были декарбоксилирование и дегидратация. При этом они сильно гидрогенизированы, на что указывала величина отношения Н/С = 1.43.

Показано, что структура органического вещества препаратов, полученных из костры конопля, была более гидратирована, при этом обеднена группами CH_3 и CH_2 , т.к. отношение Н/С было меньше единицы. Можно сделать предположение, для органического вещества данных вариантов характерна более конденсированная структура, по величине отношения Н/С, приближающаяся к ароматическим углеводородам.

Таблица 3. Оценка процессов трансформации соединений органической природы

Вариант	Н/С	О/С	С/Н	ω^*	Брутто-формула вещества	Теплота сгорания гумусовых веществ, кал/г
Контроль	1.43	0.85	12.8	+0.27	$\text{C}_{35}\text{H}_{50}\text{O}_{31}\text{N}_3$	3492
Костра средней степени гумификации	0.83	1.05	20.6	+1.28	$\text{C}_{32}\text{H}_{27}\text{O}_{35}\text{N}_2$	2794
Костра полной степени гумификации	0.97	1.04	21.8	+1.11	$\text{C}_{33}\text{H}_{32}\text{O}_{32}\text{N}_2$	2858

* ω – степень окисления.

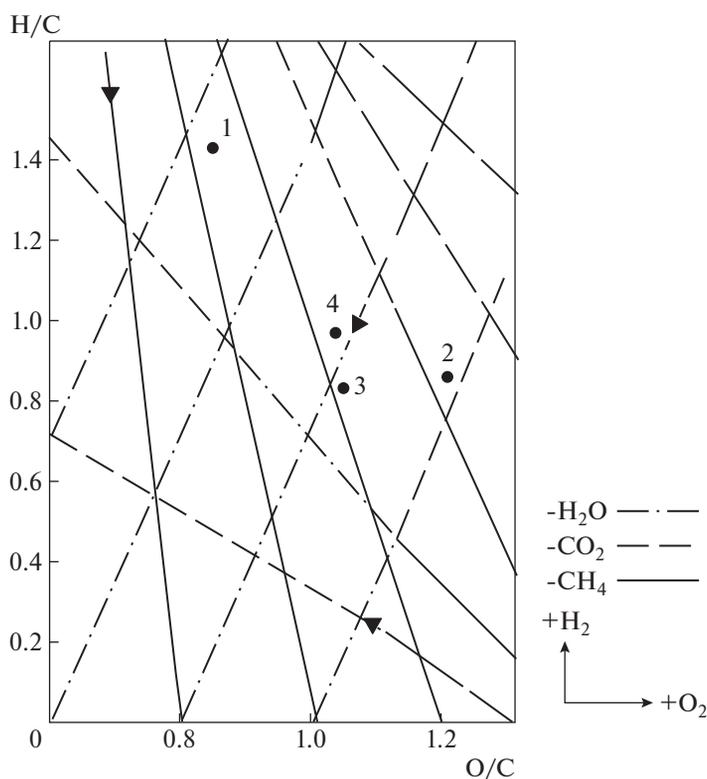


Рис. 1. Диаграмма атомных отношений Н/С и О/С, варианты: 1 – дерново-подзолистая почва, 2 – полуперепревшая костра, 3 – полностью перепревшая костра.

Таким образом, согласно данным графостатического анализа, сделано предположение, что процессы формирования гуминоподобных веществ, экстрагированных из костры конопли разной степени гумификации и из дерново-подзолистой почвы в целом аналогичны и сформированы в ходе декарбонирования и дегидратации. Результаты проведенного исследования позволили сделать вывод, что препараты органического вещества, полученные из гумифицированной костры конопли являются ценным биоудобрением, которые можно рекомендовать для использования в растениеводстве при выращивании сельскохозяйственных культур.

ВЫВОДЫ

1. Определили, что в гумусовых веществах, выделенных из перепревшей костры конопли, содержание углерода и азота не зависело от степени гумификации, в то время как содержание кислорода и водорода было больше в препаратах, изготовленных из полностью перепревшей костры.

2. Показано, что степень окисления ω находилась в интервале от +0.27 в контрольном варианте (вытяжка из дерново-подзолистой почвы) до +1.11...+1.28 в вытяжках из полностью перепревшей и полуперепревшей костры конопли соот-

ветственно. Сделано предположение, что гумусовые вещества, выделенные из костры, были наиболее гидрогенизированы и карбоксилированы по сравнению вытяжкой из дерново-подзолистой почвы. Это свидетельствовало о большей химической активности гуминоподобных веществ, экстрагированных из костры конопли.

3. Показано, что показатели теплоты сгорания гумусовых веществ конопли были достаточно близкими (2578–2858 кал/г), что сопоставимо с теплотой сгорания торфов (2000–2600 кал/г). Необходимо отметить увеличение показателя с ростом доли содержания углерода в структуре гумусовых веществ.

4. На основании данных графостатического анализа сделано предположение, что гуминоподобные вещества, экстрагированные из костры конопли и дерново-подзолистой почвы, сформированы в ходе развития аналогичных процессов (схожий углеродный скелет, высокое содержание ароматических структур, конденсированная структура, близкая к ароматическим углеводородам), независимо от степени гумификации.

5. На основании полученных результатов сделан вывод, что гуминоподобные вещества растительного происхождения по структуре, свойствам, составу и содержанию функциональных групп близки к ор-

ганическому веществу почвы. Это позволяет рекомендовать их в качестве экологически безопасного биоудобрения для применения в условиях органического сельского хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 33980–2016. Продукция органического производства. Правила производства, переработки, маркировки и реализации (САС/GL 32-1999, NEQ) (с поправкой) от 2018.01.01. М.: Стандартинформ, 2016. 42 с.
2. Бойко Н.И., Одарюк В.А., Сафонов А.В. Основные направления безотходных и малоотходных технологий // *Civil Security Technol.* 2015. V. 12. № 1 (43). С. 68–72.
3. Гришина Л.А., Моргунов Л.В. Элементный состав гуминовых кислот окультуренных дерново-подзолистых почв // *Журн. почв.* 1979. № 2. С. 53–61.
4. Белоухов С.Л., Дмитриевская И.И., Гришина Е.А. Физико-химические свойства органо-минерального комплекса растительных остатков льняной костры // *Агрохимия.* 2016. № 6. С. 20–28.
5. Nardi S., Concheri G., Dell’Agnola G., Nardi S., Concheri G., Dell’Agnola G. Biological activity of humus // *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems.* 1996. P. 361–406.
6. Гасанова Е.С., Котов В.В., Стелькольников К.Е., Фоминых Т.О. Исследование качества гуминовых кислот чернозема выщелоченного под сельскохозяйственными культурами // *Агрохимия.* 2014. № 4. С. 27–34.
7. Гришина Е.А. Влияние органо-минерального комплекса из льняной костры на урожай и качество льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) и белого люпина (*Lupinus albus*): Дис. ... канд. биол. наук. М.: РГАУ–МСХА, 2015. 170 с.
8. Платонов В.В., Елисеев Д.Н., Швыкин А.Ю., Хадарцев А.А. Методы предварительной оценки физиологической активности гуминовых и гуминово-добных веществ // *Вестн. новых мед. технол.* 2010. Т. 17. № 3. С. 26–28.
9. Belopukhov S.L., Grishina E.A., Dmitrevskaya I.I., Lukomets V.M., Uschapovsky I.V. Effect of humic-fulvic complex on flax fiber and seed yield characteristics // *Изв. ТСХА.* 2015. № 4. С. 71–81.
10. Мазиров М.А., Сафонов А.Ф. Длительный полевой опыт РГАУ–МСХА: сущность и этапы развития // *Изв. ТСХА.* 2010. Вып. 2. С. 66–75.
11. Камилов М.К., Камилова П.Д., Камилова З.М., Эминова Э.М. Органическая продукция сельского хозяйства – одно из актуальных направлений экологизации АПК // *Регион. пробл. преобразования экон.* 2017. № 5. С. 22–30.
12. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 262 с.
13. Андреева И.М. Процессы превращения гумусовых веществ в почве: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л.–Пушкин, 1966. 22 с.
14. Орлов Д.С., Лозановская И.Н., Попов П.Д. Органическое вещество почвы и органические удобрения. М.: Изд-во МГУ, 1985. 97 с.
15. Дергачева М.Н. Органическое вещество почв: Статистика и динамика. М.: Наука, 1984. 152 с.
16. Кобзаренко В.И., Волобуева В.Ф., Серегина И.И., Рододина Л.В. Агрохимические методы исследований. М.: РГАУ–МСХА, 2015. 308 с.
17. Белоухов С.Л. Лабораторный практикум по физической и коллоидной химии: учеб. пособ. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 243 с.
18. Черников В.А. Комплексная оценка гумусового состояния почв // *Изв. ТСХА.* 1987. № 6. С. 83–94.
19. Сартаков М.П., Тихова В.Д. Графостатический анализ и спектроскопия ЯМР¹³C молекул гуминовых кислот торфов среднего Приобья // *Вестн. КрасГАУ.* 2009. № 6. С. 76–80.
20. Лыков А.М., Черников В.А., Вьюгин С.М. Характеристика гуминовых кислот интенсивно используемой дерново-подзолистой почвы // *Изв. ТСХА.* 1975. Вып. 2. С. 100–105.

Elemental Composition of Extract from Hemp Bark for Evaluation of Use as an Environmentally Safe Biological Fertilizer

I. G. Makarskaya^a, S. E. Starykh^a, I. I. Seregina^{a, #},
S. L. Belopukhov^a, and I. I. Dmitrevskaya^a

^aRussian State Agrarian University—K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia

[#]E-mail: seregina.i@inbox.ru

The study of the elemental composition of an extract from a humified hemp fire was carried out in order to assess its use as an ecologically safe biofertilizer. The studies carried out made it possible to establish that the content of carbon and nitrogen in the preparations obtained from the hemp fire did not depend on the degree of humification. At the same time, the content of oxygen and hydrogen was higher in preparations made from a completely rotted fire. It was found that humic-like substances obtained from the hemp fire in structure, properties, composition and content of functional groups are close to the natural organic matter of the soil, that allows us to recommend them as an environmentally friendly biofertilizer for use in organic agriculture.

Key words: elemental composition, humic substances of hemp fire, degree of oxidation, heat of combustion.

УДК 632.95:581.132:581.14:633.853.494

ВЛИЯНИЕ ДИФЕНИЛМОЧЕВИНЫ НА ЭНЕРГОЗАПАСАЮЩИЕ РЕАКЦИИ ФОТОСИНТЕЗА В ОНТОГЕНЕЗЕ РАСТЕНИЙ РАПСА

© 2022 г. Н. П. Татаринцев^{1,*}, Н. С. Захарченко², А. Н. Шмарев³, В. Д. Креславский³,
Д. В. Демин³, Г. А. Семенова⁴, А. П. Глинушкин¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, пос. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

²Филиал Института биоорганической химии РАН
142290 Пушкино, Московская обл., просп. Науки, 6, Россия

³Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

⁴Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 3, Россия

*E-mail: nicktatarintsev@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 27.12.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

Исследовано влияние N,N¹-дифенилмочевина (ДФМ), обладающей цитокининовой активностью, на фотосинтез, скорость фотофосфорилирования и структуру клеток мезофилла хлоропластов в фазе цветения растений рапса. Обработка растений рапса ДФМ влияла на фотосистему 2 (ФС-2) и изменяла соотношение скоростей циклического (ЦФ) и нециклического фотофосфорилирования (НЦФ) препаратов тилакоидных мембран, выделенных из флагового листа. Через 24 ч после обработки растений ДФМ скорость ЦФ в хлоропластах возрастала на 25–30%, а скорость НЦФ не изменялась. Соотношение скоростей ЦФ и НЦФ сохранялось в течение нескольких суток. Обработка растений ДФМ приводила к повышению максимального квантового выхода ФС-2 ($F_v : F_m$). Полученные результаты свидетельствовали, что обработка растений рапса ДФМ изменяла углеводный обмен в хлоропластах, увеличивая содержание крахмальных зерен в листьях и жира на 20% в зерне конечной продукции.

Ключевые слова: дифенилмочевина, энергозапасующие реакции, фотосинтез, онтогенез растений, рапс.

DOI: 10.31857/S0002188122040135

ВВЕДЕНИЕ

Исследование механизмов регуляции роста и развития растений является актуальной проблемой физиологии растений [1]. Основную роль в этом процессе играют фитогормоны – индолилуксусная кислота (ИУК) и цитокинины (ЦК), которые синтезируются централизованно: ИУК – в верхушке побега, ЦК – в корнях. Они индуцируют деление клеток и участвуют в регуляции их роста, дифференциации и включают 2 важнейшие генетические программы – побего- и корнеобразование. Эти 2 фитогормона, взаимодействуя по принципу обратных положительных связей, обеспечивают поступательное развитие и старение растительного организма. ИУК индуцирует закладку новых корней, что приводит к увеличению синтеза цитокининов корневой системой. А это, в свою очередь, способствует закладке в

апексе новых метамеров, а при переходе к репродуктивной фазе вегетации – регуляции процесса старения [1–3]. Обработка растений злаков цитокининами в фазе кущения приводит к изменению обмена веществ уже закончивших рост органов. Кинетин, например, задерживает процессы старения и распада. Установлено также влияние ЦК на синтез белков и энергетический обмен как на уровне целого растения, так и хлоропластов в злаковых культурах [2–5]. Ранее было обнаружено влияние природного соединения N,N-дифенилмочевина (ДФМ), обладающего цитокининовой активностью, на скорость циклического (ЦФФ) и нециклического фотофосфорилирования (НФФ) в хлоропластах и пул индолов во флаговых листьях растений пшеницы, обработанных в начале фазы цветения [6]. Нами установлено изменение индукции флуоресценции и реакции хлорофилла на

Таблица 1. Параметры полифазной индукции флуоресценции листьев рапса, рассчитанные из индукционных кривых быстрой флуоресценции хлорофилла

Параметр	Контроль	Контроль + ДФМ*
$F_v : F_m$ – максимальная квантовая эффективность ФС-2	0.735 ± 0.01	0.770 ± 0.01
$ET_0 : RC$ – поток электронов перенесенных от Q_A к Q_B в расчете на реакционный центр ФС-2	0.93 ± 0.02	0.98 ± 0.01
S_v – нормализованная площадь, число восстановленных пластохиноновых переносчиков электрона в ФС-2	32 ± 1	36 ± 1

*ДФМ – дифенилмочевина.

Таблица 2. Влияние обработки растений рапса сорта Галант дифенилмочевинной (ДФМ) в начале фазы цветения на содержание жира в зерне

Показатель	Контроль	ДФМ	НД на метод испытаний
Массовая доля жира, %	31.1 ± 1.0	39.3 ± 1.0	ГОСТ 32905-2012

поражение пшеницы микозами (влияние стресс-факторов) [7, 8]. Однако механизм действия ДФМ на энергетический и углеводный обмен в различных фазах онтогенеза растений во многом остается неясным и является целью настоящего исследования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Растения рапса сорта Галант выращивали в теплице в сосудах, содержащих 5 кг серой лесной почвы. Использовали стандартные семена рапса от производителя. Семена до посева в почву замачивали на 2 сут в воде (контроль) и в водном растворе ДФМ (10^{-5} М). Перед посевом, готовя почвосмесь для исследования, вносили удобрения: мочевину, двойной суперфосфат, K_2SO_4 в дозах 8 мг/100 г (эквивалентно 20 г/м²) почвы для каждого элемента питания (НРК). Растения обрабатывали раствором ДФМ (0.2 мг/м²) стандартным опрыскиванием из расчета 300 литров рабочего раствора на 1 га в начале фазы цветения. Исследования в теплице проводили в течение 3-х лет. Рас-

тительный материал брали утром в 9–10 ч. Тилакоидные мембраны хлоропластов выделяли из флаговых листьев по методу [9]. Циклическое фотофосфорилирование проводили в присутствии феназинметасульфата (ФМС), нециклическое – в присутствии феррицианида и субстратов, АДФ – 3 мМ, 5 мМ фосфата и 3 мМ хлористого магния в 10 мМ Трицин–NaOH буфере (рН 7.8). Суспензию хлоропластов добавляли в количестве, эквивалентном 30 мкг хлорофилла. Реакционную смесь освещали белым светом с интенсивностью 300 Вт/м² в течение 3 мин. Количество образованного АТФ измеряли биолюминесцентным методом по свечению люциферин-люциферазной системы [10]. Структуру хлоропластов в фазе молочно-восковой спелости исследовали с помощью электронной микроскопии [11]. Для этой цели аликвоту суспензии хлоропластов фиксировали с 2.5%-ным глутаровым альдегидом в фосфатном буфере (рН 7.4) с последующей фиксацией в 1%-ном растворе OsO_4 . Фиксированные образцы обезжировали в спирте и ацетоне и заполняли эпоном 812. Ультратонкие срезы окрашивали уранилацетатом и цитратом свинца.

Измерение флуоресценции хлорофилла. Активность ФС-2 оценивали путем измерения флуоресценции хлорофилла с помощью метода быстрой флуоресценции (БФл). Перед измерениями листья закрепляли внутри измерительной ячейки и держали в темноте 15 мин.

Различные флуоресцентные параметры, такие как F_0 , F_v и F_m , где F_0 – начальная (минимальная) флуоресценция, F_m – максимальная флуоресценция, F_v – переменная ($F_v = F_m - F_0$), определяли с помощью ПАМ флуориметра (ХЕ-РАМ, Heinz Walz, Германия). Индукционные кривые БФл (OJIP-transient) были оценены в электронном виде и записаны на компьютере [12]. Оценивали максимальную квантовую эффективность ФС-2 по величине соотношения $F_v : F_m$. На основе индукционных кривых БФл рассчитывали также величину $ET_0 : RC$ – поток электронов, перенесенных от Q_A на Q_B в расчете на РЦ ФС-2 и S_0 – нормализованную площадь, число восстановленных пластохиноновых переносчиков электронов в ФС-2 (табл. 1).

Опыт проводили в 3-х повторностях, аналитические измерения – в 5-ти повторениях. Представлены среднеарифметические величины типичного опыта и их стандартные отклонения. Достоверность различий определяли по *t*-критерию Стьюдента при $p < 0.05$.

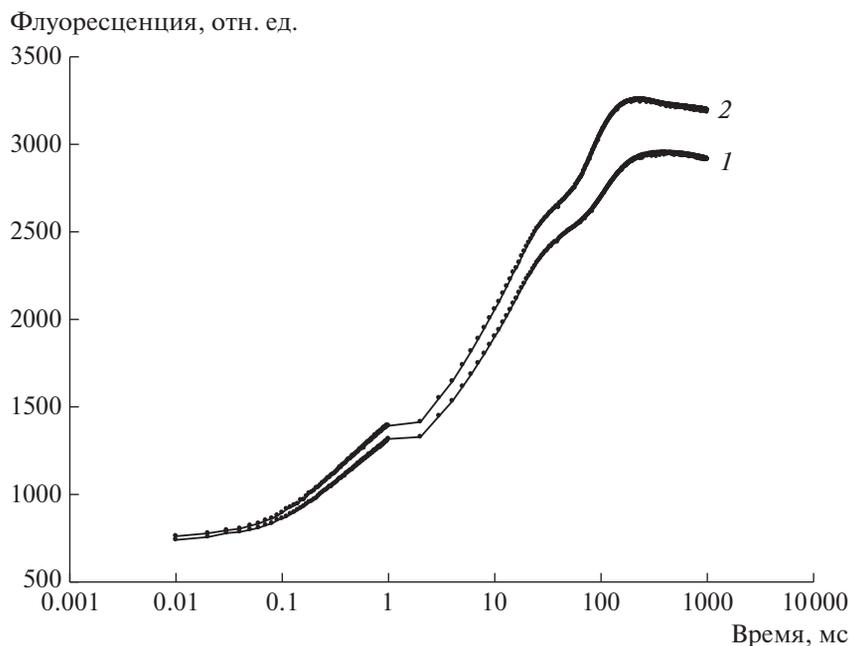


Рис. 1. Индукционные кривые быстрой флуоресценции Хл *a* в листьях контрольных и обработанных дифенилмочевинной (ДФМ) растений рапса в начале фазы цветения: 1 – контроль, 2 – ДФМ; время – миллисекунды (мс).

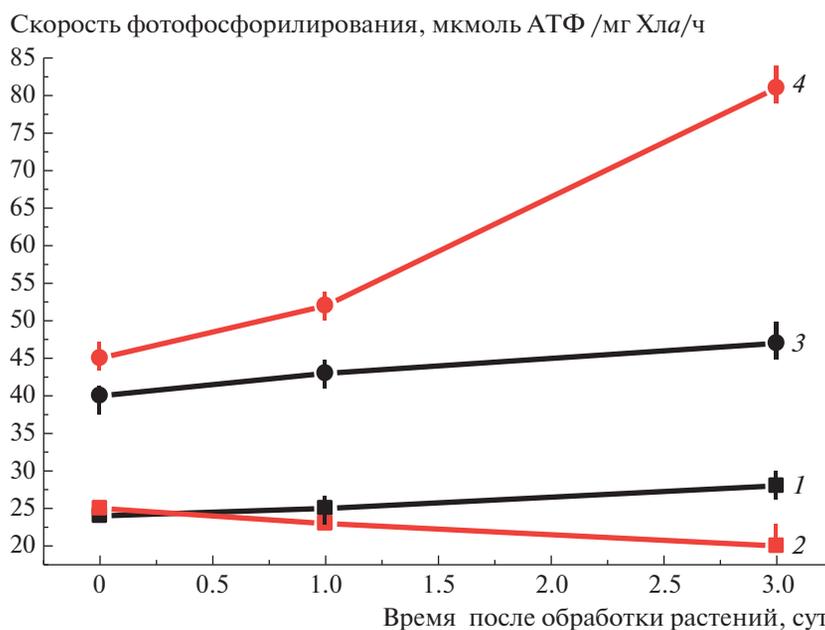


Рис. 2. Влияние обработки растений рапса сорта Галант дифенилмочевинной (ДФМ) в начале фазы цветения на скорости циклического (ЦФ) и нециклического (НЦФ) фотофосфорилирования в препаратах тилакондных мембран хлоропластов: 1 – контроль – скорость НЦФ, 2 – обработка ДФМ – скорость НЦФ через 1 и 3 сут, 3 – контроль – скорость ЦФ, 4 – обработка ДФМ – скорость ЦФ через 1 и 3 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Было исследовано действие ДФМ на фотосинтетическую активность ФС-2. Типичные кривые быстрой флуоресценции представлены на рис. 1. Индукционная кривая растений обработанных

ДФМ, располагается выше контроля и площадь под ней, отражающая емкость пластохинонового пула, больше, чем площадь под индукционной кривой контроля. Из чего следует, что число молекул пластохинона – переносчика электрона в ЭТЦ ФС-2 было больше у растений, обработан-

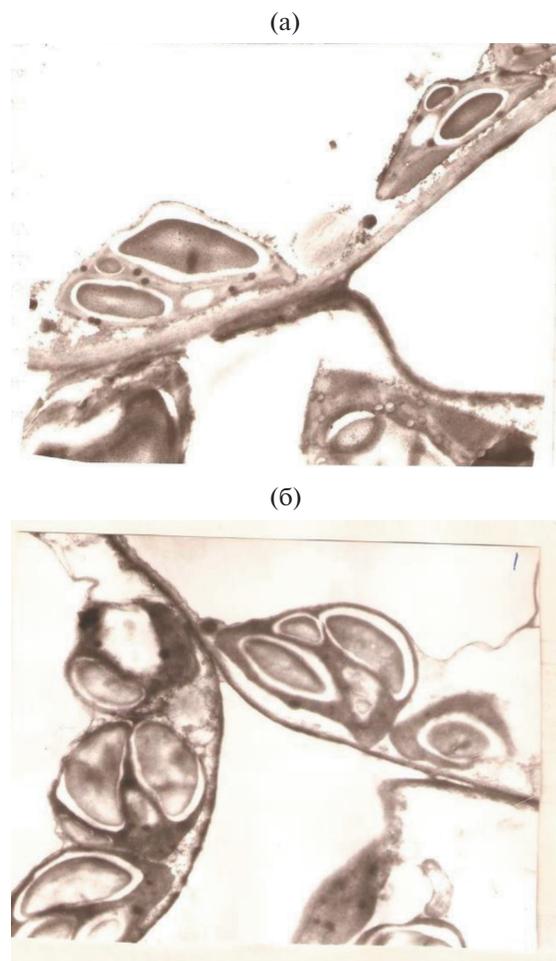


Рис. 3. Электронная микроскопия меристемных клеток флаговых листьев (крахмальные зерна) растений рапса сорта Галант, выделенных в фазе начала молочной спелости: (а) – контроль, (б) – растения, обработанные ДФМ в начале фазы цветения.

ных ДФМ, чем в контроле. Также, в результате обработки растений ДФМ увеличивались величины ряда параметров флуоресценции $Xl a$, в том числе максимальный квантовый выход $ФС-2 (Fv : Fm)$, максимальный поток электронов, перенесенных от первичного стабильного акцептора в фотосистеме 2 QA к вторичному акцептору QB , в расчете на реакционный центр $ФС-2 (ET_0 : RC)$ (табл. 1). Известно, что фотосинтетический аппарат ($ФА$) (особенно $ФС-2$) является одной из наиболее чувствительных систем к воздействию стрессов различной природы [13, 14]. Полученные данные согласуются с ранее полученными данными в работе [15], где было показано, что ДФМ замедляла старение и снижала степень окислительного стресса в листьях. Таким образом, на уровне первичных процессов фотосинтеза проявлялся стабилизирующий эти процессы эффект ДФМ.

Уже на 2-е сут после обработки растений ДФМ, проведенной в начале фазы цветения растений рапса, наблюдали увеличение скорости циклического фотофосфорилирования, а скорость нециклического фотофосфорилирования изменялась незначительно (рис. 2). При этом максимальная разница между опытом и контролем достигалась к середине фазы цветения. Согласно нашим данным, полученным на проростках пшеницы по влиянию умеренного теплового стресса на фотохимическую активность и скорость фотофосфорилирования [12], такая разница между циклическим и нециклическим фотофосфорилированием может объясняться проявлением умеренного окислительного стресса ($ОС$), индуцированного стрессором. За счет развития $ОС$ усиливается ЦФФ и снижается НФФ. Предположили, что обработка ДФМ аналогично индуцирует развитие слабого окислительного стресса во флаговом листе, что приводит к усилению циклического фотофосфорилирования. В работе [15] было установлено, что обработка злаковых растений в начале фазы цветения приводит к изменению структуры хлоропластов, увеличению скорости циклического фотофосфорилирования и соотношения некоторых аминокислот в зерне и их содержания. В частности, наблюдали увеличение содержания пролина в обработанных злаковых растениях. Считается, что пролин является маркером развития стресса в растениях [16]. При этом, как показано ранее в работах [5, 6], изменяется содержание индолов и фенолов в листьях злаков и, соответственно, соотношение цитокининов и ауксинов. Обработка растений ячменя в начале фазы цветения, когда формируется колос (активен флаговый лист), приводит к увеличению урожайности и снижению содержания запасного белка (что подтверждено эффектом разбавления: крахмальные составляющие нарабатываются быстрее, белковость зерна ячменя снижается). Имеются литературные данные, свидетельствующие о том, что после обработки злаковых растений цитокининами в фазе колошения отмечено увеличение количества зерен в колосе и урожайности растений [17], это можно объяснить большей выполненностью зерен в колосе и колосках злаков, особенно многорядного ячменя, пшеницы и овса по сравнению с карбамидно-аммиачной смесью [18–20]. На основе полученных результатов и литературных данных [21, 22] можно сделать предположение, что обработка растений ДФМ изменяет скорость поступления метаболитов углеводного и белкового обмена в репродуктивные органы рапса и их накопление за вегетационный период. Обработка вегетирующих рас-

тений ДФМ энергетически и экономически менее затратная по сравнению с применением КАС 28. ДФМ перспективен для изучения и на других культурах, в том числе по физиолого-экономическим основаниям.

Полученные нами результаты по структуре хлоропластов, выделенных в фазе начала молочной спелости (электронная микроскопия) свидетельствовали о том, что обработка семян и растений рапса ДФМ в начале фазы цветения изменяла углеводный обмен в хлоропластах, увеличивая содержание крахмальных зерен (рис. 3). Результаты анализа содержания жира в семенах контрольных и обработанных ДФМ растений рапса (табл. 2), свидетельствовали о существенном увеличении содержания жира (до 26.3%) в сформированных семенах рапса при опрыскивании растений.

ВЫВОДЫ

1. Обработка растений ДФМ приводила к повышению максимального квантового выхода ФС-2 ($F_v : F_m$) и изменяла соотношение скоростей циклического (ЦФ) и нециклического (НЦФ) фотофосфорилирования препаратов тилакоидных мембран.

2. Обработка растений рапса ДФМ изменяла углеводный обмен в хлоропластах, увеличивая содержание крахмальных зерен в листьях и жира на 20% в зерне конечной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерфлинг К. Гормоны растений. М.: Мир, 1985. 298 с.
2. Кулаева О.Н. Цитокинины, их структура и функции. М. Наука, 1973. 263 с.
3. Кулаева О.Н., Кузнецов В.В. Новейшие достижения и перспективы в области изучения цитокининов // Физиология растений. 2002. Т. 49. № 4. С. 626–640.
4. Якушкина Н.И., Похлебаев С.М. Особенности фотофосфорилирования хлоропластов, выделенных из обработанных фитогормонами листьев ячменя и пшеницы // Физиология растений. 1982. Т. 29. № 3. С. 502–507.
5. Татаринцев Н.П., Лебедева А.И., Пачепская Л.Б., Рузиева Р.Х., Герц С.М., Руденко Т.И. Взаимосвязь различных типов фотофосфорилирования и пулов метаболитов индольной и фенольной природы в онтогенезе злаковых культур // Физиология растений. 1993. Т. 41. № 5. С. 709–714.
6. Tatarintsev N.P. Low-frequency cyclic variations in the energy-storing reactions of photosynthesis and indole pool size in wheat plant during ontogeny // Biophysics. 2002. V. 47. P. 78–81.
7. Тимофеев Н.П., Маторин Д.Н., Глинушкин А.П., Горячев С.Н., Алексеев А.А. Индукция флуоресценции хлорофилла у зараженной корневой гнилью озимой пшеницы // Естеств. и техн. науки. 2017. Т. 3. № 105. С. 17–19.
8. Маторин Д.Н., Тимофеев Н.П., Глинушкин А.П., Братковская Л.Б., Заядан Б.К. Исследование влияния грибковой инфекции *Bipolaris sorokiniana* на световые реакции фотосинтеза пшеницы с использованием флуоресцентного метода // Вестн. МГУ. Сер. 16: Биология. 2018. Т. 73. № 4. С. 247–253.
9. Opanasenko V.K., Agafonov A.V., Demidova R.N. Effects of heterocyclic and tertiary permeant amines on the electron transfer in thylakoid membranes // Photosynth. Res. 2002. V. 72. P. 242–253.
10. Schmidt G., Graber P. The rate of ATP synthesis by reconstituted CF_0F_1 liposomes // Biochim. Biophys. Acta. 1998. V. 808. С. 46–51.
11. Semenova G.A. Structural reorganization of thylakoid systems in response to heat treatment // Photosynthetica. 2004. V. 42. P. 521–527.
12. Kreslavski V., Tatarinzev N., Shabnova N., Semenova G., Kosobrukhhov A. Characterization of the nature of photosynthetic recovery of wheat seedlings from short-time dark heat exposures and analysis of the mode of acclimation to different light intensities // J. Plant Physiol. 2008. V. 165. P. 1592–1600.
13. Barber J., Andersson B. Too much of a good thing: light can be bad for photosynthesis // Trend. Biochem. Sci. 1992. V. 17. P. 61–66.
14. Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Klimov V.V., Los D.A., Carpentier R., Mohanty P. Heat stress: an overview of molecular responses in photosynthesis // Photosynth. Res. 2008. V. 98 P. 541–550.
15. Татаринцев Н.П., Семенова Г.А., Креславский В.Д. Фотофосфорилирование, структура хлоропластов и аминокислотный состав запасного белка в зерне ячменя и пшеницы под влиянием N,N-дифенилмочевины // Сел.-хоз. биол. 2013. Т. 3. С. 66–71.
16. Кузнецов Вл.В., Шевякова Н.И. Пролин при стрессе: биологическая роль, метаболизм, регуляция // Физиология растений. 1999. № 46. С. 391–336.
17. Caers M., Vendrig I.C. Benzyladenine effects on the development of the photosynthetic apparatus in *Zea mays* // Physiol. Plant. 1986. V. 66. P. 686–691.
18. Спиридонов Ю.Я., Соколов М.С., Глинушкин А.П., Каракотов С.Д., Коришунов А.В., Торопова Е.Ю., Сараев П.В., Семенов А.М., Семенов В.М., Никитин Н.В., Калиниченко В.П., Лысенко Ю.Н. Адаптивно-интегрированная защита растений. М., 2019. 628 с.
19. Торопова Е.Ю., Глинушкин А.П., Селюк М.П., Казакова О.А., Овсянкина А.В. Развитие почвенных инфекций у яровой пшеницы и ячменя под влиянием гидротермических стрессов в условиях лесостепи Западной Сибири и Зауралья // Рос. сел.-хоз. наука. 2018. № 2. С. 25–29.
20. Тулякова М.В., Баталова Г.А., Пермьякова С.В., Градобоева Т.П. Результаты изучения перспективных линий овса конкурсного сортоиспытания в условиях Кировской области // Вестн. Марий. Гос. ун-та. Сер.: Сел.-хоз. науки. Эконом. науки. 2020. Т. 6. № 3 (23). С. 325–333.

21. *Пишбытко Н.Л., Бачище Т.С., Кабашикова Л.Ф.* Влияние повышенной температуры на перенос электронов в хлоропластах ячменя // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. науки. 2020. Т. 65. № 2. С. 153–162.
22. *Агаев Р.А.О., Беспалова Л.А., Агаева Е.В.* Посевные и урожайные свойства семян пшеницы мягкой озимой в зависимости от зоны репродукции // Политемат. сетев. электр. научн. журн. Кубан. ГАУ. 2020. № 157. С. 312–323.

Effect of Diphenylurea on Energy-Storing Reactions of Photosynthesis in Ontogenesis of Rape Plants

**N. P. Tatarintsev^{a,#}, N. S. Zakharchenko^b, A. N. Shmarev^c, V. D. Kreslavsky^c,
D. V. Demin^c, G. A. Semenova^d, and A. P. Glinushkin^a**

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

^bBranch of the Institute of Bioorganic Chemistry of the RAS
prosp. Sciences 6, Moscow region, Pushchino 142290, Russia

^cInstitute of Fundamental Problems of Biology of the RAS
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia

^dInstitute of Theoretical and Experimental Biophysics of the RAS
ul. Institutskaya 3, Moscow region, Pushchino 142290, Russia

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

The effect of N,N-diphenylurea (DPU), which has cytokinin activity, on photosynthesis, photophosphorylation rate, and the structure of chloroplast mesophyll cells in the flowering phase of rape plants was studied. The treatment of rapeseed plants with DPU influenced photosystem 2 (PS-2) and changed the ratio of the rates of cyclic (CPP) and non-cyclic photophosphorylation (NCPP) of preparations of thylakoid membranes isolated from the flag leaf. Through 24 h after the treatment of plants with DPU, the rate of CPP in chloroplasts increased by 25–30%, while the rate of NCPP did not change. The ratio of the rates of the CPP and NCPP was maintained for several days. The treatment of plants with DPU led to an increase in the maximum quantum yield of PS-2 ($F_v : F_m$). The results obtained indicate that the treatment of rapeseed plants with DPU changes the carbohydrate metabolism in chloroplasts, increasing the content of starch grains in the leaves and fat by 20% in the grain of the final product.

Key words: diphenylurea, energy-saving reactions, photosynthesis, plant ontogenesis, rapeseed.

УДК 631.453:632.954:633.853.494“321”

ЗАЩИТА ЯРОВОГО РАПСА ОТ ФИТОТОКСИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ОСТАТКОВ МЕТСУЛЬФУРОН-МЕТИЛА С ПОМОЩЬЮ ЦЕОЛИТОВ¹

© 2022 г. Ю. Я. Спиридонов¹, Н. Д. Чкаников^{2,*}, А. В. Пастухов²,
В. А. Абубикеров¹, М. М. Ильин (мл.)², И. Ю. Спиридонова¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, пос. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

²Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
119991 Москва, ул. Вавилова, 28, Россия

*E-mail: nchkan@ineos.ac.ru

Поступила в редакцию 25.10.2021 г.

После доработки 15.12.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

Предложены методы защиты ярового рапса от остатков метсульфурон-метила в почве с использованием природного цеолита (клиноптилолита) и органо-минерального комплекса природного цеолита с гуминовыми веществами. Эксперименты, проведенные в контролируемых условиях лаборатории искусственного климата (ЛИК), продемонстрировали, что полная защита посевов, а также стимуляция развития растений может быть достигнута при внесении цеолита в загрязненную гербицидом почву с последующей его 6-недельной экспозицией перед посевом. Установлено, что внесение в почву перед посевом комплекса природного цеолита с гуматами в дозах 50 и 100 кг/га приводило не только к полной нейтрализации фитотоксического действия гербицида, которое составляло 32.7%, но и к стимуляции роста растений до 20% по сравнению с контрольными образцами, выросшими на незагрязненной гербицидом почве.

Ключевые слова: сульфонилмочевины, почвы, фитотоксичность, цеолиты, гуматы, детоксикация.

DOI: 10.31857/S0002188122040123

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе был предложен подход к детоксикации почв, загрязненных остатками гербицидов ряда сульфонилмочевин, основанный на предпосевном внесении в почву невысоких доз природного цеолита [1]. При этом показано, что 3-недельная экспозиция природного цеолита марки ЦПС в почве перед посевом позволяет существенно снизить фитотоксическое действие метсульфурон-метила. Было высказано предположение, что в процессе экспозиции постепенно образуются агрегаты с гуминовыми соединениями, которые способствуют детоксикации гербицидов. Исходя из этого, цель работы – исследование детоксикационных свойств цеолита при увеличении времени экспозиции цеолита в почве, а также комплексов цеолита ЦПС с гуматами и изучение их биологического эффекта.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-05043), а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использован природный цеолит марки ЦПС (поставщик компания “Алсис”, Екатеринбург), содержащий клиноптилолит в сырье не менее 65–70%. Органо-минеральные комплексы цеолита с гуматами получали для проверки их способности детоксицировать остатки гербицидов сульфонилмочевинного ряда.

В соответствии с первой методикой получен органо-минеральный комплекс ЦПС-ГУМ-1 в результате обработки природного цеолита ЦПС в кальциевой форме раствором гумата натрия по методике, подобной способу модификации туфа, описанному в работе [2]. При этом для получения цеолита в кальциевой форме 120 г природного цеолита марки ЦПС помещали в коническую колбу вместе с 350 мл 2 М раствора хлорида кальция и перемешивали суспензию в течение 1 ч на горизонтальном шейкере. Затем суспензию выдерживали в течение 30 сут при комнатной температуре, периодически перемешивая содержание колбы. После этого жидкость сливали с осадка и добавляли к нему свежеприготовленный раствор

Таблица 1. Влияние цеолита на развитие тест-растений рапса в присутствии гербицида и без него

Вариант	Цеолит, кг/га	Гербицид, г/га	Масса, г						Изменение массы тест-растений, % к контролю
			повторности					средняя	
			1	2	3	4	5		
Надземная масса									
ЦПС	100	–	17.9	17.6	18.3	17.4	17.8	17.8	+67.9
ЦПС + Зингер, СП	100	0.4	15.9	16.9	16.2	16.1	14.4	15.9	+50.0
ЦПС	250	–	13.5	13.9	16.3	15.6	16.6	15.2	+43.4
ЦПС + Зингер, СП	250	0.4	11.7	10.5	11.5	11.3	11.6	11.3	+6.6
Зингер, СП	–	0.4	8.0	8.0	7.2	7.8	8.1	7.8	–26.4
Контроль (без цеолита и гербицида)	–	–	10.2	10.6	9.3	9.1	13.7	10.6	0.0
<i>HCP</i> ₀₅	1.4								
Масса корней									
ЦПС	100	–	3.7	4.1	4.1	3.9	3.7	3.9	–4.9
ЦПС + Зингер, СП	100	0.4	3.3	4.7	4.7	6.0	4.7	4.7	+14.6
ЦПС	250	–	4.2	5.6	3.5	4.2	3.4	4.2	+2.4
ЦПС + Зингер, СП	250	0.4	4.2	6.7	7.1	5.9	5.7	5.9	+43.9
Зингер, СП	–	0.4	2.6	2.8	3.3	2.1	3.3	2.8	–31.7
Контроль (без цеолита и гербицида)	–	–	4.1	3.9	4.7	3.8	3.8	4.1	0.0
<i>HCP</i> ₀₅	0.9								
Надземная масса + масса корней									
ЦПС	100	–	21.6	21.7	22.4	21.3	21.5	21.7	+48.6
ЦПС + Зингер, СП	100	0.4	19.2	21.6	20.9	22.1	19.1	20.6	+41.1
ЦПС	250	–	17.7	19.5	19.8	19.8	20.0	19.4	+32.9
ЦПС + Зингер, СП	250	0.4	15.9	17.2	18.6	17.2	17.3	17.2	+17.8
Зингер, СП	–	0.4	10.6	10.8	10.5	9.9	11.4	10.6	–27.4
Контроль (без цеолита и гербицида)	–	–	14.3	14.5	14.0	12.9	17.5	14.6	0.0
<i>HCP</i> ₀₅	1.4								

Примечание. Тест-растение – рапс, внесение в почву гербицида – 13 октября 2020 г., внесение в почву цеолита – 14 октября, посев рапса – 25 ноября, учет – 21 декабря.

хлорида кальция (350 мл воды, 150 г CaCl₂). Перемешивали на шейкере в течение 1 ч. Процесс перемешивания повторяли, выдерживая суспензию в течение 3-х сут. После этого сливали жидкость и 3-й раз вводили свежеприготовленный раствор хлорида кальция. На следующий день жидкость сливали и промывали осадок водой – 4 раза по 500 мл. Полученный цеолит в кальциевой форме (ЦПС-Са-1) отделяли от воды на металлической сетке и подсушивали при 38–40°C в течение 3-х сут.

В 1 л деионизированной воды растворяли 1.2 г трис-(гидроксиметил)аминометана (ТРИС), 0.09

г этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА), 0.44 мл уксусной кислоты. В 500 мл этого раствора растворяли 2 г гумата натрия (“Acros Organics”, Humic acid, sodium salt, 45–70%, technical, CAS 68131-04-4), обрабатывая смесь ультразвуком в течение 30 мин и при перемешивании в течение 10 мин. На следующий день в раствор вводили 30 г ЦПС-Са-1. Смесь периодически перемешивали, выдерживая в течение 23 сут. Раствор отделяли от зерен цеолита на металлической сетке. Цеолит промывали на сетке небольшим количеством воды (300 мл) и сушили при

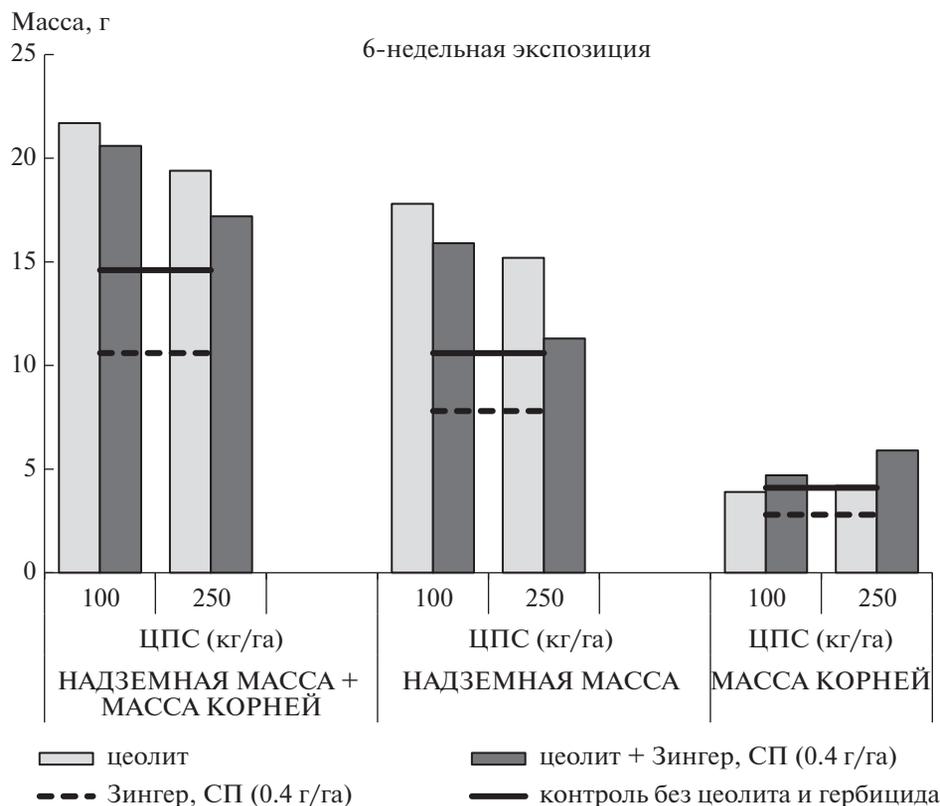


Рис. 1. Диаграмма влияния цеолита на массу растений рапса в присутствии гербицида и без него (после 6-недельной экспозиции перед посевом).

50°C в течение 1 сут. Получали 30 г комплекса ЦПС-ГУМ-1.

Другой образец цеолита (ЦПС-ГУМ-2) получен обработкой природного цеолита ЦПС раствором гумата натрия по методике, подобной способу модификации монтмориллонита, описанному в работе [3]. В двух конических колбах растворяли по 8.5 г нитрата натрия в 1 л деионизированной воды и в растворы вводили по 0.25 г гумата натрия (“Acros Organics”, содержание гуминовой кислоты 45–70%). На следующий день в растворы вводили по 10 г природного цеолита ЦПС, предварительно промытого водой на сетке от мелких частиц. Смесь выдерживали 3 сут, pH растворов 7.6. Удаляли из каждой колбы по 700 мл раствора и перемешивали в течение 6 ч. На следующий день отделяли растворы от зерен цеолита (порции цеолита не сушили), объединяли с оставшимся раствором гумата натрия и, постепенно добавляя микродозами азотную кислоту (всего 0.07 мл), доводили pH раствора до 6.4. Отбирали по 400 мл этого раствора и переносили в колбы с порциями цеолита. Суспензии перемешивали 18 ч, а затем порции цеолита отделяли от раствора, споласкивали водой порциями по 50 мл

и сушили при 50°C в течение 1 сут. Получали 20 г комплекса цеолит–гумат (ЦПС-ГУМ-2).

Биологические испытания проводили на растениях ярового рапса сорта Ратник в условиях лаборатории искусственного климата (ЛИК) фирмы “Фетч” (ФРГ) во Всероссийском научно-исследовательском институте фитопатологии (ВНИИФ). В качестве источника метсульфурон-метила использовали коммерческий гербицид Зингер, СП (Щелково Агрохим), который содержит 600 мг метсульфурон-метила/г д.в. Выращивание тест-растений осуществляли в контролируемых условиях ЛИК: влажность воздуха в камере 70%, длительность дня – 16 ч, ночи – 8 ч, освещенность днем – 20 тыс. лк, температура воздуха днем – 25°C, ночью – 16°C; влажность почвы поддерживали на уровне 60% ПВ путем ежедневного полива каждого вегетационного сосуда водопроводной обессоленной водой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изученная нами ранее [1] способность природного цеолита ЦПС частично снимать фитотоксическое действие метсульфурон-метила на

Таблица 2. Сравнительный уровень токсичности препаратов для тест-растений рапса

Марка цеолита	Цеолит, кг/га	Зингер, СП г/га	Масса, г					средняя	Изменение надземной массы тест-растений, % к контролю
			повторности						
			1	2	3	4	5		
ЦПС	50	–	4.0	5.6	3.8	3.7	4.8	4.4	–10.2
		0.4	5.8	4.9	4.7	4.5	4.6	4.9	0.0
	100	–	4.5	4.3	3.9	4.3	4.3	4.3	–12.2
		0.4	5.4	4.3	4.4	2.5	4.7	4.3	–12.2
ЦПС-ГУМ-1	50	–	3.6	3.5	3.6	5.3	3.0	3.8	–22.4
		0.4	2.2	4.5	2.2	4.2	4.1	3.4	–30.6
	100	–	3.1	4.0	4.3	4.5	3.7	3.9	–20.4
		0.4	6.4	5.2	3.6	3.9	3.6	4.5	–8.2
ЦПС-ГУМ-2	50	–	5.1	6.3	4.4	5.4	4.7	5.2	+6.1
		0.4	6.2	6.4	6.2	5.7	3.9	5.7	+16.3
	100	–	5.7	5.8	5.7	5.9	5.4	5.7	+16.3
		0.4	5.0	6.0	4.9	5.9	7.6	5.9	+20.4
Контроль (Зингер, СП)	–	0.4	2.7	3.3	4.3	3.7	2.3	3.3	–32.7
Контроль без цеолита и гербицида	–	–	4.9	4.1	4.5	5.8	5.2	4.9	0.0
<i>HCP</i> ₀₅			1.1						

Примечание. Тест-растение – рапс, внесение в почву гербицида – 9 июня 2021 г., внесение в почву цеолита – 11 июня, посев рапса – 11 июня, учет – 9 июля.

растения ярового рапса при внесении ЦПС в загрязненную почву за 3 нед до посева стимулировала наш интерес к увеличению времени его экспозиции перед посевом. В настоящей работе увеличили экспозицию ЦПС до 6 нед. При этом в соответствии с традиционной методикой дерново-подзолистую почву обрабатывали гербицидом Зингер, СП в дозе 0.4 г/га с помощью лабораторного опрыскивателя. Затем через 1 сут в обработанную гербицидом почву вносили цеолит. Через 6 нед после внесения цеолита почву распределяли в вазоны емкостью 3 кг и проводили посев тест-растений рапса. Повторность опыта пятикратная. Через 26 сут надземную массу и массу корней тест-растений взвешивали. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Показано, что 6-недельная предпосевная экспозиция почвы с цеолитом приводила не только к полной нейтрализации фитотоксического действия гербицида, которое составляло 26.4% (надземная часть растений) и 31.7% (масса корней) угнетения, но и к мощной стимуляции роста растений рапса по сравнению с контролем (без гербицида и цеолита), выраженная в увеличении массы их надземной части от 6.6 (доза цеолита

250 кг/га) до 50.0% (доза цеолита 100 кг/га) и массы корней от 14.6 (доза цеолита 100 кг/га) до 43.9% (доза цеолита 250 кг/га).

Для наглядности на рис. 1 представлена диаграмма влияния цеолита в почве на массу растений рапса в присутствии гербицида и без него. Диаграмма показала, что 6-недельная экспозиция почвы с цеолитом в дозах 100 и 250 кг/га позволила полностью преодолеть угнетающее действие гербицида на надземную часть и корневую систему растений. При этом более эффективной была доза цеолита 100 кг/га, при которой происходило увеличение массы надземной части растений примерно в 2 раза. Более того, в случае растений, которые были выращены на чистой (не загрязненной гербицидами) почве, предпосевная экспозиция почвы с цеолитом приводила к увеличению надземной части растений на 67.9% (доза 100 кг/га) и на 43.4% (доза 250 кг/га), т.е. отмечено мощное ростстимулирующее действие.

Таким образом, 6-недельная предпосевная экспозиция цеолита перед посевом была эффективным способом нейтрализации токсического действия остатков широко применяемых гербицидов сульфонилмочевинного ряда в почвах, ко-

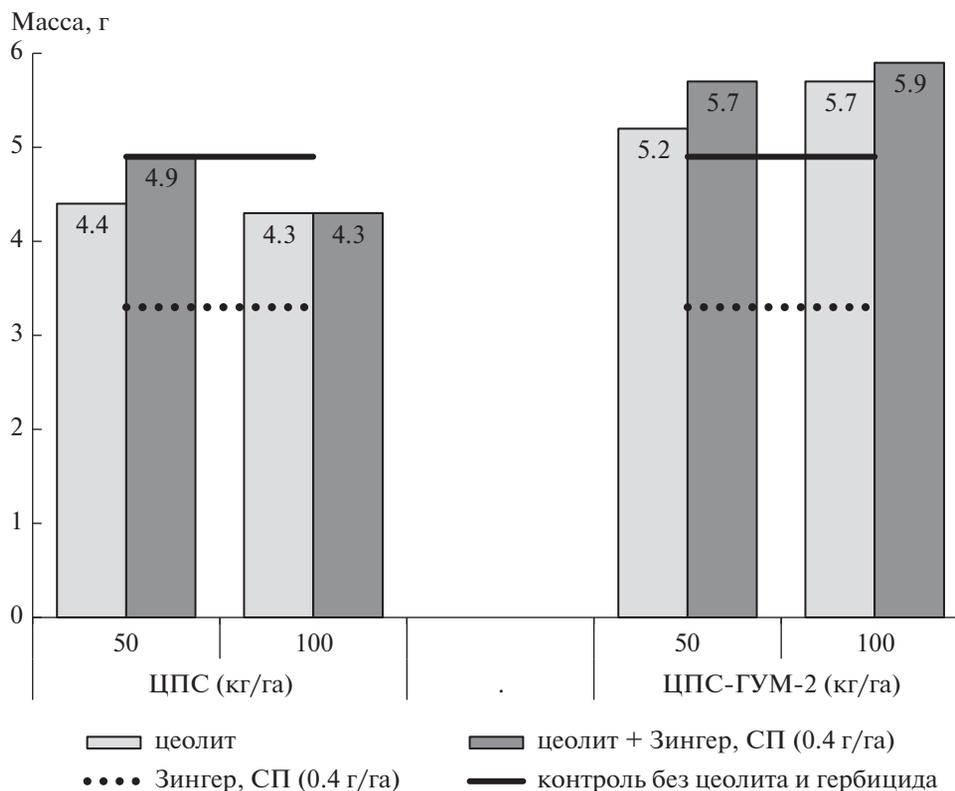


Рис. 2. Диаграмма влияния препаратов ЦПС-ГУМ-2 и ЦПС на массу растений рапса в присутствии гербицида и без него.

торая сочеталась со значительной стимуляцией роста и развития культурных растений. Эффективное использование цеолитов в чрезвычайно низких дозах (100 кг/га) создает реальную перспективу применения представленного метода детоксикации почв в сельском хозяйстве.

Оценку способности полученных агрегатов цеолита с гуминовой кислотой ЦПС-ГУМ-1 и ЦПС-ГУМ-2 детоксицировать остатки сульфонилмочевин в почве в сравнении с исходным цеолитом ЦПС осуществляли на яровом рапсе в лаборатории искусственного климата (ЛИК). Дерново-подзолистую почву обрабатывали с помощью лабораторного опрыскивателя гербицидом Зингер, СП (содержит в качестве действующего вещества 60% метсульфурон-метила) в дозе 0.4 г/га. Затем через одни сутки в обработанную гербицидом почву вносили комплексные соединения ЦПС-ГУМ-1, ЦПС-ГУМ-2 в дозах 50 или 100 кг/га, или исходный цеолит в тех же дозах. В качестве контроля использовали чистую почву или почву с внесенным в нее гербицидом (табл. 2). Почву распределяли в вазоны вместимостью 600 г и проводили посев тест-растений рапса. Повторность опыта пятикратная.

Учет проводили взвешиванием надземной части тест-растений через 28 сут после посева. Оказалось, что образец ЦПС-ГУМ-2 существенно превосходил по своей детоксицирующей активности образец ЦПС-ГУМ-1. Показано, что внесение в почву перед посевом органо-минерального комплекса ЦПС-ГУМ-2 в дозах 50 и 100 кг/га приводило не только к полной нейтрализации фитотоксического действия гербицида, которое составило 32.7%, но и к стимуляции роста растений (до 20% по массе по сравнению с безгербицидным контролем). Исходный цеолит ЦПС способен несколько снижать фитотоксическое действие гербицида, при этом обладая некоторой собственной фитотоксичностью. Суммарный эффект внесения ЦПС перед посевом в загрязненную гербицидом почву значительно уступал эффекту комплекса ЦПС-ГУМ-2.

Для наглядности на рис. 2 представлена диаграмма влияния цеолита в почве на массу растений рапса в присутствии гербицида и без него. Представленная диаграмма показала мощный эффект ЦПС-ГУМ-2 и его преимущество перед исходным цеолитом ЦПС. Низкие эффективные дозы органо-минерального комплекса ЦПС-ГУМ-2 создают реальные перспективы его практическо-

го применения. Существенным преимуществом ЦПС-ГУМ-2 перед другими препаратами, например, активированным углем, является то, что в его состав входят только естественные компоненты почвы. Это обеспечивает абсолютную экологическую безопасность его применения, а также дешевизну и неограниченность сырьевой базы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен эффективный метод защиты ярового рапса от остатков метсульфурон-метила в почве с использованием природного цеолита марки ЦПС и органо-минерального комплекса на основе природного цеолита и гуминовых соединений. Дальнейшие исследования должны расширить границы применения этих методов и создать убедительную картину физико-химических процессов, лежащих в основе обнаруженных защитных эффектов. Данные, полученные в этой

работе, как минимум, не противоречат первоначально высказанному предположению о ведущей роли образования комплексов цеолитов с гуминовыми веществами, т.е. процессов, лежащих в основе почвообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов Ю.Я., Чкаников Н.Д., Пастухов А.В., Ильин М.М. (мл.). Влияние цеолитов на развитие ярового рапса в присутствии остатков метсульфурон-метила // *Агрохимия*. 2021. № 10. С. 81–88.
2. Capasso S., Coppola E., Iovino P., Salvestrini S., Colella C. Uptake of phenylurea herbicides by humic acid-zeolitic tuff aggregate // *The 40 Anniversary of International Zeolite Conference*. Elsevier B.V. 2007. P. 2122–2127.
3. Каримова В.Т., Дмитриева Е.Д., Сюдюкова К.В. Сорбция гуминовых веществ черноольхового низинного торфа на монтмориллонитсодержащих глинах // *Агрохимия*. 2020. № 1. С. 9–17.

Protection of Spring Rapeseed from the Phytotoxic Effect of Metsulfuron-Methyl Residues Using Zeolites

Yu. Ya. Spiridonov^a, N. D. Chkanikov^{b,#}, A.V. Pastukhov^b, V. A. Abubikerov^a,
M. M. Ilyin (jr.)^b, and I. Yu. Spiridonova^a

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

^bA.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the RAS
ul. Vavilova 18, Moscow 119991, Russia

[#]E-mail: nchkan@ineos.ac.ru

Methods of protection of spring rapeseed from metsulfuron-methyl residues in the soil using natural zeolite (clinoptilolite) and organo-mineral complex of natural zeolite with humic substances are proposed. Experiments conducted under controlled conditions of the Artificial Climate Laboratory (ACL) have demonstrated that complete protection of crops, as well as stimulation of plant development can be achieved by introducing zeolite into herbicide-contaminated soil followed by its 6-week exposure before sowing. It was found that the introduction of a complex of natural zeolite with humates in doses of 50 and 100 kg/ha into the soil before sowing led not only to the complete neutralization of the phytotoxic effect of the herbicide, which was 32.7%, but also to the stimulation of plant growth up to 20% compared with control samples grown on soil uncontaminated with herbicide.

Key words: sulfonylureas, soils, phytotoxicity, zeolites, humates, detoxification.

УДК 632.954

АНТИДОТЫ ГЕРБИЦИДОВ НА ОСНОВЕ СИДНОНИМИНА¹**© 2022 г. И. А. Черепанов¹, Ю. Я. Спиридонов², В. А. Абубикеров²,
И. Ю. Спиридонова², Н. В. Калганова¹, Д. А. Лапшин³, С. К. Моисеев^{1,*}**¹ *Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
119991 Москва, ул. Вавилова, 28, Россия*² *Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р. п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия*³ *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
125047 Москва, Миусская пл., 9, Россия***E-mail: skm@ineos.ac.ru*

Поступила в редакцию 17.11.2021 г.

После доработки 07.12.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

Впервые показано, что производные сиднонимина – мезоионного гетероциклического соединения – способны проявлять свойства антидотов гербицидов. В вегетационных опытах установлено, что *N*(3)-замещенные 4-(арилгидроксиметил)сиднонимины в виде гидрохлоридов или *N*₆-трет-бутоксикарбонильных, либо *N*₆-тозилатных производных при использовании для предпосевной обработки семян кукурузы в дозах 0.25–1.0 г/т семян стимулировали рост растений, а также были способны снижать или полностью устранять гербицидный эффект метсульфурон-метила, присутствующего в почве в дозе 2 г/га.

Ключевые слова: сиднонимины, гербициды, антидоты гербицидов, кукуруза, сульфонилмочевины, метсульфурон-метил.

DOI: 10.31857/S0002188122040056**ВВЕДЕНИЕ**

Современное эффективное сельскохозяйственное производство невозможно без использования пестицидов. Однако их широкое применение оказывает нарастающее антропогенное воздействие на окружающую среду. Поэтому важное значение имеет поиск новых, экологически более безопасных средств защиты растений, в том числе эффективных в очень малых дозах.

В России лидирующее место среди агрохимикатов занимают гербициды. Однако известно, что при длительном использовании прибавка урожая, обусловленная их применением, сильно снижается из-за накопления в почве остатков гербицидов, которые оказывают негативное воздействие на культурные растения [1]. Для повышения эффективности и безопасности применения гербицидов в сочетании с ними используют антидоты, которые являются индукторами устойчивости растений к действию фитотоксикантов. Антидоты гербици-

дов повышают селективность действия гербицидов в отношении сорняков и снижают их негативное воздействие на культурные растения, а также снижают или полностью устраняют отрицательный эффект от остатков гербицидов при возделывании сельскохозяйственных культур на почвах, содержащих такие остатки после выращивания предшествующих культур [2, 3]. Остатки гербицидов в почве могут вызывать снижение урожайности культурных растений до 35%. Поэтому применение антидотов позволяет расширить выбор культур, пригодных для использования в севооборотах.

Особенно опасны в отношении негативного воздействия на сельскохозяйственные культуры гербициды класса сульфонилмочевин, которые получили очень широкое распространение в сельском хозяйстве. Они способны оказывать свой эффект в малых дозах и медленно подвергаются биодegradации. Снижение или полное устранение отрицательного эффекта сульфонилмочевин на культурные растения привело бы к значительному снижению сельскохозяйственных потерь, вызываемых этим фактором.

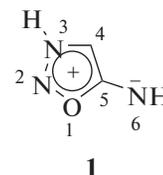
¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-03-00972).

К настоящему времени выявлено большое число антидотов, которые снижают фитотоксичность гербицидов в отношении важнейших видов культурных растений. Вещества, проявляющие антидотные свойства, принадлежат к различным классам химических соединений, основными из которых являются амиды галогенкарбоновых кислот (в первую очередь дихлоруксусной кислоты) и среди них – диаллиламид дихлоруксусной кислоты (дихлормид), производные карбоновых кислот и других карбонильных соединений (в том числе, мочевины), нафталевый ангидрид и его производные, производные гидросиламина и сульфокислот [2–6]. Антидотный эффект проявляют также представители других классов химических соединений [2] и продукты, извлекаемые из растительного сырья [7].

Однако наибольшее число антидотов относится к гетероциклическим соединениям, в том числе содержащим несколько различных гетероатомов. Тем не менее, имеется потребность в разработке новых антидотов против наиболее распространенных гербицидов [4].

Недавно нами было показано, что сиднонимин – производные мезоионного гетероциклического соединения **1** – при использовании для предпосевной обработки семян в очень малых дозах (0.25–10.0 г/т семян) способны проявлять свойства регуляторов роста растений [8–10]. Оче-

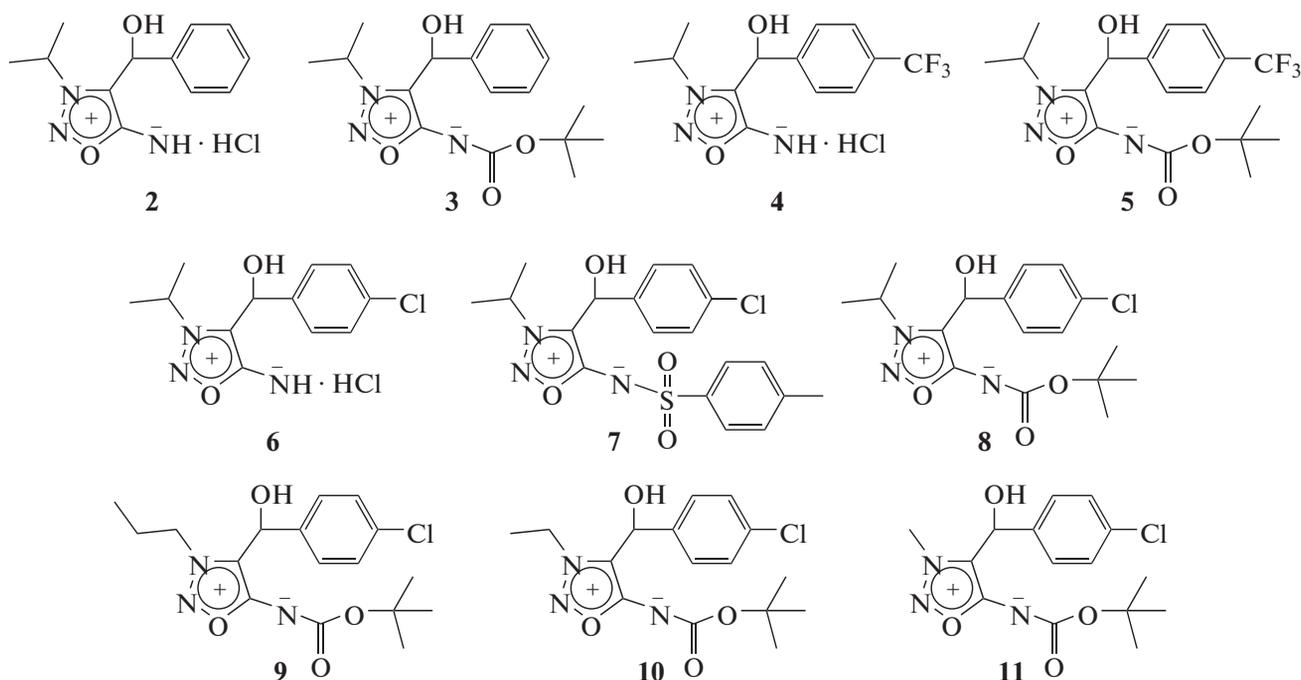
видно, это связано со способностью сиднонимин-ов генерировать в процессе метаболизма оксид азота (II) (NO) и супероксид-анион (O_2^-), которые являются сигнальными молекулами во многих клеточных процессах в живых организмах [11–14], в том числе влияющих на рост растений [14].



В этой связи целью работы была проверка возможности проявления сиднониминами антидотных свойств, которые ранее для мезоионных гетероциклических соединений известны не были. Конкретно, в работе исследовали способность сиднонимин-ов функционировать в качестве индукторов устойчивости растений к действию фитотоксикантов на примере метсульфурон-метила, одного из важнейших представителей гербицидов класса сульфонилмочевин.

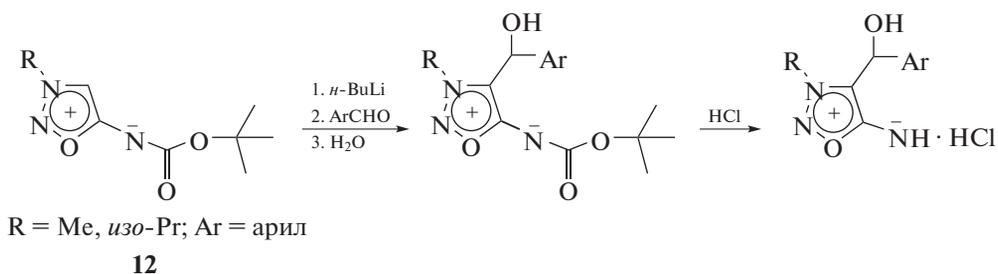
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали 4-арилгидрокси метильные производные сиднонимина **2–11**.



N_6 -*tert*-Бутоксикарбонилзамещенные (Вос-замещенные) соединения **3**, **5**, **8–11** и соли (гидрохлориды) N_6 -незамещенных про-

изводных (**2**, **4**, **6**) были получены в соответствии со схемой по методикам, описанным в работе [10].



Использованные для этого в качестве исходных соединений C(4)-незамещенные N_6 -Вос-производные сиднониминов (**12**) получали по методу, описанному в работе [15]. Замещенное по положению C(4) N_6 -тозилное производное **7** было синтезировано аналогично N_6 -Вос-производному **8** из соответствующего C(4)-незамещенного N_6 -тозилата [10].

Вегетационные эксперименты по изучению влияния соединений **2–11** на рост растений проводили с использованием в качестве тест-растения кукурузы сорта Краснодарский 291 АМВ. Сиднониминны **2–11** применяли для предпосевной обработки семян.

Для испытаний каждого вещества в 3-х дозах 0.25, 0.5 и 1.0 г/г семян взвешивали по 30 г семян кукурузы и помещали их в круглодонные колбы объемом 100 мл. Далее готовили растворы для выбранных доз испытуемого вещества. Для этого брали навеску 10 мг испытуемого соединения, помещали в пробирку и добавляли 10 мл дистиллированной воды или 75% этанола или диметилсульфоксида. К аликвотам полученного раствора добавляли воду для получения разбавленных растворов, соответствующих дозам 0.25, 0.5 и 1.0 г/г семян. Разбавленные растворы испытанных веществ вносили в колбы с семенами. Для смачивания 30 г семян кукурузы использовали по 2 мл соответствующего раствора. Для контрольного варианта с не обработанными семенами (водный контроль, $K_{\text{водн}}$) 30 г семян кукурузы смачивали 2 мл дистиллированной воды. Содержимое колб встряхивали вручную до полного поглощения жидкости семенами в течение 15–20 мин. После этого обработанные таким образом семена высыпали в чашки Петри и оставляли на 3 сут при комнатной температуре в открытом виде. Через 3 сут для проведения вегетационных опытов по определению рострегулирующей активности обработанные семена высевали в дерново-подзолистую почву, помещенную в парафинированные бумажные стаканы вместимостью 600 г, по 5 шт./сосуд. Повторность опыта пятикратная.

Для проведения вегетационных опытов на антитоксичную активность дерново-подзолистую почву предварительно подготавливали, обрабатывая ее с помощью лабораторного опрыскивателя гербицидом метсульфурон-метил (Зингер, СП) в дозе 2 г/га. Через 1 сут обработанную гербицидом почву распределяли в парафинированные бумажные стаканы вместимостью 600 г и проводили посев семян кукурузы по 5 шт./сосуд. Повторность опыта пятикратная. Для гербицидного контроля ($K_{\text{герб}}$) в обработанную гербицидом почву высевали семена кукурузы, не обработанные испытуемыми веществами.

Выращивание тест-растений осуществляли в контролируемых условиях лаборатории искусственного климата (ЛИК): влажность воздуха в камере 70%, длительность дня 16 ч, ночи – 8 ч, освещенность днем 20 000 лк, температура воздуха днем 25°C, ночью 16°C, влажность почвы поддерживали на уровне 60% ПВ путем ежедневного полива по массе каждого вегетационного сосуда водопроводной обессоленной водой. Через 18–21 сут надземную массу тест-растений срезали и взвешивали.

Для корректного сравнения результатов опытов по определению рострегулирующей и антитоксичной активности сиднониминнов охватывали одновременно все описанные выше варианты и их проводили одновременно в одной и той же камере ЛИК. Таким образом, схема эксперимента позволяла в ходе одного опыта получать данные как о рострегулирующей, так и об антитоксичной активности испытанных соединений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе были исследованы производные сиднонимина **2–11**, замещенные по положению $N(3)$ алкильной группой. В положении C(4) испытуемые соединения содержали арил-гидроксиметильный заместитель. Соединения **3, 5, 8–11** содержали в положении N_6 Вос-заместитель, а соединение **7** – тозилную группу, в то время как остальные сиднониминны (**2, 4, 6**) представляли собой незамещенные по N_6 -положению

соли (гидрохлориды). Как сообщалось нами ранее, сиднониминны именно с таким типом замещения показали себя стимуляторами роста кукурузы [10]. В частности, стимуляторами роста показали себя соединения **2–5** в дозах 0.25–5.0 г/т семян. Это свидетельствовало о том, что соединения указанного структурного типа способны стимулировать в растении процессы, ответственные за его развитие и рост. Данное обстоятельство побудило проверить, не способны ли такие соединения благоприятно влиять на организм растения в условиях гербицидного стресса, т.е., не могут ли они являться индукторами устойчивости растений к действию фитотоксикантов (антидотами гербицидов).

Кроме того, выбор для исследования соединений **2–11** обусловлен тем, что такой набор производных способен дать определенную информацию о взаимосвязи между молекулярной структурой соединений и их биологической активностью. С одной стороны, соли сиднониминнов хорошо растворимы в воде, в то время как N_6 -замещенные производные более липофильны. Это может привести к существенному изменению характера распределения веществ в растении и, соответственно, повлиять на активность соединений. С другой стороны, можно ожидать, что липофильная Вос-группа, влияя на транспорт соединения в организме растения, способна, благодаря своим химическим свойствам, легко удаляться из молекулы в процессе метаболизма, генерируя N_6 -незамещенное производное. Тозилатный же заместитель должен менее активно, чем Вос-группа, участвовать в метаболизме. Сравнение свойств соединений **8–11** может дать информацию о влиянии природы алкильной группы в положении $N(3)$ молекулы на активность соединений.

Показано (табл. 1), что соль сиднонимина **2**, в которой арильный заместитель представляет собой незамещенную фенильную группу, во всех использованных дозах являлась стимулятором роста кукурузы, причем эффект имел дозозависимый характер и достигал 64%. Соответствующее N_6 -Вос-производное **3** также проявляло свойства стимулятора роста, однако его эффект не был зависим от дозы и менее выражен ($\approx 40\%$). В экспериментах на антидотную активность оба соединения **2** и **3** полностью устраняли гербицидный эффект метсульфурон-метила в дозе 2 г/га ($K_{герб}$), снижавший рост кукурузы на 28%. Этот результат не может быть объяснен простой компенсацией гербицидного эффекта метсульфурон-метила ростстимулирующим действием соединений **2** и **3**, поскольку оба соединения в дозах 0.5 и 1.0 г/т семян снижали эф-

фект гербицида до абсолютно одинакового уровня, несмотря на существенное различие в величине ростстимулирующего действия, которое они показали в этих дозах.

Сиднониминны **4** и **5**, структурно родственные соединениям **2** и **3** и отличающиеся от них только наличием трифторометильной группы в арильном заместителе, также показали себя дозозависимыми стимуляторами роста кукурузы. Причем, если соль **4** наиболее эффективно стимулировала рост в минимальной дозе 0.25 г/т семян (60%), то в случае N_6 -Вос-производного **5** стимулирующий эффект был наиболее выражен (49%) в максимальной дозе. В присутствии гербицида оба соединения в дозах 0.5 и 1.0 г/т семян снижали его негативное влияние на рост кукурузы, а соединение **5** в дозе 0.5 г/т семян даже стимулировало рост растений. Интересно, что при этом оба соединения наиболее благоприятно влияли на рост кукурузы в тех дозах, в которых их ростстимулирующий эффект был наименее выражен. Более того, соединение **4** в дозе 0.25 г/т семян, в которой его ростстимулирующее действие было максимальным, в присутствии гербицида не оказало вообще никакого влияния на эффект последнего, а антидотный эффект сиднонимина **5** в дозе 0.5 г/т семян оказался настолько велик (стимуляция роста в присутствии гербицида на 19%), что превзошел его ростстимулирующий эффект в этой дозе в отсутствие гербицида (15%).

Влияние молекулярного строения производных сиднонимина на их рострегулирующие свойства было исследовано на 4-хлорофенилзамещенных соединениях **6–11** (табл. 2). Гидрохлорид **6** не стимулировал рост кукурузы. Более того, в дозе 0.5 г/т семян он проявил заметный гербицидный эффект, снижая рост тест-растений на 19%. Однако в присутствии метсульфурон-метила, гербицидный эффект которого в дозе 2.0 г/га ($K_{герб}$) составлял в данном эксперименте 25%, соединение **6** показало дозозависимый антидотный эффект, который был наиболее выражен (полное устранение эффекта гербицида и стимуляция роста кукурузы на 14%) именно в дозе 0.5 г/т семян, в которой соединение **6** в отсутствие гербицида само действовало как гербицид.

N_6 -Тозильное производное **7** показало себя дозозависимым стимулятором роста кукурузы. Максимальный стимулирующий эффект (44%) это соединение проявило в дозе 1.0 г/т семян. Однако в присутствии метсульфурон-метила сиднонимин **7** в дозе 1.0 г/т семян сильного влияния на эффект гербицида не оказал. Между тем, в более низких дозах (0.25 и 0.5 г/т семян), в которых со-

Таблица 1. Рострегулирующая и антидотная активность соединений 2–5 на тест-растениях кукурузы сорта Краснодарский 291 АМВ

Вариант		Доза гербицида Зингер, СП	Надземная масса тест-растений, г					Средняя	Снижение массы тест-растений, % к контролю*
соединение	доза, г/т семян	г/га	повторности						
			1	2	3	4	5		
2	0.25	–	5.6	6.2	5.3	6.0	5.7	5.8	–23
	0.5	–	7.4	7.4	8.0	7.2	6.8	7.4	–57
	1.0	–	7.3	7.6	8.0	7.2	8.2	7.7	–64
	0.25	2.0	4.4	3.6	4.3	4.3	4.8	4.3	9
	0.5	2.0	4.5	5.3	4.5	4.4	4.7	4.7	0
	1.0	2.0	4.4	5.7	5.0	4.4	5.1	4.9	–4
3	0.25	–	6.9	6.3	6.6	6.5	6.5	6.6	–40
	0.5	–	6.0	6.5	5.9	6.2	8.0	6.5	–38
	1.0	–	6.4	6.0	6.3	7.0	6.2	6.4	–36
	0.25	2.0	5.0	4.8	4.4	4.9	4.8	4.8	–2
	0.5	2.0	4.6	5.0	4.7	4.3	5.0	4.7	0
	1.0	2.0	4.2	5.3	5.0	5.2	4.9	4.9	–4
4	0.25	–	7.7	7.8	8.1	6.9	7.1	7.5	–60
	0.5	–	7.1	6.2	6.5	5.1	6.1	6.2	–32
	1.0	–	5.4	5.0	6.1	5.4	5.2	5.4	–15
	0.25	2.0	3.7	3.5	3.1	3.4	3.4	3.4	28
	0.5	2.0	5.3	3.8	3.9	3.8	3.5	4.1	13
	1.0	2.0	3.8	4.7	3.8	3.8	4.2	4.1	13
5	0.25	–	6.1	5.9	5.9	5.7	5.7	5.9	–26
	0.5	–	5.4	4.9	5.3	5.3	5.9	5.4	–15
	1.0	–	7.3	6.5	7.0	7.8	6.5	7.0	–49
	0.25	2.0	3.7	4.1	3.8	3.8	3.7	3.8	19
	0.5	2.0	6.4	5.2	5.5	5.3	5.6	5.6	–19
	1.0	2.0	3.9	4.1	5.2	3.9	4.3	4.3	9
Контроль $K_{герб}$		2.0	3.4	3.1	3.4	3.5	3.5	3.4	28
Контроль $K_{водн}$		–	4.7	4.7	4.2	5.0	4.7	4.7	0
HCP_{05}								0.17	

*Отрицательные показатели – стимуляция роста растений. То же в табл. 2.

единение 7 в отсутствие гербицида показывало наименьшую стимуляцию роста тест-растений, оно полностью устраняло негативное действие метсульфурон-метила.

N_6 -Вос-замещенный сиднонимин 8, содержащий в положении $N(3)$ изопропильную группу, в дозе 0.25 г/т семян стимулировал рост кукурузы. Однако в дозе 0.5 г/т семян он на рост растений уже не влиял, а в дозе 1.0 г/т семян показал ярко выраженные гербицидные свойства, снижая рост кукурузы на 75%. В отличие от своего структурного N_6 -тозилъного аналога 7, антидотными свой-

ствами соединение 8, по-видимому, не обладало, а некоторое снижение гербицидного эффекта метсульфурон-метила в присутствии 8 в дозе 0.25 г/т семян, очевидно, объясняется вкладом ростстимулирующего эффекта соединения 8, проявляемого именно в этой дозе.

Замена изопропильного заместителя в положении $N(3)$ молекулы 8 на пропильную группу приводит к сиднонимину 9, который, как показали эксперименты, в исследованных дозах не оказывал статистически достоверного влияния на рост кукурузы. Некоторое снижение гербицидно-

Таблица 2. Рострегулирующая и антидотная активность соединений **6–11** на тест-растениях кукурузы сорта Краснодарский 291 АМВ

Вариант		Доза гербицида Зингер, СП г/га	Надземная масса тест-растений, г					Сред- няя	Снижение массы тест-растений, % к контролю*
соединение	доза, г/т семян		по повторностям						
			1	2	3	4	5		
6	0.25	—	3.7	3.4	3.5	3.9	3.8	3.7	–3
	0.5	—	3.2	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	19
	1.0	—	3.8	3.7	3.9	4.2	4.1	3.9	–8
	0.25	2.0	3.3	3.5	3.1	3.3	3.1	3.3	8
	0.5	2.0	4.1	4.0	4.0	4.3	4.0	4.1	–14
	1.0	2.0	2.8	3.1	3.6	2.9	3.0	3.1	14
7	0.25	—	3.8	4.2	4.0	4.3	4.8	4.2	–17
	0.5	—	5.0	3.3	4.3	4.1	3.4	4.0	–11
	1.0	—	5.8	5.2	4.8	5.3	4.8	5.2	–44
	0.25	2.0	4.5	4.0	3.2	3.7	2.9	3.7	–3
	0.5	2.0	3.2	3.6	3.4	3.1	3.7	3.4	6
	1.0	2.0	3.1	2.5	2.6	3.4	2.9	2.9	19
8	0.25	—	4.1	5.4	3.6	4.5	4.7	4.5	–25
	0.5	—	3.1	3.9	3.8	4.0	2.9	3.5	3
	1.0	—	1.2	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	75
	0.25	2.0	3.0	3.3	3.1	3.1	3.1	3.1	14
	0.5	2.0	2.4	3.1	2.4	2.0	2.2	2.4	33
	1.0	2.0	1.2	1.2	1.1	1.3	1.2	1.2	67
9	0.25	—	3.0	3.6	3.6	3.7	3.9	3.6	0
	0.5	—	3.8	3.9	3.6	4.4	3.8	3.9	–8
	1.0	—	3.6	3.5	3.7	3.6	3.4	3.6	0
	0.25	2.0	3.5	3.0	2.8	2.6	3.1	3.0	17
	0.5	2.0	3.1	3.3	3.3	3.2	2.6	3.1	14
	1.0	2.0	2.4	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	25
10	0.25	—	4.3	4.0	3.6	3.5	3.8	3.8	–6
	0.5	—	4.2	4.6	3.8	4.5	4.0	4.2	–17
	1.0	—	3.5	3.5	3.4	3.3	3.3	3.4	6
	0.25	2.0	2.6	2.8	3.6	3.1	3.2	3.1	14
	0.5	2.0	2.4	2.7	2.3	3.1	2.6	2.6	28
	1.0	2.0	2.0	2.3	2.5	2.4	2.3	2.3	36
11	0.25	—	4.5	4.0	3.3	4.1	4.5	4.1	–14
	0.5	—	3.8	3.4	3.3	3.7	3.5	3.5	3
	1.0	—	3.1	3.6	3.1	3.4	3.7	3.4	6
	0.25	2.0	3.2	3.7	3.2	2.9	2.8	3.2	11
	0.5	2.0	2.9	2.7	3.2	2.3	2.5	2.7	25
	1.0	2.0	3.3	4.0	4.3	3.6	4.7	4.0	–11
Контроль К _{герб.}		2.0	3.1	3.4	2.4	2.0	2.7	2.7	25
Контроль К _{водн.}		—	4.0	3.9	3.2	3.3	3.6	3.6	0
HCP ₀₅								0.21	

го эффекта метсульфурон-метила в присутствии соединения **9** в дозах 0.25 и 0.5 г/т семян можно объяснить наличием у этого соединения слабо выраженных антидотных свойств. Соединение **10**, 3-этилзамещенный аналог сиднониминов **8** и **9**, антидотными свойствами, очевидно, не обладал, в отличие от 3-метилзамещенного производного **11**, которое в дозе 1.0 г/т семян не только полностью устраняло гербицидный эффект метсульфурон-метила, но даже приводило к некоторой стимуляции роста кукурузы, хотя в отсутствие гербицида ростстимулирующих свойств не проявляло. Совершенно аналогичное влияние длины алкильной цепи в положении *N*(3) сиднониминов, не имеющих заместителя в положении *C*(4), на их рострегулирующие свойства наблюдали ранее [9].

Таким образом, с точки зрения взаимосвязи “структура–активность”, на рострегулирующие свойства сиднониминов влияли заместители в положениях *N*₆ и *N*(3) этих мезоионных соединений, а также заместитель в *para*-положении арильной группы, присутствующей во фрагменте, присоединенном к атому *C*(4) мезоионного гетероцикла. Однако прямой взаимосвязи между присутствием в молекуле сиднонимина определенных заместителей и наличием у соединения конкретного вида рострегулирующей активности (ростстимулирующей, гербицидной, антидотной) обнаружено не было. Получены дополнительные свидетельства справедливости выводов более ранней работы авторов [9] о том, что разветвленная алкильная (изопропильная) или метильная группа в положении *N*(3) способствует появлению активности, в то время как соединения с неразветвленными алкильными группами в этом положении не активны.

Выше приведен лишь качественный анализ данных, представленных в табл. 1 и 2, с целью выявления результатов, которые могут указывать на наличие среди исследованных веществ соединений с антидотной активностью. Однако для корректной интерпретации экспериментальных результатов необходимо проанализировать их на количественном уровне, чтобы отличить случаи проявления тестируемыми соединениями истинно антидотной активности от случаев компенсации гербицидного эффекта метсульфурон-метила ростстимулирующими эффектами сиднониминов. Для этого было проведено сопоставление экспериментальных данных рострегулирующего эффекта комбинаций производных сиднонимина с метсульфурон-метилом с соответствующими величинами, ожидаемыми на основании расчета. Величину рострегулирующего эффекта комбина-

ции тестируемого соединения с метсульфурон-метилом можно рассчитать с помощью формулы (1) [16].

$$E = (x \times y) : 100, \quad (1)$$

где *E* – ожидаемый рост в присутствии 2-х активных веществ *X* и *Y* (взятых в использованных в эксперименте дозах), выраженный в процентах от контроля;

x – экспериментальная величина роста в присутствии активного вещества *X* (взятого в соответствующей дозе), выраженное в процентах от контроля;

y – экспериментальная величина роста в присутствии активного вещества *Y* (взятого в соответствующей дозе), выраженное в процентах от контроля.

Величины *x* и *y* могут быть вычислены из экспериментальных величин ингибирования роста, выраженных в процентах от контроля, по формулам (2) и (3):

$$x = 100 - x' \quad (2)$$

$$y = 100 - y', \quad (3)$$

где *x'* – экспериментальная величина ингибирования роста (в процентах от контроля) активным веществом *X* (взятым в соответствующей дозе); *y'* – экспериментальная величина ингибирования роста (в процентах от контроля) активным веществом *Y* (взятым в соответствующей дозе).

Формула (1) предполагает, что 2 активных вещества воздействуют на рост растений независимо друг от друга (не влияют на активность друг друга). Тогда, например, если каждое из веществ, взятых в определенных дозах, снижает рост в 2 раза, то комбинация этих веществ в тех же дозах должна снижать рост в 4 раза. Если же эксперимент показывает отличие реального результата от расчетного, то это свидетельствует о наличии влияния одного вещества на активность другого.

Например, данные табл. 1 показали, что стимуляция роста кукурузы соединением **5** в дозе 0.5 г/т семян составляла 15%, при этом метсульфурон-метил в дозе 2.0 г/га снижал рост на 28%, т.е. величина роста кукурузы от контроля $K_{\text{водн}}$ составляла для этих случаев соответственно $100 + 15 = 115\%$ и $100 - 28 = 72\%$. Тогда расчет по формуле (1) показал, что при независимом друг от друга влиянии обоих активных соединений на рост кукурузы результат одновременного действия соединения **5** и метсульфурон-метила в указанных дозах должен ожидаться на уровне $(115 \times 72) : 100 = 83\%$, т.е. должно наблюдаться ингибирование роста кукурузы на 17% по сравне-

Таблица 3. Эффект комбинации сиднониминов 2–11 и гербицида метсульфурон-метил на рост кукурузы сорта Краснодарский 291 АМВ

Сиднонимин		Доза гербицида, г/га	Рострегулирующий эффект E , % к контролю ($K_{\text{водн}} = 100\%$)		$E_{\text{эсп}} - E_{\text{расч}}$, %
номер	доза, г/т семян		эксперимент, $E_{\text{эсп}}$.	расчет по формуле (1), $E_{\text{расч}}$.	
2	0.25	2.0	91	89	2
	0.5	2.0	100	113	-13
	1.0	2.0	104	118	-14
3	0.25	2.0	102	101	1
	0.5	2.0	100	99	1
	1.0	2.0	104	102	2
4	0.25	2.0	72	115	-43
	0.5	2.0	87	95	-8
	1.0	2.0	87	83	4
5	0.25	2.0	81	91	-10
	0.5	2.0	119	83	36
	1.0	2.0	91	107	-16
6	0.25	2.0	92	77	15
	0.5	2.0	114	61	53
	1.0	2.0	86	81	5
7	0.25	2.0	103	88	15
	0.5	2.0	94	83	11
	1.0	2.0	81	108	-27
8	0.25	2.0	86	94	-8
	0.5	2.0	67	73	-6
	1.0	2.0	33	19	14
9	0.25	2.0	83	75	8
	0.5	2.0	86	81	5
	1.0	2.0	75	75	0
10	0.25	2.0	86	80	6
	0.5	2.0	72	88	-16
	1.0	2.0	64	71	-7
11	0.25	2.0	89	86	3
	0.5	2.0	75	73	2
	1.0	2.0	111	71	40

нию с $K_{\text{водн}}$. Между тем в эксперименте наблюдали стимуляцию роста на 19% (т.е. 119% от $K_{\text{водн}}$). Таким образом, разность между наблюдаемой и ожидаемой величиной рострегулирующего эффекта комбинации сиднонимина 5 и гербицида является весьма значительной и составляет $119 - 83 = 36\%$. Положительная разность указывает на то, что соединение 5 в дозе 0.5 г/т семян подавляло гербицидное действие метсульфурон-

метила, т.е. проявляло выраженный антагонистический эффект.

Напротив, стимуляция роста кукурузы соединением 2 в дозе 1.0 г/т семян составляла 64%, при этом метсульфурон-метил в дозе 2.0 г/га снижал рост на 28%, т.е. прирост кукурузы от контроля $K_{\text{водн}}$ составлял для этих случаев соответственно $100 + 64 = 164\%$ и $100 - 28 = 72\%$. Тогда расчет по формуле (1) показывает, что совместный резуль-

тат одновременного действия соединения **2** и метсульфурон-метила в указанных дозах должен ожидать на уровне $(164 \times 72) : 100 = 118\%$, т.е. должны наблюдать стимуляцию роста кукурузы на 18% по сравнению с $K_{\text{водн}}$. Между тем в эксперименте наблюдали стимуляцию роста только на 4% (т.е. 104% от $K_{\text{водн}}$). Разность между наблюдаемой и ожидаемой величиной рострегулирующего эффекта была существенна и составляла $104 - 118 = -14\%$. Отрицательная разность указывала на то, что в данном случае именно гербицид подавлял ростстимулирующее действие соединения **2** в дозе 1.0 г/т семян, не давая ему проявиться в полной мере, т.е. гербицид антагонизировал стимулятор роста.

В табл. 3 приведены полученные из данных табл. 1 и 2 экспериментальные ($E_{\text{эксп}}$) и рассчитанные ($E_{\text{расч}}$) по формуле (1) величины рострегулирующего эффекта для комбинаций сиднонимин **2–11** и гербицида метсульфурон-метил, а также разность $E_{\text{эксп}} - E_{\text{расч}}$ (в %). Небольшие величины этой разности (независимо от знака) свидетельствовали о том, что производное сиднонимина и гербицид проявляли свои рострегулирующие свойства независимо друг от друга, и общий эффект от комбинации 2-х соединений соответствовал расчетному. Большие разности указывали на антагонизм между сиднонимин и гербицидом, причем если разность была положительной, то сиднонимин являлся антагонистом гербицида, а если разность была отрицательной, то гербицид антагонизировал действию сиднонимина. Однако последнее заключение справедливо лишь в тех случаях, когда испытанное соединение является стимулятором роста; если оба соединения являются гербицидами, то вопрос о том, кто из них оказывал антидотное действие по отношению к другому, остается открытым (примером является комбинация метсульфурон-метила и сиднонимина **8** в дозе 1.0 г/т семян). Данные табл. 3 показали, что среди исследованных в работе сиднонимин **2–11** соединения **5–7** и **11** при использовании в соответствующих дозах обладали свойствами антагонистов метсульфурон-метила.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, *N*(3)-алкилзамещенные 4-(арилгидроксиметил)сиднонимины при использовании для предпосевной обработки семян кукурузы в дозах 0.25–1.0 г/т семян стимулировали рост надземной части растений (до 64%). Впервые показано, что некоторые производные сиднонимина в указанных дозах проявляли свойства

антидотов гербицидов, снижая или полностью устраняя гербицидный эффект метсульфурон-метила, присутствующего в почве в дозе 2.0 г/га. Оба эффекта имели дозозависимый характер. Изучение взаимосвязи “структура–активность” показало, что на ростстимулирующий и антидотный эффекты оказывали влияние строение алкильного заместителя в положении *N*(3), характер заместителя в положении *N*₆ и заместитель в *para*-положении арильного заместителя спиртового фрагмента при *C*(4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов Ю.Я. Последствие сульфонилмочевинных гербицидов в почвах РФ // Вестн. защиты раст. 2009. № 3. С. 10–19.
2. Спиридонов Ю.Я., Хохлов П.С., Шестаков В.Г. Антидоты гербицидов // Агрохимия. 2009. № 5. С. 81–91.
3. Davies J. Herbicide safeners – commercial products and tools for agrochemical research // Pestic. Outlook. 2001. V. 12. № 1. P. 10–15.
4. Abu-Qare A.W., Duncan H.J. Herbicide safeners: uses, limitations, metabolism, and mechanisms of action // Chemosphere. 2002. V. 48. № 9. P. 965–974.
5. Sivey J.D., Lehmler H.-J., Salice C.J., Ricko A.N., Cwiler D.M. Environmental fate and effects of dichloroacetamide herbicide safeners: “Inert” yet biologically active agrochemical ingredients // Environ. Sci. Technol. Lett. 2015. V. 2. № 10. P. 260–269.
6. Rosinger C., Bartsch K., Schulte W. Safeners for herbicides // Modern crop protection compounds (2nd ed.) / Kraemer W. 2012. V. 1. P. 371–397.
7. Tang X., Zhou X., Wu J., Li J., Bai L. A novel function of sanshools: the alleviation of injury from metolachlor in rice seedlings // Pest. Biochem. Physiol. 2014. V. 110. № 1. P. 44–49.
8. Ольшевская В.А., Черепанов И.А., Спиридонов Ю.Я., Спиридонова Г.С., Макаренко А.В., Самарская А.С., Пономарев А.Б., Моисеев С.К. Гербицидная активность производных карборанов, сиднонимина, ферроцена // Агрохимия. 2017. № 4. С. 16–21.
9. Черепанов И.А., Спиридонов Ю.Я., Чичварина О.А., Самарская А.С., Пономарев А.Б., Моисеев С.К. Ростстимулирующая активность производных сиднонимина // Агрохимия. 2018. № 9. С. 50–55.
10. Cherepanov I.A., Shevaldina E.V., Lapshin D.A., Spiridonov Yu.Ya., Abubikero V.A., Moiseev S.K. 4-Lithiosydnone imines: generation and stability. Plant growth regulating activity of 4-hydroxymethyl derivatives of sydnone imines // J. Organometal. Chem. 2021. V. 943. 121841.
11. Граник В.Г., Рябова С.Ю., Григорьев Н.Б. Экзогенные доноры оксида азота и ингибиторы его образования (химический аспект) // Усп. химии. 1997. Т. 66. № 8. С. 792–807.
12. Röszer T. The Biology of subcellular nitric oxide. Dordrecht– Heidelberg–London–N.Y.: Springer, 2012. 209 p.

13. *Shapiro A.D.* Nitric oxide signaling in plants // *Vitam. Horm.* 2005. V. 72. P. 339–398.
14. *Tsukagoshi H.* Control of root growth and development by reactive oxygen species // *Curr. Opin. Plant Biol.* 2016. V. 29. P. 57–63.
15. *Cherepanov I.A., Samarskaya A.S., Godovikov I.A., Lyssenko K.A., Pankratova A.A., Kalinin V.N.* N_6 -tert-Bu-toxycarbonyl derivatives of sydnone imines: preparation and synthetic use // *Tetrahedron Lett.* 2018. V. 59. № 8. P. 727–729.
16. *Colby S.R.* Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicide combinations // *Weeds.* 1967. V. 15. № 1. P. 20–22.

Sydnone Imine Based Herbicide Antidotes

I. A. Cherepanov^a, Yu. Ya. Spiridonov^b, V. A. Abubikerov^b, I. Yu. Spiridonova^b,
N. V. Kalganova^a, D. A. Lapshin^c, and S.K. Moiseev^{a,#}

^a *Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds RAS
ul. Vavilova 28, Moscow 119991, Russia*

^b *All-Russian Research Institute of Phytopatology
ul. Institute, vlad. 5, Bolshie Vyazemy, Moscow Region 143050, Russia*

^c *D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Miusskaya square 9, Moscow 125047, Russia*

[#] *E-mail: skm@ineos.ac.ru*

The derivatives of sydnone imine, a mesoionic heterocycle, were disclosed for the first time to show herbicide antidote properties. The *N*(3)-substituted 4-(arylhydroxymethyl)sydnone imines taken as the hydrochlorides or N_6 -*tert*-butoxycarbonyl or N_6 -tosyl derivatives and used for pre-sowing treatment of the corn seeds at doses of 0.25–1.0 g/t were found in pot experiments to stimulate the plant growth as well as to reduce or totally withdraw the herbicide effect of metsulfuron-methyl presented in the soil at a dose of 2.0 g/ha.

Key words: sydnone imines, herbicides, herbicide safeners, corn, sulfonylureas, metsulfuron-methyl.

УДК 632.91:595.752.3

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ЛЕТУЧЕСТИ МЕТИЛ НИКОТИНОАТА С ДИСПЕНСЕРОВ ПУТЕМ ЕГО ПЕРЕВОДА В СОЛЕВЫЕ ФОРМЫ ДЛЯ ОТЛОВА ТРИПСОВ

© 2022 г. А. Ю. Лобур^{1,*}, Н. Г. Тодоров¹, К. А. Кузнецов¹

¹Всероссийский центр карантина растений – (ВНИИКР)
140150 Московская обл., Раменский р-н, р.п. Быково, ул. Пограничная, 32, Россия

*E-mail: Alex-lobur@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.08.2021 г.

После доработки 22.09.2021 г.

Принята к публикации 15.11.2021 г.

Исследована зависимость относительной скорости испарения метилникотиноата (эффективного аттрактанта для отлова трипсов) от типа диспенсера и относительная скорость испарения метилникотиноата с диспенсеров при диссоциации его солей при комнатной температуре в зависимости от примененной кислоты. Установлено, что нанесение 150 мг метилникотиноата на пористые пластины в виде солей соляной, фосфорной, лимонной или трифторуксусной кислот позволило сделать диспенсеры, которые постепенно выделяют в окружающий воздух метилникотиноат более 1-го мес. Этот способ позволяет изготавливать диспенсеры длительного срока действия для отлова трипсов.

Ключевые слова: метилникотиноат, соли метилникотиноата, диспенсер, трипс.

DOI: 10.31857/S0002188122020107

ВВЕДЕНИЕ

Западный цветочный трипс (ЗЦТ) *Frankliniella occidentalis* включен в “Перечень вредителей, болезней растений и сорняков, имеющих карантинное значение для Российской Федерации”, утвержденный приказом Минсельхоза РФ № 673 от 26 декабря 2007 г. В настоящее время ЗЦТ признан одним из наиболее опасных вредителей овощных, декоративных и цветочных растений защищенного грунта. Западный цветочный трипс вредит на хлопчатнике, огурце, перце, луке, томате, землянике, винограде, персике и других плодово-ягодных и овощных культурах, а также на многочисленных декоративных и цветочных растениях. Личинки и взрослые особи высасывают клеточный сок из растительной ткани, ведут скрытый образ жизни, поселяясь в цветочных почках, бутонах, цветках, под различными чешуйками на растениях. ЗЦТ опасен тем, что наносит растениям непосредственные повреждения и способен переносить вирусы – возбудители опасных заболеваний растений (например, Tomato Spotted Wilt Tosspovirus (TSWV), поражающий более 360 видов растений).

Визуальное обнаружение вредителя для своевременной защиты культурных растений затруд-

нено мелкими размерами насекомого и его скрытым поведением. Поэтому, для раннего выявления ЗЦТ эффективным является применение цветных ловушек с аттрактантом. Применение инсектицидов для защиты урожая ограничено тем, что у ЗЦТ быстро вырабатывается резистентность, при этом популяция энтомофагов, сдерживающая рост количества ЗЦТ несет большой урон. В результате после обработки возможен всплеск популяции ЗЦТ [1].

Применение синих ловушек с аттрактантом в сочетании с энтомофагами иногда позволяет полностью отказаться от использования ядохимикатов для сдерживания количества ЗЦТ на растениях ниже допустимого уровня экономического ущерба [1].

Трипсов привлекает ряд химических соединений, входящих в состав душистых масел цветов. Исследовано более 30 таких соединений [2, 3]. Было установлено, что наряду с компонентами природных масел трипсов привлекают эфиры никотиновой и изоникотиновой кислоты [4, 5]. В модельных опытах на растениях было установлено, что в конкурентных условиях гераниол не много превосходит этилникотиноат в отлове ЗЦТ [6]. В опытах на офлактометре было установ-

лено, что этил никотиноат проявляет аттрактивность к ЗЦТ в диапазоне концентраций в 4 порядка. Большинство других душистых соединений, в том числе и гераниол, проявляли аттрактивность в диапазоне концентраций 1–2 порядка [7]. Кроме метилового и этилового эфиров никотиновой и изоникотиновой кислоты было исследовано большое количество производных пиридина и других соединений близкой структуры. Многие из этих веществ тоже проявляли аттрактивность к ЗЦТ, но не нашли практического применения, т.к. менее доступны и не превосходили эфиры никотиновой и изоникотиновой кислот [8–10]. Смесь 2-х аттрактантов, например, *n*-анизальдегида и метил изоникотиноата не увеличивала эффективность [11]. Предполагают, что у трипсов для распознавания ароматов имеется только один рецептор, и поэтому нет синергизма при применении нескольких аттрактантов [7]. Следует отметить, что метиловый и этиловый эфиры никотиновой и изоникотиновой кислоты наряду с ЗЦТ привлекают и другие виды трипсов, за исключением испанской популяции ЗЦТ. Эффективность отлова разных видов трипса конкретными пиридиновыми соединениями несколько отличается, но на настоящий момент недостаточно изучена [12].

Одна из ведущих мировых компаний по производству продуктов комплексной борьбы с вредителями Corport B.V. в диспенсере для трипсов Lurem-TR в качестве аттрактанта (кайромона) использует метил изоникотиноат. Диспенсер изготавливается на промышленном оборудовании и представляет собой пластиковый дозатор с перфорированной мембраной для постепенного распространения аттрактанта. По данным изготовителя, добавление к синим липким ловушкам диспенсера Lurem-TR увеличивает отлов трипсов, при этом нежелательный отлов энтомофагов и насекомых опылителей не увеличивается [13].

Несмотря на то, что изучением и разработкой методов контроля ЗЦТ специалисты занимаются более 40 лет, проблема эффективной защиты культурных растений от этого вредителя окончательно не решена, и работы в этом направлении не прекращаются. Свидетельством актуальности этой проблемы являются относительно недавние публикации [1, 14, 15].

Метил изоникотиноат характеризуется высокой летучестью. При температуре 25°C за сутки с ватных тампонов испаряется 320 мг, из полиэтиленовых запаянных пакетов (150 микрон) – 40 мг, а из диспенсеров Lurem-TR – 76 мг [14]. На наш взгляд, скорость испарения кайромона из диспенсеров является избыточной, что приводит к расточительному расходу вещества. Известно,

что для солевых форм аминов характерна термическая диссоциация. При комнатной температуре на открытой поверхности эти соли тоже распадаются и медленно выделяют амин в окружающее пространство.

Цель работы – исследование возможности обеспечить оптимальную скорость испарения метил никотиноата путем выбора конструкции диспенсера с вариацией дозировки или переводом метил никотиноата в различные солевые формы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве диспенсеров использовали пластины 2 × 2,5 см, нарезанные из коммерчески доступных губчатых салфеток York 17.5 × 15.5 см, также использовали картон фильтровальный в пластинах, 22 × 35 мм. Поролон для диспенсеров брали из губок для мытья посуды Luscan Макси 95 × 65 × 30 мм. Использовали коммерчески доступные Zip-Lock-пакеты 40 × 60 из полиэтилена высокого давления толщиной 40 мкм. Метил никотиноат и его солевые формы наносили на диспенсеры в виде раствора в метаноле. Растворитель после нанесения в течение 1 ч полностью испарялся. Для запаивания полиэтиленовых пакетов использовали вакуумный упаковщик Vacuum sealer dz-280a. Опыты по испарению метил никотиноата проводили в лабораторном шкафу со скоростью потока воздуха 0.1–0.2 м/с. Температура воздуха была в пределах 20–24°C. Диспенсеры развешивали на проволоке на расстоянии не менее 4 см друг от друга. Для гравиметрического анализа использовали аналитические весы ViBRA NT 224RCE. Для опытов использовали метил никотиноат фирмы ACROS, CAS 93-60-7, чистота 99%. Опыты проводили в четырехкратной повторности. Обработку результатов проводили стандартными статистическими методами. Относительное стандартное отклонение результатов не превышало 10%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

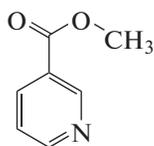
Распространенный прием снижения скорости испарения веществ с поверхности – это помещение диспенсеров в герметичные полиэтиленовые пакеты. Использование пленок разной толщины или многослойных конструкций позволяет менять скорость испарения. Увеличение количества нанесенного вещества соответственно увеличивает время до его полного испарения. Такие исследования опубликованы для метила изоникотиноата на медицинских марлевых тампонах, по-

Таблица 1. Испарение метил никотиноата с различных диспенсеров во времени

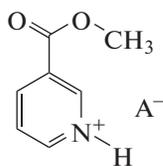
Вид диспенсера	Масса вещества (среднее, $n = 4$) на диспенсере, мг																	
	время после нанесения метил никотиноата на диспенсер, сут																	
	0	0.17	1	2	3	6	7	8	9	10	13	14	15	16	17	18	21	35
Губка 2.5 × 2 см	140	75	12	0														
Губка 2.5 × 2 см в ЗИП-пакете	140	125	91	64	31	0												
Губка 3 × 4 см	427	333	186	119	33	0												
Губка 3 × 4 см в ЗИП-пакете	427	417	355	302	236	79	33	18	8.9	4.2	2.1	0						
Картон фильтровальный 2.2 × 3.5 см в ЗИП-пакете	427	406	360	312	299	114	74	48	39	23	14	6.3	2.2	0				
Поролон в ЗИП-пакете 2 × 2 × 4 см	900	807	743	681	611	410	342	308	263	230	120	89	68	54	41	32	18	0
Губка 2.5 × 2 см в пакете из полиэтилена 200 мкм	150		126	112	83	72	72	54	44	38	22	15	9.3	5.2	1.3	0	0	
Губка 2.5 × 2 см в пакете из двойного полиэтилена 200 мкм	150		127	124	123	114	107	99	92	84	65	59	53	48	42	37	27	0

душечках саше и в полиэтиленовых пакетах [14]. Мы провели свои испытания с метил никотиноатом на других различных носителях. Результаты исследования представлены в табл. 1. Взвешивания проводили ежедневно за исключением выходных и праздничных дней.

Показано, что стойкого выделения никотиноата с диспенсера в течение более 30 сут можно достичь при использовании герметичного пакета из двойного полиэтилена 200 мкм и увеличении дозировки вещества >200 мг. В случае аминов другим способом существенно снизить скорость испарения вещества является перевод его в солевую форму:



Метил никотиноат



Соль метил никотиноата

Скорость термической диссоциации различных солей метил никотиноата с открытой поверхности обусловлена многими факторами: температурой, площадью поверхности испарения, скоростью обдувающего потока воздуха, кислотностью

аниона, летучестью амина и кислоты. Необходимо было подобрать условия для постепенного выделения метил никотиноата с диспенсера в течение длительного времени, а не установить точные физические константы. Поэтому эксперименты носили сравнительный характер. Выбор кислот определяли их доступностью и экологической безопасностью. При этом исключили применение кислот – сильных окислителей, т.к. аттрактант на диспенсере предполагается применять в комбинации с нерил-(S)-2-метилбутаноатом, половым агрегационным феромоном ЗЦТ, который в своей структуре содержит 2 двойные связи и возможно неустойчив к сильным окислителям.

Метил никотиноат 150 мг (1.095 мкмоль) нанесли на диспенсер в виде раствора в 0.5 мл метанола. В раствор добавляли эквимольное количество кислоты. Динамика испарения солей метил никотиноата представлена в графическом виде на рис. 1.

Соли метил никотиноата с муравьиной и уксусной кислотами оказались нестойкими и полностью испарялись на воздухе с пористых пластин за 1–3 сут. Следует отметить, что добавление к раствору перед нанесением на диспенсер глицерина (300 мг) или подсолнечного масла (100 мг) практически не снижало скорость испарения метил никотиноата. Помещение диспенсеров с нестойки-

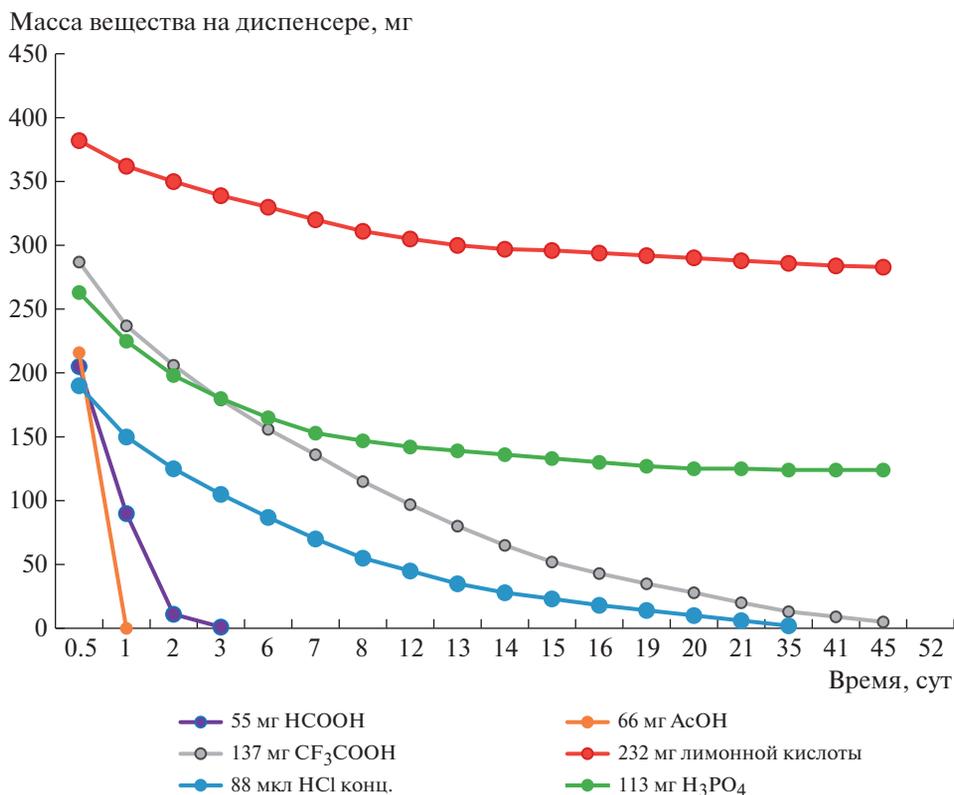


Рис. 1. Снижение массы солей метил никотиноата на пористых губках (2.0 × 2.5 см) во времени. Во всех вариантах брали 150 мг метил никотиноата и эквивалентные количества соответствующих кислот.

ми солями никотиноата в ЗИП-пакеты существенно не увеличивало время испарения амина. Добавление глицерина и помещение диспенсеров в ЗИП-пакеты также не давало положительного эффекта, и никотиноат полностью испарялся за 2–3 сут.

Соль с соляной кислотой испарялась более 1-го мес. Соль с трифторуксусной кислотой испарялась 1.5 мес. Убыль массы пластин с солями нелетучих лимонной и фосфорной кислот наблюдали 2 и 3 нед соответственно. При этом отмечено некоторое увеличение массы пластин при увеличении влажности воздуха и ее уменьшение при снижении влажности. Вероятно, пластины с этими солями проявляли гигроскопичность. Пластины с солями лимонной и фосфорной кислот, несмотря на то что через 2–3 нед при взвешивании перестали терять массу, пахли метил никотиноатом >50 сут. Органолептический анализ оказался удобным способом контроля, т.к. алкил никотиноаты имеют сильно выраженный запах и при этом не токсичны. Можно предположить, что пока пластины пахнут, они будут привлекать ЗЦТ. Пластины с солями летучих кислот после испарения соли полностью теряли запах метил никотиноата.

Важной характеристикой диспенсеров является количество аттрактанта, испаряющегося за 1 сут. В расчетах учтено, что при разложении солей никотиноата с летучими кислотами на долю амина приходится лишь часть потери массы диспенсера, а в случае с нелетучими кислотами потеря массы обусловлена только испарением метил никотиноата (рис. 2).

В первое время использования диспенсеров метил никотиноат испарялся с диспенсеров интенсивнее, затем количество выделявшегося аттрактанта плавно снижалось до 1 мг/сут вплоть до полного испарения к исходу 35-х сут. Наибольшее количество вещества на начальном этапе выделялось из диспенсеров в однослойных полиэтиленовых пакетах. Эти же диспенсеры раньше других за 18 сут полностью испарили нанесенное вещество. Динамика выделения метил никотиноата из диспенсеров в двойных полиэтиленовых пакетах и при диссоциации его фосфата, хлорида и трифторацетата была примерно одинаковой. Такая динамика выделения метил никотиноата позволила предположить, что эти диспенсеры будут эффективно привлекать трипсов более 1-го мес. При этом следует отметить, что изготовление диспенсеров с соевыми формами аттрактанта

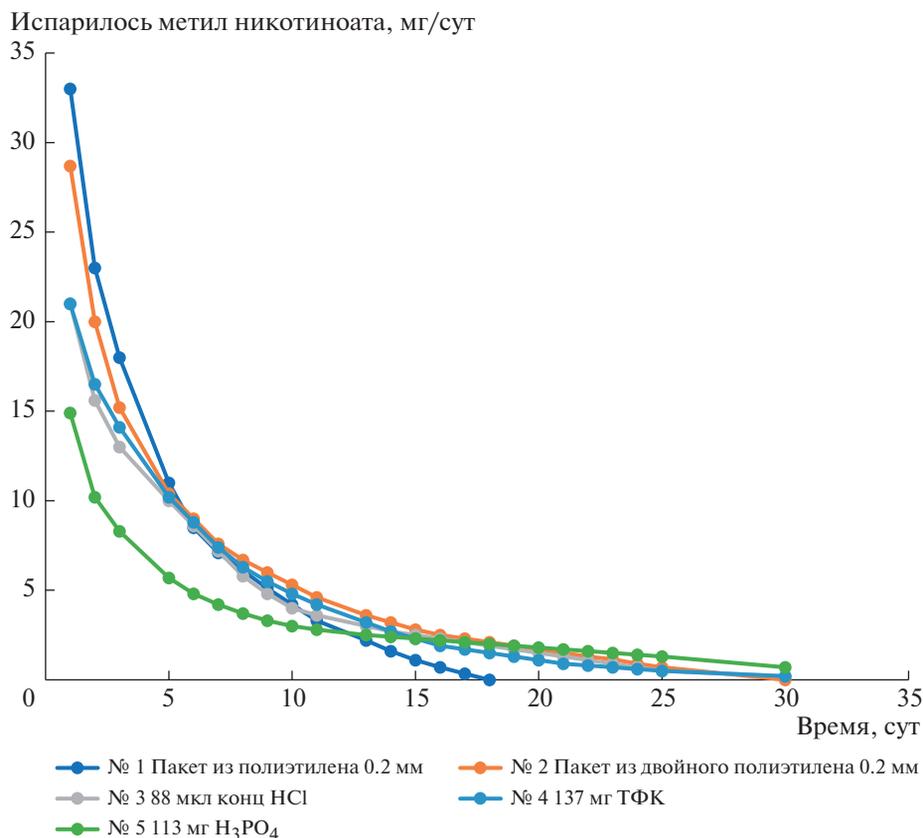


Рис. 2. Суточное испарение метил никотиноата (исходное нанесение 150 мг) с пористых губок в запаянных полиэтиленовых пакетах (№ 1, 2) и при диссоциации его солей (№ 3–5) в зависимости от времени.

значительно проще, чем запаивание пластин в двойные полиэтиленовые пакеты.

В настоящее время диспенсеры, снаряженные 150 мг метил никотиноата на пористые пластины в виде солей с соляной, фосфорной, лимонной и трифторуксусной кислотами, проходят полевые испытания на отлов ЗЦТ. Результаты полевых испытаний будут опубликованы по их окончании. Также начаты работы с солями этих же кислот с этил никотиноатом, а также с метил и этил изоникотиноатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нанесение 150 мг метил никотиноата на пористые пластины в виде солей соляной, фосфорной, лимонной или трифторуксусной кислот позволяет сделать диспенсеры без запаивания в полимерные пакеты, которые постепенно выделяют в окружающий воздух метил никотиноат более 1-го мес. Этот способ позволяет изготавливать диспенсеры длительного срока действия для отлова трипсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sampson C.* Management of the western flower trips on strawberry. Thesis submitted for the degree of PhD. Keele University, 2014. 278 p.
2. *Imai T., Mackawa M. and Murai T.* Attractiveness of methyl anthranilate and its related compounds to the flower thrips, *Thrips hawaiiensis* (Morgan), *T. coloratus* Schmutz, *T. flavus* Schrank and *Megalurothrips distalis* (Karny) (Thysanoptera: Thripidae) // *Appl. Entomol. Zool.* 2001. V. 36 (4). P. 475–478.
3. *Cao Yu, Wang J., Germinara G.S., Lijuan Wang, Yang H., Gao Y. and Li C.* Behavioral Responses of *Thrips hawaiiensis* (Thysanoptera: Thripidae) to Volatile Compounds Identified from *Gardenia jasminoides* Ellis (Gentianales: Rubiaceae) // *Insects.* 2020. V. 11. № 408. <https://doi.org/10.3390/insects11070408>
4. *Penman D.R., Osborne G.O., Worner S.P., Chapman R.B., McLaren G.F.* Ethyl nicotinate: A chemical attractant for *Trips obscuratus* (Thysanoptera: Thripidae) in Stonefruit in New Zealand // *J. Chem. Ecol.* 1982. V. 8. № 10. P. 1299–1303.
5. *Teulon D.A.J., Penman D.R., Ramakers P.M.J.* Volatile chemicals for *Trips* (Thysanoptera: Thripidae) host finding and applications for trips pest management // *J. Econom. Entomol.* 1993. V. 86. Iss. 5. P. 1405–1415.

6. Frey J.E., Cortada R. V., Heling H. The Potential of flower odours for use in population monitoring of western flower thrips *Frankliniella occidentalis* Perg. (Thysanoptera: Thripidae) // *Biocontrol Sci. Technol.* 1994. V. 4. P. 177–186.
7. Koschier E.H., De Kogel W.J. and Visser J.H. Assessing the attractiveness of volatile plant compounds to western flower thrips *Frankliniella occidentalis* // *J. Chem. Ecol.* 2000. V. 26. № 12. P. 2643–2655.
8. Davidson M.M., Teulon D.A.J., Perry N.B. Insect behaviour modifying compounds: Patent WO2005046330A1. 2003.11.13.
9. Teulon D.A.J., Davidson M.M., Hedderley D.I., James D.E., Fletcher C.D., Larsen L., Green V.C. and Perry N.B. 4-Pyridyl carbonyl and related compounds as thrips lures: Effectiveness for onion thrips and New Zealand flower thrips in field experiments // *J. Agric. Food Chem.* 2007. V. 55. P. 6198–6205.
10. Davidson M.M., Perry N.B., Larsen L., Green V.C., Butler R.C. and Teulon D.A.J. 4-Pyridyl carbonyl compounds as thrips lures: Effectiveness for western flower thrips in y-tube bioassays // *J. Agric. Food Chem.* 2008, V. 56. P. 6554–6561.
11. Teulon D.A.J., Nielsen M.C., James D.E., Winkler S., McLachlan A.R.G., Perry N.B. Combination of two odour chemical lures does not increase thrips capture in field bioassays // *New Zealand Plant Protect.* 2007. V. 60. P. 61–66.
12. Davidson M.M., Butler R.C., Teulon D.A.J. Pyridine compounds increase thrips (Thysanoptera: Thripidae) trap capture in an onion crop // *J. Econom. Entomol.* 2009. V. 102. № 4. P. 1468–1471.
13. Muvea A.M., Waiganjo M.M., Kutima H.L., Osiemo Z., Nyasani J.O., Subramanian S. Attraction of pest thrips (Thysanoptera: Thripidae) infesting French beans to coloured sticky traps with Lurem-TR and its utility for monitoring thrips populations. // *Inter. J. Tropic. Insect Sci.* 2014. V. 34. № 3. P. 197–206.
14. Nielsen M.C.K. Factors affecting the response of thrips to an olfactory cue. A thesis submitted in partial fulfillment of Doctor of Philosophy (Ph.D.). Lincoln University, 2013. 157 p.
15. Koschier E.H. Essential oil compounds for Thrips control – a review. (bibliography 105 sources) // *Nat. Product Commun.* 2008. V. 3. № 7. P. 1171–1182.

Method of Reducing the Volatility of Methyl Nicotinoate from Dispensers by Converting It into Salt Forms for Catching Thrips

A. Y. Lobur^{a,#}, N. G. Todorov^a, and K. A. Kuznetsov^a

^aAll-Russian Plant Quarantine Center (VNIIKR)
ul. Pogranichnaya 32, Moscow Region, Ramensky rayon, r.p. Bykovo 140150, Russia

[#]E-mail: Alex-lobur@yandex.ru

The dependence of the relative evaporation rate of methyl nicotinoate (an effective attractant for trapping thrips) is investigated the relative evaporation rate of methyl nicotinoate from dispensers during dissociation of its salts at room temperature, depending on the acid used, depends on the type of dispenser. It was found that applying 150 mg of methyl nicotinoate to porous plates in the form of salts of hydrochloric, phosphoric, citric or trifluoroacetic acids made it possible to make dispensers that gradually release methyl nicotinoate into the surrounding air for more than 1 month. This method makes it possible to manufacture long-life dispensers for catching thrips.

Key words: methyl nicotinoate, salts of methyl nicotinoate, dispenser, thrips.

УДК 631.821:631.445.24:631.559:631.421.1

ВЛИЯНИЕ ИЗВЕСТКОВАНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ ДОЛОМИТОВОЙ МУКОЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР (РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО МИКРОПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА)

© 2022 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}, К. Ф. Шаврина²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия

²Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 05.10.2021 г.

После доработки 14.12.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

Изучили влияние известкования кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой (диапазон доз 0–2.0 H_T) на урожайность различных видов сельскохозяйственных культур (*Vicia sativa* L. и *Avena sativa* L. в смешанном посеве, *Brassica napus* L., *Vicia faba* L., *Hordeum* L., *Sinapis alba* L., *Pisum sativum* L.) в условиях многолетнего прецизионного микрополевого эксперимента в течение 10 лет. Установлено, что применение доломитовой муки (ДМ) оказывало положительное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур в течение длительного, не менее 10 лет, периода; долгосрочный положительный эффект проявлялся даже при применении малых доз мелиоранта (до 0.4 H_T). Применение ДМ в дозах 0.7–2.0 H_T может приводить к снижению урожайности отдельных видов сельскохозяйственных культур по сравнению с более низкими дозами.

Ключевые слова: известкование, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, доломитовая мука, урожайность сельскохозяйственных культур, многолетний микрополевой эксперимент.

DOI: 10.31857/S0002188122040147

ВВЕДЕНИЕ

Эффект от известкования кислых почв в агроценозе варьируется в широком диапазоне в зависимости от свойств почвы, дозы и физико-химических характеристик мелиоранта, биологических (видовых) особенностей растений, продолжительности контакта мелиоранта с почвой [1–4]. Отзывчивость сельскохозяйственных культур на применение известковых мелиорантов может также существенно зависеть от погодных условий конкретного вегетационного периода [5].

Известно [6], что при известковании в почве происходят многочисленные изменения, которые, в свою очередь, влияют на усвоение питательных веществ растениями (например, может изменяться доступность азота, фосфора и микроэлементов растениям, накопление углерода в почве, почвенная биота и др.). Экспериментальные данные [7] свидетельствуют, что различная чувствительность сельскохозяйственных культур к кислотности почвы обусловлена составом их

корневых выделений, изменяющих реакцию среды, а также связана с ферментативной активностью почвы в ризосфере.

Известно [8, 9], что в кислых почвах на 30–40% снижается эффективность минеральных удобрений, в 3–5 раз увеличивается накопление в растениеводческой продукции тяжелых металлов и радионуклидов. Известкование – один из наиболее экономически выгодных приемов повышения урожая сельскохозяйственных культур на кислых почвах. За ротацию 6–8-польного севооборота 1 т $CaCO_3$ обеспечивает прибавку урожая на 6–8 ц з.е./га. Известковые мелиоранты удовлетворяют потребность растений в кальции и магнии, снижают содержание подвижного алюминия в почве, повышают эффективность применения минеральных удобрений, нивелируют эффект подкисления почв вследствие применения физиологически кислых удобрений [10–12].



Рис. 1. Микрополевого опыт: (а) – ячмень, (б) – викоовсяная смесь.

Дать качественную и количественную оценку эффективности различных доз известкового мелиоранта и сопряженных с ними кислотно-основных свойств произвесткованных почв, влияющих на продуктивность и элементный состав сельскохозяйственных культур, позволяют результаты исследований, полученные в экспериментах с широким диапазоном доз мелиоранта [13].

Цель работы – в условиях многолетнего микрополевого эксперимента на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изучить влияние возрастающих доз доломитовой муки (ДМ) на урожайность различных видов сельскохозяйственных культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в течение 10 лет (2012–2021 гг.) в условиях многолетнего микрополевого прецизионного (без повторностей) опыта, заложенного в Меньковском филиале Агрофизического института (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) в полиэтиленовых сосудах без дна ($S = 1 \text{ м}^2$, глубина 25 см, $\approx 300 \text{ кг}$ почвы/сосуд) в мае 2012 г. [14–17].

Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда, площадью 1 м^2) была вынута почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру делянок размещали полиэтиленовые сосуды без дна, которые наполняли кислой легкосуглинистой дерново-подзолистой почвой: $\text{pH}_{\text{KCl}} 4.64 \pm 0.04$, $H_r - 4.11 \pm 0.08$, Ca^{2+} , $\text{Mg}^{2+} - 2.68 \pm 0.14$ и 0.36 ± 0.06 $1/2 \text{ ммоль}/100 \text{ г}$ соответственно, гумус – 1.8%. Схема опыта, варианты: 1 – контроль (фон НРК), 2 – фон + ДМ 0.2 H_r , 3 – фон + ДМ 0.3 H_r , 4 –

фон + ДМ 0.4 H_r , 5 – фон + ДМ 0.5 H_r , 6 – фон + ДМ 0.6 H_r , 7 – фон + ДМ 0.7 H_r , 8 – фон + ДМ 0.8 H_r , 9 – фон + ДМ 0.9 H_r , 10 – фон + ДМ 1.0 H_r , 11 – фон + ДМ 1.5 H_r , 12 – фон + ДМ 2.0 H_r . Размещение делянок систематическое, 2-рядное. Доза доломитовой муки ($\text{CaCO}_3 - 50.4$, $\text{MgCO}_3 - 48.9\%$) по 1 H_r составила 5.54 т/га. Ежегодно вносили минеральные удобрения (АФК, N_{aa}). Суммарная за 2012–2021 гг. доза внесенных минеральных удобрений – N684P564K494. Выращивали следующие виды сельскохозяйственных культур: вика (*Vicia sativa* L.) и овес (*Avena sativa* L.) в смешанном посеве (2012, 2016 гг.), рапс (*Brassica napus* L.) (2013 г.), овощные бобы (*Vicia faba* L.) (2014, 2017 гг.), ячмень (*Hordeum* L.) (2015, 2020 гг.), горчица белая (*Sinapis alba* L.) (2019 г.), горох (сидерат) (*Pisum sativum* L.) (2021 г.) (рис. 1). Определяли сырую и воздушно-сухую массу растений. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние нейтрализации почвенной кислотности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой на урожайность сельскохозяйственных культур существенно зависело от дозы мелиоранта и генетически обусловленных особенностей растений.

В год закладки эксперимента (2012 г.) выращивали в смешанном посеве овес сорта Борус и вику сорта Нововятская (норма высева – $20 \text{ г}/\text{м}^2$, соотношение вика : овес = 2 : 1 по массе). Уборку проводили в фазах цветения вики и колошения овса. С каждой делянки было отобрано по 40 растений

Таблица 1. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на биомассу викоовсяной смеси

Вариант	2012 г.					2016 г.	
	викоовсяная смесь	вика		овес		сырая, кг/м ²	воздушно-сухая, кг/м ²
		воздушно-сухая, г	сырая, г/50 шт.	воздушно-сухая, г/50 шт.	сырая, г/40 шт.		
1. Контроль	170	392	74	481	96	2.7	0.57
2. ДМ 0.2 Н _г	181	379	55	705	126	2.8	0.59
3. ДМ 0.3 Н _г	254	369	68	871	186	2.7	0.57
4. ДМ 0.4 Н _г	191	377	59	683	132	2.8	0.58
5. ДМ 0.5 Н _г	215	453	82	671	133	2.7	0.55
6. ДМ 0.6 Н _г	228	430	69	773	159	3.0	0.61
7. ДМ 0.7 Н _г	216	304	56	764	160	2.9	0.58
8. ДМ 0.8 Н _г	199	357	57	686	142	3.0	0.63
9. ДМ 0.9 Н _г	—	395	73	—	—	2.8	0.61
10. ДМ 1.0 Н _г	245	350	61	835	184	3.0	0.66
11. ДМ 1.5 Н _г	—	360	61	—	—	2.6	0.57
12. ДМ 2.0 Н _г	263	334	57	909	206	2.4	0.48

овса и 50 растений вики (табл. 1). Учет урожая опытной культуры по индивидуальным растительным пробам позволил исключить влияние такого фактора, как неоднородность количества растений на единице площади [18]. Зависимость сухой биомассы викоовсяной смеси от дозы мелиоранта характеризовалась коэффициентом корреляции (r) 0.691 (при критической величине r на 5%-ном уровне значимости 0.632). В зависимости от дозы ДМ прибавка по отношению к контролю варьировалась от 6 (вариант 2) до 55% (вариант 12). Отзывчивость растений овса на внесение мелиоранта была существенно больше, чем растений вики: биомасса растений линейно возрастала в интервале доз ДМ 0–2.0 Н_г ($r = 0.66$ и 0.77 для сырой и воздушно-сухой биомассы соответственно). В контрольном варианте наблюдали существенное снижение кущения растений овса по сравнению с опытными вариантами, что отразилось на формировании биомассы растений. Внесение ДМ в дозе 0.2 Н_г привело к возрастанию сырой биомассы растений овса на 46% по отношению к контролю, а максимальная прибавка воздушно-сухой биомассы составила 114% (доза 2.0 Н_г). Известно [12], что овес может удовлетворительно расти в широком диапазоне рН, положительно реагирует на высокие дозы извести, наиболее благоприятны для этой культуры рН почвы 5.5–6.5. Увеличение биомассы вики на 16 и 10%

по отношению к контролю наблюдали в вариантах 5 и 6 соответственно, в остальных вариантах опыта положительный эффект отсутствовал.

Повторно викоовсяную смесь (вика сорта Львовская-22, овес сорта Аргомак) выращивали на 5-й год после внесения ДМ (2016 г.). С учетом всхожести на каждой делянке количество растений составило 360 и 200 шт. вики и овса соответственно. Учет урожая проводили сплошным методом. Воздушно-сухая биомасса варьировалась в узком диапазоне 0.58 ± 0.04 кг/м² ($v = 6.9\%$), (табл. 1). В интервале доз ДМ 0–1.0 Н_г наблюдали некоторое увеличение сырой (11–15%, $r = 0.696$) и воздушно-сухой (6–16%, $r = 0.723$) биомассы по отношению к контролю. При дальнейшем увеличении дозы ДМ (варианты 11, 12) проявилась тенденция к снижению биомассы, что согласуется с информацией [19] о том, что избыточное известкование и внесение минеральных удобрений на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах с рН 5.51–6.00 может приводить к снижению урожайности и качества сельскохозяйственных культур, увеличению материальных и энергетических затрат на проведение известкования.

На 2-й год после закладки опыта (2013 г.) опытной культурой являлся рапс сорта Орелджд-4. Норма высева – 10 кг/га (280 семян/м²). Для оценки влияния возрастающих доз ДМ на биомассу растений рапса с каждого варианта опыта в фазе цве-

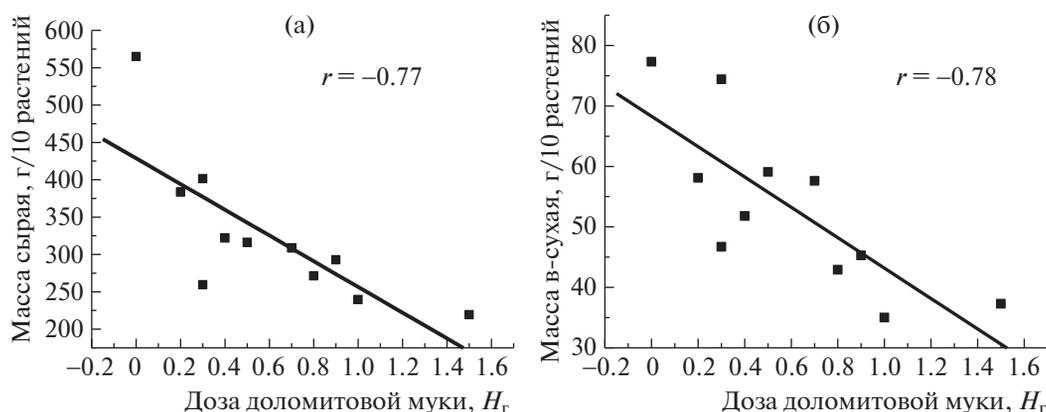


Рис. 2. Зависимость биомассы растений рапса от дозы доломитовой муки (2013 г.): (а) – сырая, (б) – воздушно-сухая масса.

тения было отобрано по 10 растений. Сырая и воздушно-сухая биомасса растений линейно снижалась в интервале доз ДМ 0–1.5 H_r ($r = -0.77$ и -0.78 соответственно) (рис. 2). В контрольном варианте опыта наблюдали существенное снижение всхожести (до 50%) и угнетение роста растений на первых этапах развития. В дальнейшем увеличение площади питания в расчете на одно растение, вероятно, привело к тому, что на момент уборки масса 10-ти растений в контрольном варианте существенно превысила массу в вариантах с мелиорантом. Однако следует отметить, что отрицательная корреляционная связь между дозой мелиоранта и биомассой растений выявлена и в интервале доз ДМ 0.2–1.5 H_r ($r = -0.76$). Согласно [20], всхожесть и урожайность ярового рапса существенно зависит от содержания влаги в слое семенного ложа, особенно в засушливые годы.

В 2014 и в 2017 гг. (3-й и 6-й годы взаимодействия ДМ с почвой) выращивали овощные бобы сортов Белорусские и Русский черный соответственно. Учет урожая проводили в фазе цветения сплошным методом (50 и 42 растения на делянке в 2014 и 2017 гг. соответственно).

В 2014 г. биомасса растений овощных бобов слабо зависела от дозы ДМ ($r = 0.432$). Сырая и воздушно-сухая биомасса варьировались в пределах 1.78 ± 0.23 и 0.27 ± 0.04 кг/м² соответственно. Коэффициент вариации, характеризующий неоднородность биомассы в пределах вариантов опыта, составил 13%. Наибольшая прибавка воздушно-сухой биомассы по отношению к контролю (50%) была получена при внесении ДМ в дозе 1.0 H_r .

В 2017 г. зависимость сырой и воздушно-сухой биомассы растений овощных бобов от дозы мелиоранта характеризовалась коэффициентами кор-

реляции $r = 0.839$ и 0.864 соответственно (при критической величине r на 5%-ном уровне значимости 0.576) (рис. 3). Вероятно, выраженность эффекта в значительной мере была связана с тем, что температура атмосферного воздуха в течение большей части вегетационного периода 2017 г. была существенно ниже нормы.

Зернофуражный ячмень сорта Ленинградский являлся опытной культурой в 2015 и 2020 гг. (4-й и 9-й годы после внесения ДМ). В 2015 г. при посеве 500 семян/м² полевая всхожесть варьировалась от 86 ± 5 до $94 \pm 6\%$ и не зависела от дозы мелиоранта. Уборку урожая проводили в фазе восковой спелости методом сплошного учета (табл. 2). В интервале доз ДМ 0–0.9 H_r зависимость урожайности зерна, соломы и половы ячменя от дозы характеризовалась коэффициентами корреляции $r = 0.830$, 0.606 и 0.760 соответственно, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости 0.666. Максимальная урожайность зерна, отмеченная в интервале доз ДМ 0.5–0.9 и 2.0 H_r , варьировалась в пределах 0.45 – 0.49 кг/м², что на 29–39% больше, чем в контрольном варианте опыта [16]. Влияние ДМ в дозах 0.5–0.6 H_r на урожайность зерна ячменя было практически идентично влиянию доз 0.8–0.9 H_r . Установлена тесная корреляционная связь между дозой известкового мелиоранта и отношением зерно: солома в урожае ячменя ($r = 0.916$) (рис. 4).

В 2020 г. полевая всхожесть растений ячменя в вариантах опыта варьировалась в пределах $76 \pm 3\%$, (норма высева – 500 семян/м²). Уборку урожая проводили в фазе колошения. Определяли сырую и воздушно-сухую массу растений методом сплошного учета (табл. 2). В интервале доз ДМ 0–0.6 H_r сырая и воздушно-сухая биомасса растений ячменя линейно возрастала, коэффициенты

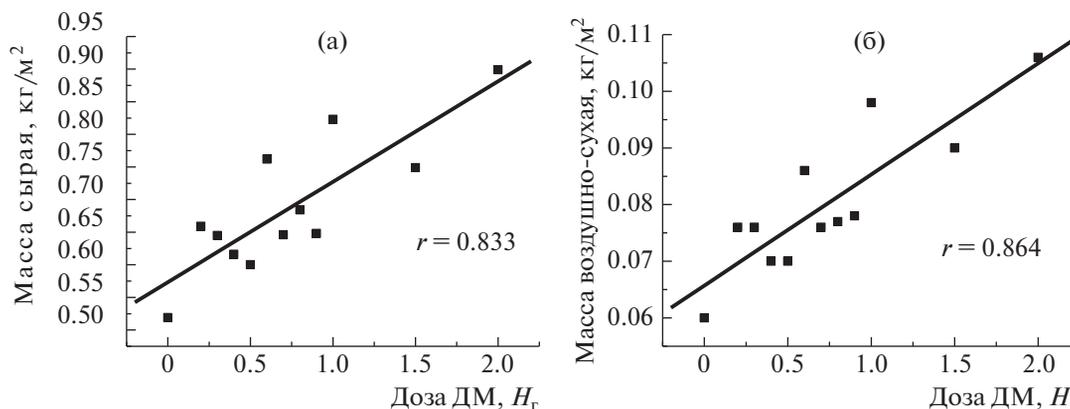


Рис. 3. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений овощных бобов (2017 г.): (а) – сырая, (б) – воздушно-сухая масса.

корреляции (r) составили соответственно 0.938 и 0.963. Дальнейшее увеличение дозы мелиоранта привело к некоторому снижению биомассы, но прибавка по отношению к контролю была не менее 40% (табл. 2). Наибольшую прибавку урожая биомассы по отношению к контролю наблюдали при внесении ДМ в дозах 0.5 и 0.6 H_t : для воздушно сухой биомассы она составила 118 и 182% соответственно. Считается [12], что такие зерновые культуры как ячмень и кормовые бобы, отличаются повышенной отзывчивостью на реакцию среды, оптимальным для них является рН почвы 6.0–7.0.

На 8-й год эксперимента (2019 г.) выращивали растения горчицы белой до фазы цветения. Нор-

ма высева – 700 семян/м², полевая всхожесть – $49 \pm 6\%$. Учет урожая проводили для 60-ти растений с делянки. Влияние возрастающих доз мелиоранта на биомассу растений в интервале доз ДМ 0–2.0 H_t характеризовалось кривой с двумя максимумами (рис. 5). В интервале доз ДМ 0–0.6 H_t сырая и воздушно-сухая биомасса растений горчицы белой линейно возрастала, коэффициенты корреляции (r) составили соответственно 0.795 и 0.821; в вариантах 7. 9–11 она была меньше, чем в контрольном варианте опыта. Наибольшую прибавку биомассы по отношению к контролю наблюдали при внесении ДМ в дозах 0.5 и 0.6 H_t : для сырой биомассы она составила 39 и 47% соответственно, для воздушно сухой биомассы – 51%.

Таблица 2. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений ячменя, г/м²

Вариант	2015 г.			2020 г.	
	зерно	солома	полова	масса сырая	масса воздушно-сухая
1. Контроль	349	397	71	654	171
2. ДМ 0.2 H_t	437	455	83	1090	295
3. ДМ 0.3 H_t	429	469	82	925	279
4. ДМ 0.4 H_t	419	426	79	1140	365
5. ДМ 0.5 H_t	470	463	85	1250	373
6. ДМ 0.6 H_t	487	484	86	1430	483
7. ДМ 0.7 H_t	452	444	81	907	272
8. ДМ 0.8 H_t	474	475	93	1110	348
9. ДМ 0.9 H_t	476	462	86	1090	331
10. ДМ 1.0 H_t	444	462	89	1150	358
11. ДМ 1.5 H_t	386	351	67	743	240
12. ДМ 2.0 H_t	463	368	72	851	268

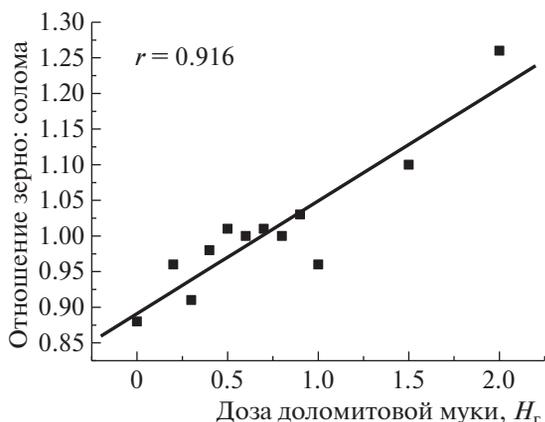


Рис. 4. Влияние возрастающих доз ДМ на величину соотношения зерно: солома в урожае ячменя (2015 г.)

В 2021 г. (10-й год эксперимента, аномально сухой и жаркий) опытной культурой являлся горох (сидерат). Уборку урожая проводили в фазе плоского боба (метод сплошного учета) (табл. 3). Норма высева – 200 семян/м², полевая всхожесть варьировалась в пределах $78 \pm 5\%$. Влияние возрастающих доз ДМ на биомассу растений гороха в интервале доз ДМ 0–1.0 H_r хорошо аппроксимировалось линейной моделью: коэффициенты корреляции (r), характеризующие зависимость доза–ответ по отношению к сырой, воздушно-сухой биомассе и плодам составили 0.716, 0.771 и 0.862 соответственно (при критической величине r на 5%-ном уровне значимости 0.632). Положительный эффект от применения ДМ наблюдали во всех вариантах (2–12), но наиболее высокие прибавки сырой биомассы гороха по отношению к контролю получены в вариантах 5, 6, 10–190,

158 и 167% соответственно. Последующее увеличение дозы мелиоранта (1.5 и 2.0 H_r) привело к существенному снижению биомассы растений по отношению к вариантам 5–10, но было значительно больше, чем в контрольном варианте опыта. Полученные данные согласуются с результатами, представленными в работе [19], согласно которым известкование дерново-подзолистой легкосуглинистой слабокислой почвы оказывало положительное влияние на показатели фотосинтетической деятельности посевов гороха, увеличение листовой поверхности, крупности семян и урожайности.

ВЫВОДЫ

1. В условиях многолетнего микрополевого эксперимента установлено, что известкование кислой дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой (ДМ) оказывало положительное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур в течение длительного, не менее 10 лет, периода. Количественный эффект определяли доза мелиоранта и видовые особенности растений. Применение ДМ в дозах 0.7–2.0 могло приводить к снижению урожайности отдельных видов сельскохозяйственных культур по отношению к более низким дозам. Неблагоприятные погодные условия могли нивелировать или усиливать влияние известкования на урожайность сельскохозяйственных культур.

2. Долгосрочное положительное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур при известковании кислой дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой проявлялось даже при применении малых доз мелиоранта (до 0.4 H_r). В течение

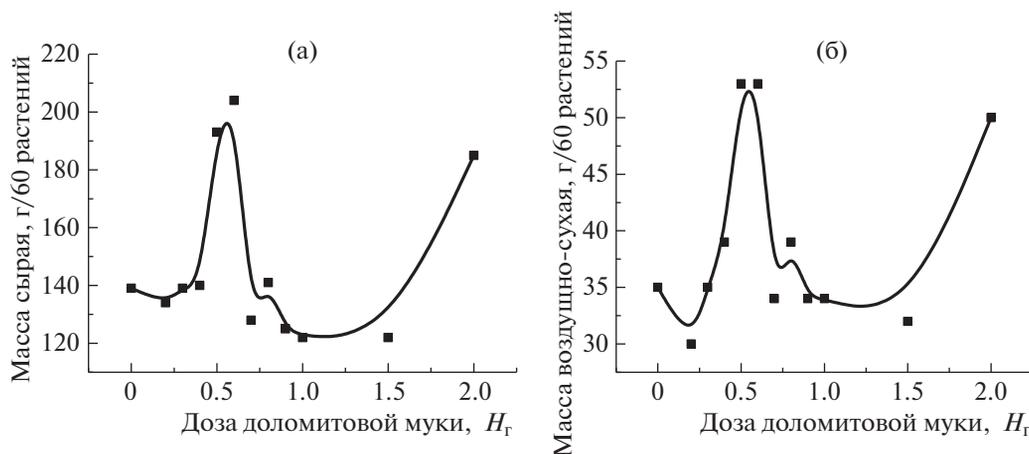


Рис. 5. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений горчицы белой (2019 г.): (а) – сырая, (б) – воздушно-сухая масса.

ние 10 лет взаимодействия ДМ с почвой были зафиксированы следующие прибавки урожайности:

1-й год – викоовсяная смесь – на 6–55% (интервал доз ДМ 0.2–2.0 H_T);

3-й год – овощные бобы – от 14% (0.2 H_T) до 48% (1.0 H_T);

4-й год – ячмень (зерно) – 29–39% (интервал доз ДМ 0.5–0.9, 2.0 H_T), но не менее 11% (1.5 H_T);

5-й год – викоовсяная смесь – 11–15% (0.2–1.0 H_T);

6-й год – овощные бобы (воздушно-сухая масса) – от 17 до 43% (0.2–0.9 H_T) и 63, 50, 77% (1.0, 1.5 и 2.0 H_T);

8-й год – горчица белая – максимум 51% (0.5, 0.6 H_T) и 43% (2.0 H_T);

9-й год – ячмень (зеленая воздушно-сухая масса) – не менее 40% (0.2–2.0 H_T), максимум 118–182% (0.5, 0.6 H_T);

10-й год – горох (воздушно-сухая масса) – не менее 48% (0.3 H_T), максимум – 158% (0.5, 1.0 H_T).

3. Зависимость воздушно-сухой биомассы викоовсяной смеси от дозы мелиоранта (0–2.0 H_T , 1-й год) характеризовалась коэффициентом корреляции (r) = 0.691 (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости 0.632). Отзывчивость растений овса на известкование была существенно больше, чем растений вики. На 5-й год взаимодействия ДМ с почвой в интервале доз ДМ 0–1.0 H_T наблюдали некоторое увеличение воздушно-сухой биомассы (на 6–16%, r = 0.723) по отношению к контролю. При дальнейшем увеличении дозы ДМ (варианты 11, 12) отметили тенденцию к снижению указанного показателя.

4. Известкование могло приводить к снижению урожайности отдельных видов сельскохозяйственных культур: на 2-й год после внесения ДМ в почву сырая и воздушно-сухая биомасса растений рапса линейно снижалась с увеличением дозы доломитовой муки (r = –0.77 и –0.78 соответственно).

5. Влияние ДМ в широком диапазоне доз на биомассу растений овощных бобов существенно зависело от условий конкретного вегетационного периода. На 3-й год взаимодействия мелиоранта с почвой (2014 г.) биомасса растений слабо зависела от дозы ДМ (r = 0.432). На 6-й год опыта сырая и воздушно-сухая биомасса растений овощных бобов линейно возрастала в интервале доз ДМ 0–2.0 H_T (r = 0.39 и 0.864 соответственно, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости 0.576).

6. Ярко выраженный положительный эффект влияния известкования дерново-подзолистой

Таблица 3. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на биомассу растений гороха (2021 г.), г/м²

Вариант	Масса сырая	Масса воздушно-сухая	
		общая	плоды (плоский боб)
1. Контроль	301	79	6
2. ДМ 0.2 H_T	535	127	15
3. ДМ 0.3 H_T	501	117	15
4. ДМ 0.4 H_T	547	140	20
5. ДМ 0.5 H_T	873	204	28
6. ДМ 0.6 H_T	777	184	30
7. ДМ 0.7 H_T	643	157	23
8. ДМ 0.8 H_T	647	157	24
9. ДМ 0.9 H_T	652	162	25
10. ДМ 1.0 H_T	803	204	36
11. ДМ 1.5 H_T	461	122	15
12. ДМ 2.0 H_T	590	144	20

почвы доломитовой мукой наблюдали на растениях ячменя сорта Ленинградский. На 4-й год проведения опыта в интервале доз ДМ 0–0.9 H_T урожайность зерна ячменя линейно возрастала (r = 0.830). На 9-й год в интервале доз ДМ 0–0.6 H_T зависимость воздушно-сухой биомассы растений ячменя (фаза колошения) от дозы мелиоранта характеризовалась коэффициентом корреляции r = 0.963. Дальнейшее увеличение дозы мелиоранта привело к некоторому снижению биомассы, но прибавка по отношению к контролю была не менее 40%.

7. На 8-й год взаимодействия ДМ с почвой в интервале доз 0–0.6 H_T сырая и воздушно-сухая биомасса растений горчицы белой (фаза цветения) линейно возрастала (r = 0.795 и 0.821 соответственно). При внесении ДМ в дозах 0.7, 0.9–1.5 H_T биомасса растений была меньше, чем в контрольном варианте опыта.

8. Влияние возрастающих доз мелиоранта на биомассу растений гороха (10-й год) в интервале доз 0–1.0 H_T хорошо аппроксимировалось линейной моделью (r = 0.71 и 0.862 соответственно по отношению к воздушно-сухой биомассе и плодам). Положительный эффект от применения ДМ наблюдали во всех вариантах опыта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kadar I., Ragalyi P. Effect of fertilization and liming on crop responses // Proceed. 43rd Croatian and 3rd Inter. Symp. on Agriculture. Opatija, Croatia, 2008. P. 531–534.

2. Шильников И.А., Гришин Г.Е., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Курносова Е.В. Экологически безопасные и энерго-ресурсосберегающие приемы известкования почв в земледелии // Нива Поволжья. 2010. № 2 (15). С. 40–44.
3. Якушев В.П., Осипов А.И., Миннулин Р.М., Воскресенский С.В. К вопросу об известковании кислых почв в России // Агрофизика. 2013. № 2. С. 18–22.
4. Yuan Li, Song Cui, Scott X. Chang, Qingping Zhang Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis // J. Soil. Sedi- ment. 2019. V. 19. № 3. P. 1393–1406.
5. Jelic M., Dugalic G., Milivojevic J., Djekic V. Effect of liming and fertilization on yield and quality of oat (*Avena sativa* L.) on an acid luvisol soil // Roman. Agricult. Res. 2013. № 30. P. 249–258.
6. Holland J.E., Bennett A.E., Newton A.C., White P.J., McKenzie B.M., George T.S., Pakeman R.J., Bailey J.S., Fornara D.A., Hayes R.C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review // Sci. Total Environ. 2018. V. 610–611. P. 316–332.
7. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Морачевская Е.В. Влияние длительного применения удобрений и известкования на биологические свойства почвы // Пробл. агрохим. и экол. 2014. № 1. С. 3–9.
8. Шильников И.А., Лебедева Л.А. Известкование почв. М.: Агропромиздат, 1987. 170 с.
9. Шильников И.А., Сычев В. Г., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИ-ИА, 2008. 340 с.
10. Минеев В.Г. Агрохимия: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, КолосС, 2004. 720 с.
11. Fageria N.K., Nasciente A.S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production // Advan. Agron. 2014. V. 128. P. 221–275.
12. Приемы повышения плодородия почв (известкование, фосфоритование, гипсование): научн.-метод. рекоменд. М.: Росинформагротех, 2021. 116 с.
13. Витковская С.Е. Методы оценки эффективности и экологической безопасности и химических мелиорантов. СПб.: АФИ, 2017. 76 с.
14. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия, 2016. № 7. С. 3–11.
15. Витковская С.Е., Яковлев О.Н. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе почва–растение // Агрохимия. 2017. № 11. С. 44–51.
16. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф., Яковлев О.Н. Продуктивность растений ячменя и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва–растение при нейтрализации кислотности почвы доломитовой мукой // Агрохимия. 2020. № 1. С. 50–57.
17. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Динамика кислотности дерново-подзолистой почвы в зависимости от дозы известкового мелиоранта // Агрофизика, 2021. № 1. С. 1–6.
18. Витковская, С.Е. Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов. СПб.: АФИ, 2011. 52 с.
19. Германович Т.М., Царук И.А. Продуктивность и качество гороха в зависимости от известкования и доз калийных удобрений при возделывании на слабокислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Почвовед. и агрохим. 2009. № 1 (42). С. 144–155.
20. Velykis A., Satkus A., Masilionyte L. Effect of tillage, lime sludge and cover crop on soil physical state and growth of spring oilseed rape // Zemdirbyste–Agriculture. 2014. V. 101. № 4. P. 347–354.

Liming Impacts of Light Loamy Sod-Podzolic Soil by Ddolomite on Yield of Agricultural Crops (Results of Long-Term Microfield Experiment)

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#} and K. F. Shavrina^b

^aRussian State Hydrometeorological University
Voronezhskaya ul. 79, Saint-Petersburg 192007, Russia

^bAgrophysics Research Institute
Gragsdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

[#]E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

The effect of liming acidic sod-podzolic light loam soil with dolomite flour (dose range 0–2.0 H_a) on the yield of various types of crops (*Vicia sativa* L. and *Avena sativa* L.) was studied. in mixed seeding, *Brassica napus* L., *Vicia faba* L., *Hordeum* L., *Sinapis alba* L., *Pisum sativum* L.) under conditions of a multi-year precision microfield experiment for 10 years. It was found that the use of dolomite flour (DF) had a positive effect on the yield of agricultural crops for a long period of at least 10 years; the long-term positive effect was manifested even with the use of small doses of the drug (up to 0.4 H_a). The use of DF in doses of 0.7–2.0 H_a may lead to a decrease in the yield of certain types of crops compared with lower doses.

Key words: liming, sod-podzolic light loamy soil, dolomite flour, crop yield, a long-term microfield experiment.

УДК 631.46:631.416.1:631.51(470.32)

РАЗВИТИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ, СВЯЗАННЫХ С ЦИКЛОМ АЗОТА, ПРИ МИНИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ И ПРЯМОМ ПОСЕВЕ В ПОЧВЕННО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЮГО-ВОСТОКА ЦЧР

© 2022 г. В. М. Гармашов^{1,*}, Л. В. Гармашова¹¹Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева

Каменная Степь 397463 Воронежская обл.,

Таловский р-н, пос. 2-го участка Института им. В.В. Докучаева, квартал 5, 81, Россия

*E-mail: garmashov.63@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2021 г.

После доработки 07.07.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

В многолетнем исследовании развития групп микроорганизмов, связанных с циклом азота, проведенных с целью изучения направленности изменения почвенных процессов при минимизации обработки почвы, показано, что в почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР в зернопропашном севообороте существует общий тренд на снижение активности этих микроорганизмов с нарастающим эффектом. Наиболее значительная депрессия микробиологических процессов, характерная для развития нитрифицирующих бактерий, так и колоний азотобактера, отмечена при прямом посеве.

Ключевые слова: минимизация обработки почвы, поверхностная обработка, прямой посев, нитрифицирующие микроорганизмы, азотобактер, чернозем обыкновенный.

DOI: 10.31857/S000218812204007X

ВВЕДЕНИЕ

Обработка почвы – одна из наиболее затратных операций в технологии выращивания культур. В современных агротехнологиях на обработку почвы приходится до 40% энергетических затрат и порядка 25% трудовых [1–4]. В настоящее время в современном земледелии значительное распространение получают экономичные энергосберегающие технологии обработки почвы. Востребованность минимизации обработки почвы обусловлена ростом цен на энергоносители и необходимостью снижения затрат на производство сельскохозяйственной продукции. Поэтому в последние годы в науке и производстве возрастает интерес к минимизации обработки почвы, вплоть до перехода на систему No-till – прямому посеву. При этом разноречивость существующей научной информации, касающейся эффективности минимизации обработки почвы и особенно использования прямого сева, усиливает остроту проблемы и является актуальным вопросом современного земледелия [5–10].

Исследователи практически во всех почвенно-климатических зонах отмечали, что при минимизации обработки почвы и особенно при прямом

посеве создается дефицит минерального азота, усиливается дифференциация пахотного слоя по содержанию подвижного фосфора, возрастает пестицидная нагрузка, негативно влияющая на биогенность почвы и экологическую ситуацию в агроландшафтах [11–16].

По мнению многих исследователей, биологическая активность почвы является одним из чувствительных показателей, характеризующих изменения плодородия почв и их экологического состояния, т.к. микроорганизмы наряду с активным участием в формировании плодородия исключительно чутко реагируют на изменения, происходящие в почвенной среде [17–22].

Поскольку микробиота почвы активно реагирует на изменения, происходящие в почвенной среде, поэтому изучение и оценка показателей микробиологической активности почвы позволяют на начальных этапах изучения агротехнических приемов установить направленность почвенных процессов, и мониторинг изменений почвенной микрофлоры является актуальным и практически значимым.

Цель работы – изучение динамики и направленности развития микроорганизмов, связанных

с циклом азота (нитрифицирующих бактерий и азотобактера) при минимизации обработки почвы и прямом севе.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в Воронежском ФАНЦ им. В.В. Докучаева в стационарном опыте по поиску наиболее рациональных приемов и систем обработки почвы в севообороте, обеспечивающих сохранение плодородия почвы и высокую продуктивность сельскохозяйственных культур.

Опыт заложен на черноземе обыкновенном среднегумусном тяжелосуглинистом, с благоприятными физическими и агрохимическими характеристиками слоя 0–30 см: содержание гумуса (по Тюрину в модификации Симакова, ГОСТ 2613-91) – 6.48%, общего азота (по Гинзбург) – 0.36%, общего фосфора (по Гинзбург и Щегловой) – 0.35%, общего калия (по Ожигову) – 1.85%, азота гидролизуемого (по Тюрину и Кононовой) – 61.2 мг/кг почвы, суммы поглощенных оснований (ГОСТ 27821-88) – 66.4 мг/кг почвы, pH_{KCl} 6.99, гидролитическая кислотность – 0.57 мг-экв/100 г почвы.

Мониторинговые наблюдения за изменением микробиологической активности почвы проводили на протяжении 7-ми лет с 2014 по 2020 г. в вариантах обработки почвы в севообороте: традиционная обработка почвы – вспашка на глубину 20–22 см (контроль), поверхностная обработка на глубину 6–8 см и нулевая обработка почвы – прямой посев. Приемы обработки почвы изучали в севообороте: горох – озимая пшеница – кукуруза на зерно – ячмень – однолетние травы – озимая пшеница – подсолнечник – ячмень.

Изучение изменения микробоценоза почвы проводили в рамках выполнения госзадания. Для анализов отбирали репрезентативные смешанные почвенные образцы в каждом варианте из слоя 0–20 см. Учет численности групп микроорганизмов проводили классическим методом посева на агаризованные селективные питательные среды различного состава по методике Теппер [23] в свежееотобранных образцах, хранившихся не более 24 ч при температуре 5°C. Численность нитрифицирующих бактерий учитывали на выщелоченном агаре с аммонийно-магниевой солью фосфорной кислоты, азотобактер – на почвенных пластинах.

Обработку экспериментальных данных проводили дисперсионным методом математического анализа с использованием программного обеспечения ПК Microsoft Office Excel 2016.

Метеорологические условия в годы проведения исследования различались между собой по температурному режиму и количеству выпавших осадков, но в среднем за годы опыта были близкими к типичным для юго-востока ЦЧР, что позволило достаточно объективно оценить действие изученных факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучили динамику развития наиболее важных в агрономическом отношении групп микроорганизмов, связанных с циклом азота, – нитрифицирующих бактерий и азотобактера.

Физиологические особенности различных видов нитрифицирующих бактерий и их отношение к различным факторам внешней среды позволили считать, что азотный режим и плодородие почвы определяются развитием этих микроорганизмов, т.к. они принимают активное участие в мобилизации азота в почве, окисляя аммиачные соли до солей азотной кислоты, являющихся компонентами минерального питания растений.

Нитрифицирующие бактерии весьма чувствительны к среде обитания – водному, воздушному, питательному и тепловому режимам, содержанию в почве органического вещества [24–26]. Поскольку окисление аммиака в азотистую, а затем в азотную кислоту происходит при участии молекулярного кислорода, изменение физических свойств почвы и особенно аэрации оказывает хотя и опосредованное, но существенное влияние на интенсивность развития нитрифицирующих бактерий.

Полученные результаты показали, что интенсивность развития данной группы микроорганизмов зависела от гидротермических условий вегетационного периода, высеянной культуры и обработки почвы (рис. 1). На фоне значительных амплитудных изменений нитрификационной активности почвы по годам, обусловленной прежде всего различиями агрометеорологических условий лет проведения исследований и сменой культур севооборотного агроценоза, действие изученных приемов обработки почвы проявлялось в виде тенденции. В почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧЗ более высокая влагообеспеченность вегетационного периода снижала интенсивность развития нитрифицирующих бактерий в почве, о чем свидетельствовала направленность связи при расчете коэффициента корреляции. При этом в почве пашни коэффициент корреляции между гидротермическим коэффициентом периода вегетации и активностью нитрифицирующих бактерий составлял $r = -0.85$, при поверх-

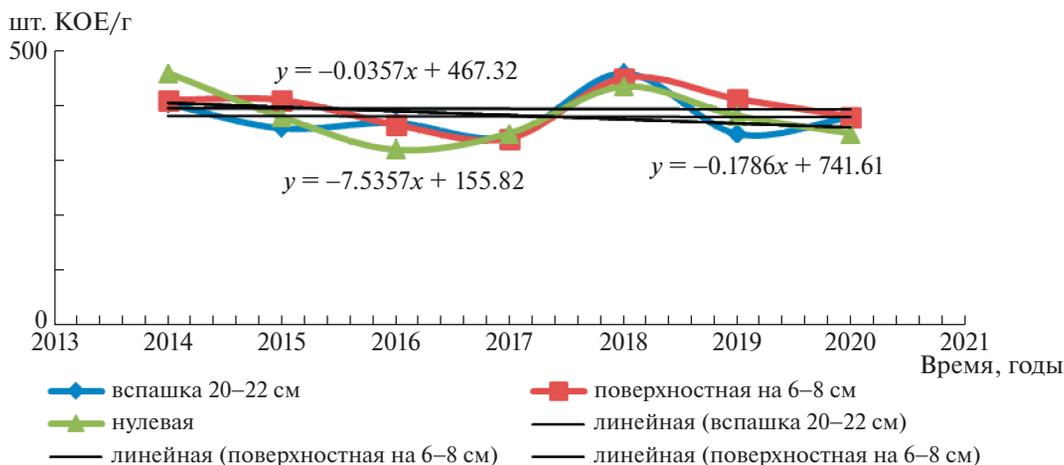


Рис. 1. Развитие нитрифицирующих бактерий в слое 0–20 см почвы при различных приемах и системах обработки почвы в севообороте.

ностной обработке почвы – $r = -0.42$, при нулевой обработке связь была наименее тесной – $r = -0.32$.

Влияние изученных обработок почвы на нитрификационную активность чернозема обыкновенного проявлялось в виде тенденции. Среднегодовая численность нитрифицирующих микроорганизмов мало различалась в вариантах обработок почвы и находилась в пределах 381–395 КОЕ/г абсолютно сухой почвы и незначительно изменялась со временем использования минимизации обработки почвы, о чем свидетельствовали линии тренда и уравнения регрессии. Это было обусловлено хорошими агрофизическими свойствами почвы, на которой проводили исследование.

Наиболее стабильно нитрификационные процессы проходили в обрабатываемой почве, для которой коэффициент вариации этого признака составил $V = 10.5-9.2\%$, тогда как при нулевой обработке развитие нитрифицирующих бактерий в большей мере было подвержено влиянию внешней среды, погодных условий и происходило менее устойчиво, в этом случае коэффициент вариации составил $V = 13\%$.

Анализ динамики изменения нитрификационной активности чернозема во времени, т.е. с учетом нарастающего эффекта действия обработки почвы, показал, что в начале перехода на поверхностную и нулевую обработки в первые 4 года наблюдали большие изменения в развитии нитрифицирующих бактерий, а начиная с 5-го года интенсивность развития этой группы микроорганизмов в меньшей степени зависела от обработки почвы, а в большей мере определялась гид-

ротермическими условиями периода вегетации и агроценозом.

Важным показателем плодородия почвы и благоприятного течения биологических процессов в ней является интенсивность развития азотфиксирующих бактерий. Особое значение среди них принадлежит роду *Azotobacter*, т.к. эти бактерии способны усваивать молекулярный азот непосредственно из воздуха, переводя его в доступные формы для других живых организмов. Азотобактер отрицательно реагирует на ухудшение ценных агрономических свойств почвы, особенно чувствителен к недостатку влаги. Активное развитие этой группы микроорганизмов в почве является одним из показателей уровня ее плодородия и экологического благосостояния [27, 28].

Результаты исследований и статистическая обработка данных развития азотобактера показала, что гидротермические условия вегетационного периода оказывали незначительное влияние на развитие этой группы микроорганизмов в почве (рис. 2). Корреляционная зависимость между численностью азотобактера и гидротермическим коэффициентом была обратной и очень слабой. Коэффициент корреляции имел величину $r = -0.16$ в варианте вспашки и -0.07 – при нулевой обработке. При поверхностной обработке связь между гидротермическим коэффициентом вегетационного периода и развитием азотобактера была прямой и слабой: $r = 0.23$.

Влияние изученных приемов минимизации обработки почвы на развитие азотобактера проявлялось как снижение активности микроорганизма, усиливавшейся с продолжительностью использования обработки. За годы исследования максимальное количество азотобактера было в

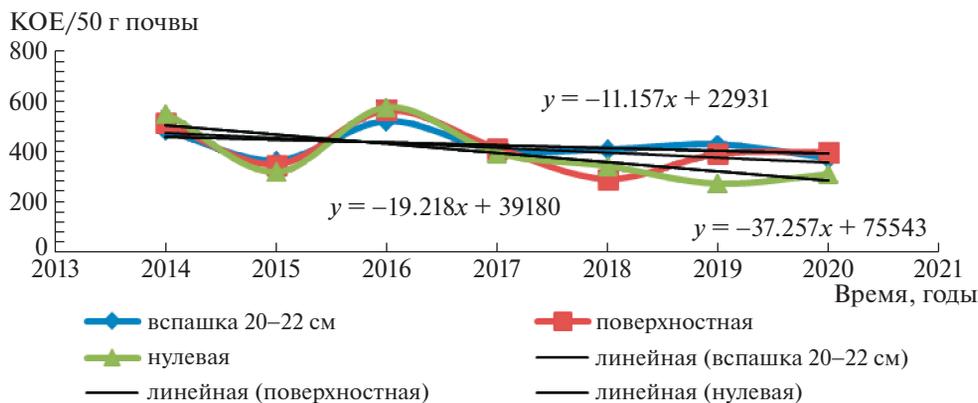


Рис. 2. Развитие колоний азотобактера в слое 0–20 см при применении различных приемов и систем обработки почвы в севообороте.

варианте вспашки и составляло 426,79 КОЕ/50 г почвы, минимальное – при отказе от обработки почвы – 395 КОЕ/50 г почвы. Численность азотобактера при поверхностной обработке чернозема обыкновенного занимала промежуточное положение и составляла 417 КОЕ/50 г почвы. Наиболее стабильно развитие азотобактера в черноземе обыкновенном происходило в варианте вспашки. Коэффициент вариации численности азотобактера по годам при вспашке составил $V = 13.4$, при поверхностной обработке – 22.5, тогда как при нулевой обработке этот показатель был равен 30.4%.

При этом наиболее сильная связь между содержанием нитратного азота в почве и интенсивностью развития азотобактера была при нулевой обработке – $r = 0.66$. В обрабатываемой почве азотобактер меньше влиял на обеспеченность почвы нитратным азотом. Связь между этими показателями была менее значимой, коэффициент корреляции находился в пределах 0.41–0.45. При этом коэффициент корреляции между количеством нитрифицирующих бактерий и обеспеченностью почвы нитратным азотом был максимальным при вспашке – $r = 0.54$, что свидетельствовало об оптимизации условий для развития нитрифицирующих бактерий применения в варианте этой обработки почвы.

В динамике развития азотобактера при минимизации обработки чернозема обыкновенного отмечена обратная закономерность по сравнению с развитием нитрифицирующих бактерий. В первые годы опыта интенсивность развития колоний азотобактера мало различалась в зависимости от способа обработки. В последующем, начиная с 4-го года систематического применения поверхностной обработки почвы и прямого сева, стала явно просматриваться тенденция к снижению численности колоний азотобактера в варианте нулевой обработки почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мониторинг развития групп микроорганизмов, связанных с циклом азота в черноземе обыкновенном, при минимизации обработки почвы в зернопропашном севообороте показал, что в почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР прослежен общий тренд на снижение активности этих микроорганизмов, с нарастающим эффектом при усилении минимизации обработки почвы. Наиболее значительная депрессия микробиологических процессов, как развития нитрифицирующих бактерий, так и колоний азотобактера, была отмечена в варианте без обработки почвы – при прямом посеве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максюттов Н.А., Жданов В.М., Захаров В.П., Лактионов В.С. Ресурсосберегающие приемы в земледелии // Земледелие. 2006. № 6. С. 33–34.
2. Дедов А.В., Трофимова Т.А., Болучевский Д.А. Совершенствование основной обработки почвы в ЦЧР // Земледелие. 2013. № 6. С. 5–7.
3. Кузыченко Ю.А., Кулинцев В.В., Кобозев А.К. Эффективность обработки почвы в севооборотах на различных типах почв Центрального Предкавказья // Земледелие. 2017. № 4. С. 19–21.
4. Гармашов В.М., Гармашова Л.В. Биологическая активность чернозема обыкновенного при освоении технологии No-till // Международ. научн.-исслед. журн. 2020. № 12 (102). Ч. 1. С. 131–136.
5. Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Коротких Н.А. Разработка технологии No-Till на черноземе выщелоченном лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2011. № 5. С. 20–22.
6. Кирюшин В.И. Проблема минимизации обработки почвы: перспективы развития задачи исследования // Земледелие. 2013. № 7. С. 3–6.
7. Коротких Н.А., Власенко Н.Г., Костючик С.П. Влагодобеспеченность яровой пшеницы при техноло-

- гии No-till в лесостепи Приобья // Земледелие. 2013. № 3. С. 21–23.
8. Гилев С.Д. Эффективность прямого посева в Зауралье // Земледелие. 2014. № 6. С. 19–22.
 9. Дридигер В.К., Стукалов Р.С. Оценка no-till технологии выращивания озимой пшеницы в сравнении с традиционной в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 10. С. 39–42.
 10. Дорожко Г.Р., Власова О.И., Шабалдас О.Г., Зеленская Т.Г. Влияние длительного применения прямого сева на основные факторы плодородия почвы и урожайность озимой пшеницы в условиях засушливой зоны // Земледелие. 2017. № 7. С. 7–10.
 11. Кирюшин В.И. Минимализация обработки почвы: перспективы и противоречия // Земледелие. 2006. № 5. С. 12–14.
 12. Гуреев И.И. Минимализация обработки почвы и уровень ее допустимости // Земледелие. 2007. № 4. С. 25–28.
 13. Беляева О.Н. Система No-till и ее влияние на доступность азота почв и удобрений: обобщение опыта // Земледелие. 2013. № 7. С. 16–18.
 14. Кирюшин В.И. Проблема минимализации обработки почвы: перспективы развития, задачи исследования // Земледелие. 2013. № 7. С. 3–6.
 15. Завалин А.А., Дридигер В.К., Белобров В.П., Юдин С.А. Азот в черноземах при традиционной технологии обработки и прямом посеве (обзор) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1–10. DOI: 10.1134/S0032180X18120146
 16. Notron J.V., Eusebleus J., Notron M., Notron U. Loss and recovery of soil organic carbon and nitrogen in a semiarid agroecosystem // Soil Organic Soc. Amer. J. 2012. № 76 (2). P. 505–514.
 17. Хазиев Ф.Х. Ферментативная активность почв. М.: Наука, 1986. 176 с.
 18. Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв: учебник / Под ред. Д.Г. Звягинцева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1989. 336 с.
 19. Зенова Г.М. Почвенные актиномицеты. М.: Изд-во МГУ, 1992. 81 с.
 20. Шлевкова Е.М. Биологическая активность чернозема южного в зависимости от способа обработки почвы // Почвоведение. 1993. № 3. С. 40–44.
 21. Свистова И.Д. Влияние многолетнего внесения удобрений на почвенно-поглощительный комплекс и микробное сообщество выщелоченного чернозема // Агрохимия. 2004. № 6. С. 16–23.
 22. Джанаев З.Г. Агрохимия и биология почв юга России / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2008. 528 с.
 23. Теплер Е.З., Шильникова В.К., Переверзев Г.Н. Практикум по микробиологии. М.: Колос, 1979. 215 с.
 24. Почвенная микробиология. Пер. с англ. / Под ред. Д.И. Никитишена. М.: Колос, 1979. 316 с.
 25. Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н. Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья (актуальность и состояние проблемы, рабочие гипотезы исследований, сопряженность агрономических и экологических функций, динамики в агроценозах, принципы моделирования и технологии воспроизводства). М.: РАСХН, ВНИПТИУ, 2004. 630 с.
 26. Полянская Л.М., Горбачева М.А., Милановский Е.Ю., Звягинцев Д.Г. Развитие микроорганизмов в аэробных и анаэробных условиях в черноземе // Почвоведение. 2010. № 3. С. 356–360.
 27. Скворцова И.Н., Строганова М.Н., Николаева Д.А. Азотобактер в почвах города Москвы // Почвоведение. 1997. № 3. С. 384–391.
 28. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами. Ростов-н/Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 232 с.

Development of Microorganisms Associated with the Nitrogen Cycle, while Minimizing Tillage and Direct Sowing in the Soil and Climatic Conditions of the South-East of the Central Chernozem Region

V.M. Garmashov^{a,#} and L.V. Garmashova^a

^aVoronezh Federal Agrarian Scientific Center named after V.V. Dokuchaev
Kamennaya Steppe, village of the 2nd section of the V.V. Dokuchaev Institute,
block 5, 81, Voronezh Region, Talovsky district 397463, Russia

[#]E-mail: garmashov.63@mail.ru

In a long-term study of the development of groups of microorganisms associated with the nitrogen cycle, conducted in order to study the direction of changes in soil processes while minimizing tillage, it was shown that in the soil and climatic conditions of the south-east of the Central Asian Republic in the grain crop rotation, there is a general trend to reduce the activity of these microorganisms with increasing effect. The most significant depression of microbiological processes, characteristic of the development of nitrifying bacteria and azotobacter colonies, was noted during direct sowing.

Key words: minimization of tillage, surface treatment, direct sowing, nitrifying microorganisms, azotobacter, ordinary chernozem.

УДК 546.76:631.438.2(470.55)

МИГРАЦИЯ ^{90}Sr В ПОЧВАХ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА (ВУРС)

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

*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

В 6-ти различных почвах (от автоморфных до гидроморфных (темно-серой лесной на дресве плотных пород, серой лесной среднесуглинистой, черноземе выщелоченном, черноземно-луговой солончаковатой, лугово-болотной осолоделой, темно-серой лесной осолоделой) в 20-кратной загрязненности измерены профильные распределения ^{90}Sr для сроков 10–25 лет после аэрогенного загрязнения. Определены физические, химические, физико-химические свойства почв, а также формы нахождения ^{90}Sr (водорастворимой, обменной, необменной), по которым оценены коэффициенты распределения. Профильные распределения ^{90}Sr адекватно описываются динамическими моделями диффузии, конвективной диффузии и диффузии с необратимой сорбцией для каждого срока миграции. Оценки параметров этих моделей миграции составили для коэффициента диффузии $(2-7) \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$, коэффициента конвективной диффузии – немного меньше, скорости направленного переноса вниз – 0.05–0.20 см/год. Оценки диффузионных параметров имели тенденцию к росту с увеличением времени миграции. Показано, что за 25 лет после загрязнения полной фиксации ^{90}Sr в этих почвах не произошло, а оценка срока почти полной фиксации для чернозема выщелоченного составила 730–1460 лет. Найдено, что в этой выборке почв ожидаемая обратная зависимость между скоростью миграции и степенью сорбции ^{90}Sr имеет ограничения.

Ключевые слова: ^{90}Sr , миграция в почвах, сроки миграции, параметры моделей миграции, сорбция, свойства почв, Восточно-Уральский радиоактивный след.

DOI: 10.31857/S0002188122040081

ВВЕДЕНИЕ

Описание миграции долгоживущих осколков деления в почвах математическими моделями стало активно развиваться после испытаний ядерного оружия с глобальным загрязнением почвенного покрова. Это направление научных работ стимулировали также техногенные аварии на ядерных объектах с большими ареалами загрязнения территорий. Основным интерес с точки зрения радиационной опасности представляют ^{90}Sr и ^{137}Cs с периодами полураспада ≈ 30 лет.

Для описания поведения этих радионуклидов в почвах проводили лабораторные опыты по диффузии [1, 2], лизиметрические опыты [3], полевые наблюдения [4–7].

Из динамических математических моделей в основном использовали модели диффузии (в том числе двухкомпонентной) и конвективной диф-

фузии. В полевых многолетних условиях при адекватности этих моделей их параметры отражают влияние и многих других процессов, кроме собственно диффузии и переноса с водой – сорбции и десорбции, переноса радионуклида на мелких почвенных частицах, переноса в корневых системах растений, почвенными животными и т.п. [1].

Распространены представления о связи скорости миграции с величиной и прочностью сорбции, с соотношением более “подвижных” и менее “подвижных” форм радионуклидов в почвах [2, 8]. Однако получение прямых доказательств этих гипотез, особенно для полевых условий, затруднительно.

Цель работы – изучение распределения ^{90}Sr по глубине в различных почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) Кыштымской

аварии 1957 г., оценка параметров моделей миграции и выявление связи их со свойствами почв и сорбционным поведением ^{90}Sr .

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводили на территории ВУРС через 10–25 лет после загрязнения. Один из авторов данной работы (Граковский В.Г.) много лет работал на опытной станции (ОНИС ПО “Маяк”) как сотрудник Почвенного института им. В.В. Докучаева. В данной работе представлены экспериментальные данные его собственных работ, которые он выполнял параллельно с плановыми работами ОНИС.

Было выделено 6 площадок (примерно по 1000 м²) в различных ландшафтах, и на каждой площадке было выкопано по 20 разрезов с отбором образцов почв ненарушенного строения.

Образцы почвы были разрезаны на слои по 2 см, для каждого слоя определяли содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs , влажность, плотность (объемный вес), некоторые физико-химические характеристики почвы, а также (для почвенных горизонтов) содержание водорастворимого, обменного и обменного ^{90}Sr как традиционных показателей оценки подвижности радионуклидов. В настоящей работе обсудили результаты исследования поведения только ^{90}Sr , результаты для ^{137}Cs были опубликованы в [9]. Содержание ^{90}Sr определяли через суммарную β -активность образцов с исключением активности радиоцезия, которая составила 3–5% от суммарной.

В основу модельного описания полученных профильных распределений ^{90}Sr были положены модели диффузии и конвективной диффузии. Наличие множества повторностей на каждой площадке (почве) позволило надежно количественно охарактеризовать не только средние содержания в слоях, но и пространственное варьирование профильных распределений, указать допустимые коридоры концентраций при подгонке (подборе) параметров моделей миграции, а также оценить разброс величин параметров.

Базовым допущением во всех модельных расчетах принято, что параметры моделей миграции существенно не менялись ни по глубине почвы, ни по времени миграции. Это допущение связано с тем, что при многолетнем рассмотрении реальные процессы миграции при периодической смене времен года, температуры и влажности почвы, а также при учете цикличности роста растений и т.п.) происходит усреднение многих даже разнонаправленных отдельных процессов.

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

Процедура подбора оценок параметров моделей миграции была следующей. Для экспериментально найденных средних концентраций ^{90}Sr (в долях от общего содержания) в отдельных слоях почвы рассчитывали интервал величин (± 1 или ± 0.5 среднеквадратичного отклонения), обусловленный точностью измерения и пространственным варьированием. Если величина параметра или сочетания параметров позволяли получить расчетные концентрации, укладывающиеся в этот коридор, то это являлось первым критерием адекватности величин параметров и самих моделей. Естественно, что учитывали и качественную картину хода концентрации по глубине и времени.

Сопоставимость параметров миграции для 2-х и более сроков позволила с большей надежностью судить об адекватности моделей миграции и их параметров, чем по одному сроку измерения. Это – второй критерий адекватности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и 2 представлены некоторые измеренные свойства почв, в табл. 3 и 4 – содержания форм ^{90}Sr . Для обобщенной характеристики профильных распределений в табл. 1 и 3 рассчитаны медианные величины для каждого показателя. Данные табл. 1 показали, что наибольшая влажность почвы соответствовала лугово-болотной осолоделой почве (площадка 5), хотя понятно, что влажность является краткосрочной характеристикой. Наибольшее содержание обменных и водорастворимых Са и Mg найдено в черноземно-луговой солончаковой почве (площадка 4), наименьшее – в серой лесной среднесуглинистой (площадка 2) и в темно-серой лесной осолоделой (площадка 6). Выявлена высокая ($r = 0.955$) и значимая (уровень значимости 0.02) корреляция между медианными величинами обменных и водорастворимых форм Са и Mg.

Отмечено (табл. 3) довольно слабое изменение (уменьшение) средней доли водорастворимого ^{90}Sr по глубине почв. Наибольшая ее доля выявлена на площадках 5 и 6, наименьшая – на площадках 2 и 3. Высокая и значимая корреляция медианных величин этого показателя найдена с медианными параметрами весовой и объемной

Таблица 1. Некоторые свойства почв экспериментальных площадок

Глубина, см	Влажность весовая	Влажность объемная	Водорастворимые		Обменные	
	%		Ca	Ca + Mg	Ca	Ca + Mg
			мг-экв/кг			
Площадка 1. Почва темно-серая лесная на дресве плотных пород, южный склон пологого холма, луг ковыльно-разнотравный						
0–2	59.6	17.9	–	–	–	–
2–4	47.5	28.5				
4–6	32.0	25.0				
6–8	25.8	23.5				
8–10	19.6	19.2				
10–12	15.0	16.1				
12–14	11.9	13.6				
14–16	10.5	12.6				
16–18	10.2	12.9				
Медиана	20	18				
Площадка 2. Почва серая лесная среднесуглинистая, лес						
0–2	70.0	21.7	17.2	19.4	357	457
2–4	50.0	27.5	8.0	9.4	270	360
4–6	35.5	23.1	3.4	4.6	200	250
6–8	25.8	19.9	3.0	4.2	180	220
8–10	21.5	18.7	2.6	3.6	180	210
10–12	18.2	18.9	2.4	3.4	180	210
12–14	15.8	16.9	2.3	3.0	180	210
14–16	14.4	15.8	2.3	3.0	170	200
16–18	14.0	16.2	2.3	3.0	160	180
18–20	14.0	17.2	2.3	3.0	160	180
20–22	14.2	17.6	2.3	3.0	170	190
22–24	14.7	18.4	2.3	3.0	180	200
Медиана	17	19	2.4	3.2	180	210
Площадка 3. Почва – чернозем выщелоченный, залежь						
0–2	21.7	17.4	6.7	10.0	320	410
2–4	22.1	20.3	5.6	7.7	300	350
4–6	22.3	21.0	4.8	6.8	300	350
6–8	22.2	21.3	4.0	5.6	300	350
8–10	21.4	21.0	4.0	5.3	300	350
10–12	20.3	20.1	4.0	5.0	300	350
12–14	19.1	19.5	3.9	4.9	300	350
14–16	18.0	18.4	3.9	4.9	300	350
16–18	17.2	17.5	3.8	4.8	300	350
Медиана	21	20	4.0	5.3	300	350
Площадка 4. Почва черноземно-луговая солончаковатая						
0–2	65.0	24.7	10.0	15.4	692	890

Таблица 1. Окончание

Глубина, см	Влажность весовая	Влажность объемная	Водорастворимые		Обменные	
	%		Ca	Ca + Mg	Ca	Ca + Mg
			мг-экв/кг			
2–4	57.3	29.8	9.5	14.2	452	547
4–6	48.7	36.0	6.8	10.0	446	525
6–8	40.6	35.3	6.0	8.4	434	482
8–10	36.8	34.6	5.2	7.6	408	464
10–12	34.7	33.0	5.2	7.6	400	455
12–14	33.9	32.5	5.0	7.0	400	455
14–16	33.4	32.4	5.0	7.0	400	455
16–18	33.1	32.1	5.0	7.0	400	455
18–20	33.1	32.4	5.0	7.0	400	455
20–22	33.0	33.3	5.0	7.0	400	455
22–24	33.0	33.3	5.0	7.0	400	455
Медиана	33	32	5.0	7.0	400	455
Площадка 5. Почва лугово-болотная осолодевая						
0–2	140	63.0	6.8	8.1	409	490
2–4	99.0	58.4	6.0	8.1	232	284
4–6	74.8	61.3	4.2	5.5	215	264
6–8	61.7	55.5	3.7	5.0	198	244
8–10	54.2	53.1	3.6	4.7	200	240
10–12	48.3	51.2	3.6	4.7	179	223
12–14	43.6	46.7	2.5	3.0	152	182
14–16	40.1	43.3	2.5	3.0	191	231
16–18	37.5	40.5	2.5	3.0	215	266
18–20	35.5	38.3	2.5	3.0	230	277
20–22	33.6	36.3	2.5	3.0	230	277
22–24	32.0	34.6	2.5	3.0	230	277
24–26	30.7	33.5	2.5	3.0	230	277
26–28	29.5	33.0	2.5	3.0	230	277
Медиана	42	45	2.5	3.0	220	270
Площадка 6. Почва темно-серая лесная осолодевая						
0–2	110	31.9	10.4	12.6	471	542
2–4	76.0	38.8	5.9	7.6	235	286
4–6	52.6	40.5	3.7	4.3	176	233
6–8	44.0	37.0	3.2	3.8	162	219
8–10	37.9	35.3	2.6	3.2	150	200
10–12	32.7	33.0	2.6	3.2	101	141
12–14	28.3	29.2	2.2	2.8	83	120
14–16	25.2	26.7	2.2	2.8	75	98
16–18	23.5	25.4	2.2	2.8	71	93
Медиана	38	33	2.6	3.2	150	200

Таблица 2. Характеристики почв площадок по генетическим горизонтам

Площадка, №	Горизонт	Глубина, см	Ил	Физическая глина	Валовое содержание на прокаленную навеску			Водная вытяжка		Обменные				H _T	pH _{H₂O}	Гумус, %	Объемная влажность, %
					K ₂ O	CaO	Ca ²⁺	K ⁺	Ca	Mg	K						
%																	
мг-экв/кг																	
1	A1	1-20	17.0	42.6	0.58	6.55	6.0	0.3	210	70	3.2	89	6.2	3.0	0.28		
	B	20-40	18.2	40.2	0.48	6.41	2.8	0.1	146	48	1.7	22	6.0	2.2	0.28		
	BC	40-56	16.9	38.3	0.60	5.91	4.0	0.2	126	49	1.5	7	6.0	0	0.26		
2	A0	0-2	—	—	—	—	18.0	1.5	360	100	5.6	53	5.7	—	—		
	A1	2-23	21.6	43.4	1.11	4.44	5.6	0.3	220	80	3.0	31	5.7	3.4	0.32		
	B	23-50	32.5	51.7	1.54	5.02	2.6	0.1	206	52	3.6	27	5.8	1.0	0.38		
	BC	50-65	19.0	54.5	1.66	6.91	2.5	0.1	126	40	1.3	21	5.6	0.4	0.29		
	C	65-140	12.7	32.3	0.9	11.4	2.0	0.1	202	56	1.3	14	5.8	—	0.23		
3	A0	1-5	31.8	47.5	—	—	7.0	1.5	330	80	11.8	31	6.0	7.6	—		
	A1	5-37	33.0	47.2	1.80	3.17	5.2	0.2	290	90	5.1	30	6.6	6.8	0.43		
	A1B	37-53	31.7	47.2	—	—	4.0	0.2	368	53	5.4	13	6.7	2.3	0.42		
	B	53-83	30.1	46.6	1.45	2.81	4.6	0.2	339	61	4.6	7	7.0	1.1	0.40		
	Bк	83-128	32.8	55.0	1.30	12.1	6.2	0.2	340	63	4.9	3	8.0	0.3	0.43		
	Ск	128-150	22.9	40.6	—	—	5.6	0.2	233	52	1.4	3	8.4	—	0.34		
	Ск	150-180	13.7	28.5	0.73	8.81	4.6	0.2	277	55	1.3	3	8.0	—	—		
	A0	1-3	13.1	26.8	—	—	11.8	2.8	315	67	14.8	100	5.5	7.8	—		
4	A1	3-35	20.0	41.1	1.64	3.02	6.5	0.3	250	70	4.4	18	7.0	6.4	0.30		
	A2	35-50	12.6	31.0	1.46	2.53	2.9	0.3	34	11	2.0	5	7.3	1.1	0.26		
	B	50-85	29.4	42.4	1.55	2.60	2.6	0.3	91	29	5.6	10	7.0	0.7	0.36		
	BC	85-130	16.9	35.4	—	—	2.0	0.3	97	40	5.9	9	6.9	0.6	0.27		
	C	130-140	16.5	29.2	1.44	2.91	2.1	0.6	57	28	4.6	13	6.3	0.3	—		
	A0	0-1	29.4	50.5	—	—	53.8	5.4	655	129	14.3	48	5.8	15.1	—		
	A1	1-30	31.6	49.9	2.15	2.54	3.8	0.2	250	100	4.4	32	6.6	7.9	0.42		
	A2	30-42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.41		
5	B	42-56	31.3	46.9	1.93	2.07	2.8	0.2	186	110	5.9	6	7.3	1.6	0.28		
	Bк	56-82	15.8	34.5	—	—	5.0	0.2	115	102	2.0	2	8.3	0.6	0.23		
	C1	82-100	11.1	29.8	—	—	5.3	0.2	80	60	2.1	2	8.4	0.2	—		
	C2	100-150	6.6	18.2	2.40	2.92	2.2	0.3	49	33	1.3	1	8.7	0.1	—		
	A0	0-3	—	—	—	—	41.1	3.1	430	80	16.7	82	6.0	—	—		
	A1	3-24	26.3	64.5	1.11	1.22	4.3	1.5	135	45	9.4	73	6.0	4.6	0.36		
	A2	24-39	22.4	48.9	1.11	1.22	1.0	0.4	43	8	5.9	36	5.8	1.1	0.32		
	BC1	39-80	25.3	62.8	—	—	0.7	0.2	71	10	6.2	48	5.4	0.8	0.35		
6	C	80-115	13.8	52.8	—	—	0.6	0.1	71	31	5.1	32	5.8	0.6	0.30		
	C	115-135	15.5	54.0	0.08	0.12	1.0	0.2	48	16	2.8	16	6.0	0.4	—		

Примечание. H_T – гидролитическая кислотность, прочерк – отсутствие данных.

Таблица 3. Содержание водорастворимого ^{90}Sr , % от валового

Слой, см	Площадки, №					
	1	2	3	4	5	6
0–2	2.8	1.2	1.2	2.0	3.8	3.2
2–4	2.4	1.1	1.0	1.9	3.8	2.6
4–6	2.0	1.1	0.9	1.8	3.8	2.3
6–8	1.8	1.0	0.8	1.7	3.9	2.2
8–10	1.6	1.0	0.8	1.7	3.9	2.1
10–12	1.6	1.0	0.8	1.7	3.8	2.0
12–14	1.6	1.0	0.8	1.7	3.8	1.9
14–16	1.6	1.0	0.8	1.7	3.7	1.9
16–18	1.6	1.0	0.8	1.7	3.6	1.9
18–20	1.6	1.0	0.8	1.7	3.5	1.9
20–22	–	1.1	–	1.7	3.4	–
22–24	–	1.1	–	–	3.3	–
24–26	–	1.1	–	–	3.2	–
26–28	–	–	–	–	3.1	–
28–30	–	–	–	–	3.0	–
Медиана	1.6	1.0	0.8	1.7	3.7	2.05
K'	62	90	120	58	32	52

Примечания. 1. Прочерк – отсутствие данных. 2. K' – рассчитанный по медиане безразмерный коэффициент распределения.

влажности (0.887 и 0.05, 0.972 и 0.01 соответственно), с формами Са и Mg эта связь была нелинейной или неопределенной.

На рис. 1, 2 представлены примеры усредненных профилей распределения плотности почв и ^{90}Sr для площадок, в табл. 5 – соответствующие коэффициенты вариации, отражающие варьиро-

вание внутри площадок. В целом относительное варьирование плотности почв уменьшалось, содержание ^{90}Sr – увеличивалось с глубиной.

Почти на всех площадках пространственное варьирование содержания ^{90}Sr было значительно больше, чем плотности почв. Сопоставили группировки профилей содержаний ^{90}Sr и профилей плотности почв на всех площадках (дендрограммы сходства). Получили, что связь между этими двумя группировками (по Гудману и Краскалу) – слабая и незначимая. Таким образом, не видно оснований полагать, что варьирование профильных распределений ^{90}Sr внутри площадок как-то существенно связано с варьированием плотности почв.

Для всех площадок, кроме 3-й (чернозем выщелоченный, залежь) почвы в верхних слоях (0–4(6) см) сильно разрыхлены (рис. 1). Вопрос в том, как это учесть при модельном описании миграции? Напрашивающийся подход – считать верхние слои почвы отличающимися от более глубоких слоев по своим миграционным характеристикам, а это – 2-слойная задача миграции из мгновенного источника загрязнения на поверхности почвы. (Часто оказывается, что верхний слой – подстилка, а ниже – минеральная почва.) Ввиду математической сложности данного варианта использовали упрощенный вариант: считали почву 2-слойной, но слои эти с одинаковой миграционной характеристикой, т.к. обратное пока не доказано для многолетних полевых условий. При этом изменили начальные и граничные условия: считали, что радиоактивные выпадения за относительно короткий срок (порядка 1-го года) более или менее равномерно распространились в

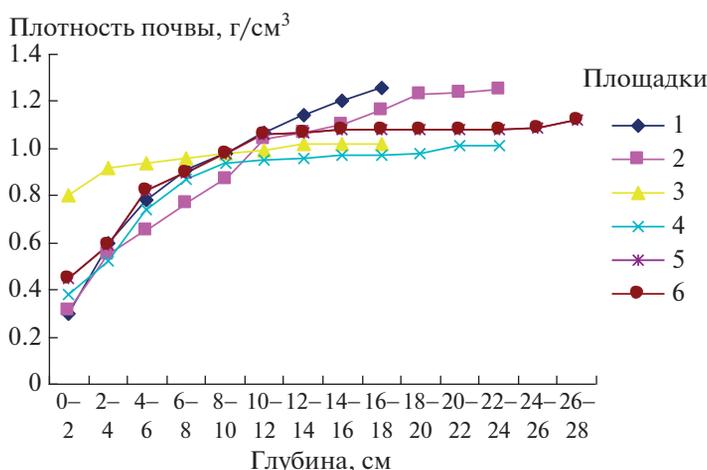
**Рис. 1.** Изменение плотности по глубине почв (средние) на площадках 1–6.

Таблица 4. Формы и коэффициент распределения K_d (суспензия 1 : 10) ^{90}Sr для образцов из генетических почвенных горизонтов

Площадка, %	Горизонт	Глубина взятия образца, см	K_d	Формы ^{90}Sr , % от валового содержания			Коэффициент распределения K , рассчитанный по соотношению форм			
				водорастворимая (1)	обменная (2)	необменная (3)	$\frac{(2)}{(1)}$	$\frac{(3)}{(1)}$	$\frac{(2)+(3)}{(1)}$	$\frac{(3)}{(1)+(2)}$
1	A1	1–20	600	2.2	89.6	8.2	41	3.7	44	0.089
	B	20–40	490	1.3	90.4	8.3	69.5	6.4	76	0.0905
	BC	40–56	450	1.7	90.3	8.0	53	4.7	58	0.087
2	A1	2–4	620	1.0	92.1	6.9	92	6.9	99	0.074
	B	23–50	610	1.4	90.1	8.5	64	6.1	70	0.093
	BC	50–65	470	1.4	91.5	7.1	65	5.1	70	0.076
3	A1	1–5	1800	0.6	92.4	7.0	150	12	170	0.075
	A1B	37–53	1600	0.6	92.1	7.3	150	12	170	0.079
	B	53–83	1900	0.8	92.1	7.1	115	8.9	120	0.076
4	A1	1–3	920	1.8	88.4	9.8	49	5.4	55	0.11
	A2	35–50	250	2.4	89.4	8.2	37	3.4	41	0.089
	B	50–85	430	1.7	84.9	13.4	50	7.9	58	0.15
5	A1	1–5	970	3.5	84.2	12.3	24	3.5	28	0.14
	A2	30–42	450	3.2	85.2	11.6	27	3.6	30	0.13
	B	42–56	510	3.6	84.4	12.0	23	3.3	27	0.14
6	A1	3–24	590	1.8	90.1	8.1	50	4.5	55	0.088
	A2	24–39	290	2.1	91.7	6.2	44	2.95	47	0.066
	BC1	39–80	410	1.7	90.3	8.0	53	4.7	58	0.087

Примечание. При измерении K_d во влажной почве (а не в почвенной суспензии) соотношение $K_d : K = K_d d_0$, где d_0 – удельная масса твердой фазы почвы.

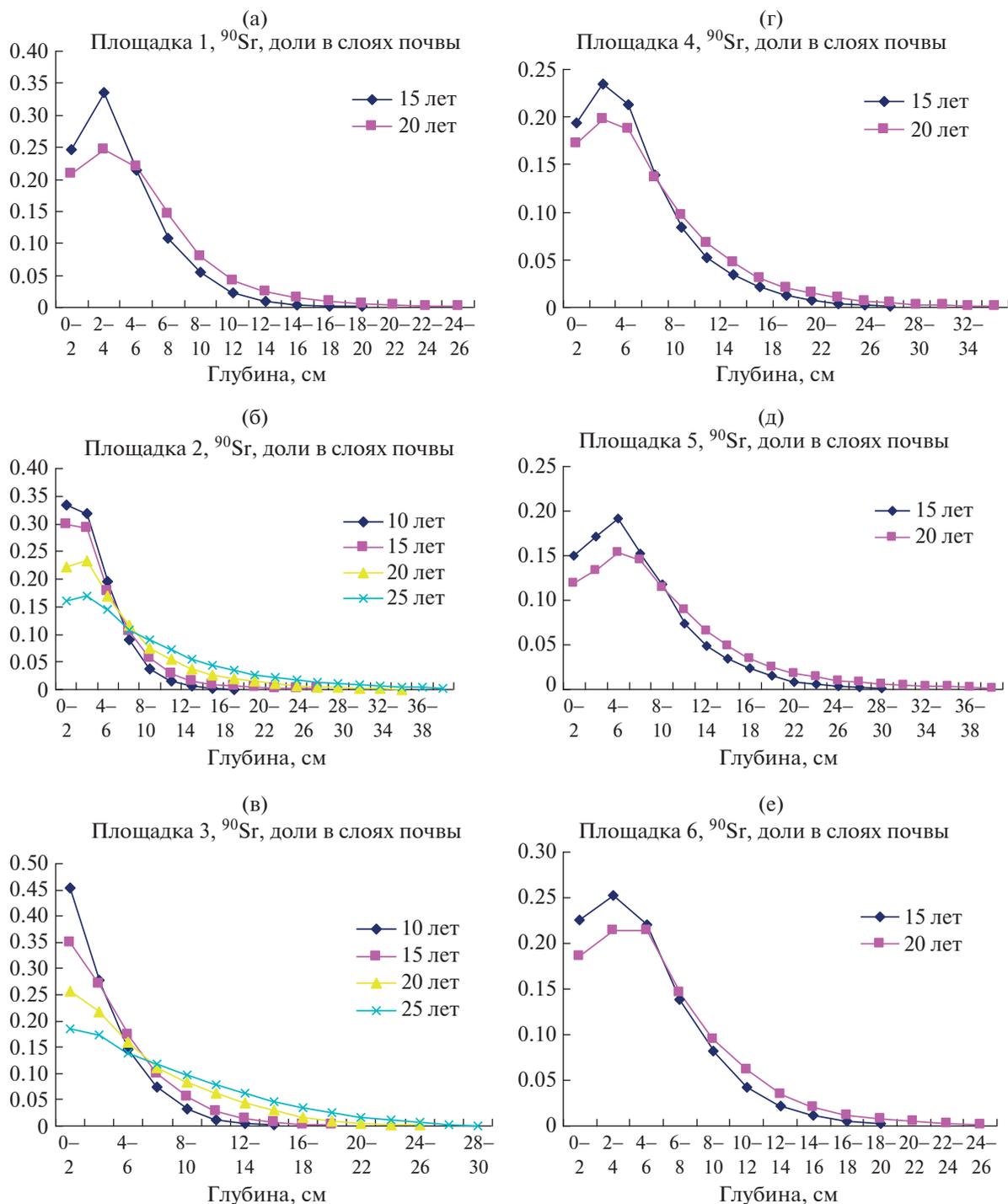


Рис. 2. Содержание ^{90}Sr по глубине почв (средние) на площадках 1–6: (а) – почва темно-серая лесная на древесных породах, (б) – почва серая лесная среднесуглинистая, (в) – чернозем выщелоченный, (г) – почва черноземно-луговая солончаковатая, (д) – почва лугово-болотная осолодевшая, (е) – почва темно-серая лесная осолодевшая.

верхнем слое (0–h см), откуда в дальнейшем мигрировали в более глубокие слои почвы.

Кроме изменения плотности почвы с глубиной, следует обратить внимание на то, что для средних показателей на площадках (как и для

многих отдельных разрезов) концентрация ^{90}Sr имела максимум на глубине 2–4 или 4–6 см, что качественно похоже на конвективную диффузию из мгновенного источника на поверхности, но могла быть связана и с другими причинами (сорб-

Таблица 5. Коэффициенты вариации (%) содержаний ^{90}Sr (% от суммарного содержания в профиле) и плотности (Пл) почвы (кг/дм³)

Глубина, см	Площадки, №																					
	1			2					3				4			5			6			
	Пл	$^{90}\text{Sr}_{15}$	$^{90}\text{Sr}_{20}$	Пл	$^{90}\text{Sr}_{10}$	$^{90}\text{Sr}_{15}$	$^{90}\text{Sr}_{20}$	$^{90}\text{Sr}_{25}$	Пл	$^{90}\text{Sr}_{10}$	$^{90}\text{Sr}_{15}$	$^{90}\text{Sr}_{20}$	$^{90}\text{Sr}_{25}$	Пл	$^{90}\text{Sr}_{15}$	$^{90}\text{Sr}_{20}$	Пл	$^{90}\text{Sr}_{15}$	$^{90}\text{Sr}_{20}$	Пл	$^{90}\text{Sr}_{15}$	$^{90}\text{Sr}_{20}$
0–2	20	14	20	28	15	12	12	19	14	14	16	9.6	19	30	10	2.6	44	24	4.0	28	12	6.4
2–4	26	15	13	30	23	12	7.3	15	12	14	13	6.8	8.5	16	7.2	2.4	32	22	6.8	20	13	15
4–6	32	13	17	25	10	9.2	10	16	12	15	9.8	4.7	12	22	8.1	6.1	22.5	23	5.7	27	12	5.1
6–8	29	30	28	22	26	19	20	15	12.5	14	30	7.1	7.4	18	9.2	3.2	14	11	3.6	29	14	5.5
8–10	24	56	44	20	68	31	31	20	12.5	12	44	10	6.8	16	15	4.6	8.6	20	4.8	25	33	7.9
10–12	19	59	51	15	85	46	44	21	10.5	18	50	16	9.0	15	17	3.5	6.9	31	8.2	17	53	16
12–14	17	64	54	14	77	53	60	17	7.4	20	52	22	8.1	13	21	11	7.8	51	13	14	67	21
14–16	15	54	53	12	100	59	50	24	7.4	40	49	27	18	11	25	9.7	7.6	65	9.6	10	69	35
16–18	14	50	59	9.5	60	66	26	18	7.4	–	47	26	11	11	28	26	7.4	74	13	7.6	65	32
18–20	12	39	48	6.5	–	59	85	30	1.4	–	32	21	17	9.3	29	24	7.4	82	24	7.6	100	53
20–22	–	–	57	6.5	–	50	69	17	–	–	–	27	11	4.7	31	20	7.4	80	16	–	–	48
22–24	–	–	60	5.9	–	44	30	13	–	–	–	31	23	4.7	29	26	7.4	83	16	–	–	50
24–26	–	–	60	5.9	–	27	62	24	–	–	–	37	17	4.7	19	12	8.6	91	22	–	–	50
26–28	–	–	–	–	–	–	85	15	–	–	–	–	27	–	–	27	8.4	95	18	–	–	–
28–30	–	–	–	–	–	–	47	19	–	–	–	–	–	–	–	60	8.4	55	23	–	–	–
30–32	–	–	–	–	–	–	55	36	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	28	–	–	–
32–34	–	–	–	–	–	–	50	66	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	20	–	–	–
34–36	–	–	–	–	–	–	–	53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	27	–	–	–
36–38	–	–	–	–	–	–	–	40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	40	–	–	–
38–40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	90	–	–	–
Медиана	19	44	52	14	60	44	47	19	11	14.5	38	18.5	11.5	13	18	11	8.4	55	16	19	43	21

ционный барьер между подстилкой или дерниной и минеральной почвой).

Наконец, на площадке 3 профиль концентрации ^{90}Sr во все сроки имел практически обычную диффузионную картину при мгновенном источнике на поверхности. Это позволило на этой площадке дополнительно использовать модель диффузии с необратимой сорбцией (фиксацией). Естественен вопрос, почему для ^{90}Sr привлечена модель с фиксацией этого радионуклида. Обычно считают, что его сорбция почвами в основном обменная, но при изучении форм ^{90}Sr в почвах (опыты по десорбции) почти всегда находят неизвлекаемую часть [7, 8, 10]. Она имела место и в изученных нами почвах (табл. 4). Поэтому не была отвергнута заранее и эта модель, которая при некотором сочетании величин параметров предполагает практическую остановку миграции через обозримое время.

Соответствующие этим вариантам математические модели взяты из работ [11, 12]. Для всех

площадок оценивали параметры моделей миграции для средних 20-ти разрезов профилей ^{90}Sr , подбирая в зависимости от качественной картины распределения концентрации ту или иную модель из описанных выше или несколько моделей, не противоречащих экспериментальным данным. Результаты представлены в табл. 6–8.

Но прежде попробуем сравнить площадки по скорости миграции ^{90}Sr непосредственно по измеренным данным содержаний. Для этого оценивали глубины, ниже которых прошла половина (50%) мигрирующего вещества, 95% и максимальные измеренные глубины (100%) (табл. 9). Проанализировали эти данные методами дендрогаммы сходства, главных компонент и корреляций. Выяснили, что наибольшие глубины соответствовали площадке 5, где отмечены (как указано выше) наибольшие показатели влажности и содержания водорастворимого ^{90}Sr , а наименьшие – площадкам 1 и 3. К последним примыкала площадка 6.

Таблица 6. Параметры моделей миграции ^{90}Sr в почвах ВУРС, общие для 15 и 20 лет после загрязнения, площадки 1, 4–6

Диффузия из слоя 0–h см			Конвективная диффузия из мгновенного источника	
h, см	$C_0(0-h)$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с} (\text{см}/\text{год})$
Площадка 1. Темно-серая лесная почва на древесных породах, луг				
4	22.5–30	2.1–2.7	1.1–1.65	4.1–4.5 (0.13–0.14)
Площадка 4. Черноземно-луговая солончаковая почва				
4	22.5–23.5	5–6.5	3–5	2 (0.063)
Площадка 5. Лугово-болотная осолодевшая почва				
6	20	6.5	4–5.5	6.5 (0.20)
Площадка 6. Темно-серая лесная осолодевшая почва				
4	22.5–29	3–4	1.5–2.5	4.5 (0.14)

Примечание. $C_0(0-h)$ – начальная концентрация ^{90}Sr в слое 0–h, оценивается совместно с параметрами модели; D и D_k – коэффициенты диффузии ^{90}Sr в диффузионной модели и конвективной диффузии в конвективно-диффузионной модели; V – скорость направленного переноса ^{90}Sr в почве (положительное значение означает перенос вниз). То же в таблицах 7, 8.

Таблица 7. Параметры моделей миграции ^{90}Sr в почвах ВУРС для разных сроков миграции после загрязнения, площадка 2 (почва серая лесная среднесуглинистая)

Срок миграции, годы	Диффузия из слоя 0–4 см		Конвективная диффузия из мгновенного источника	
	$C_0(0-h)$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с} (\text{см}/\text{год})$
10 и 15	22.5	3	2.5–3.5	2 (0.063)
20	20–25	5–6	2.5–3.5	2 (0.063)
25	20–26	6–8	5–6.7	2 (0.063)

Анализ данных табл. 9 с точки зрения влияния времени на глубину миграции при сравнении глубины проникновения, например, для 15 и 20 лет миграции как графическим способом, так и построением уравнения регрессии показал следующее. Если коэффициент регрессии достоверно не отличался от единицы, то сделали вывод о том, что после 15 лет дальнейшее заглубление радионуклида не происходило. В противном случае либо заглубление продолжалось, либо имела место более сложная ситуация. В данном случае получена следующая регрессионная зависимость (использованы все 3 квантиля глубин – 50, 95 и 100%):

$$\text{Гл}(20) = 0.0184 + 1.316 \text{ Гл}(15),$$

где $R^2 = 0.992$, $F = 120.2(17.16)$, $s_b = 0.029$, где $\text{Гл}(20)$ и $\text{Гл}(15)$ – оценки глубин (квантилей) для 20 и 15 лет миграции (табл. 9), s_b – стандартное отклонение для коэффициента регрессии. В данном случае отклонение коэффициента регрессии от 1 в

большую сторону на порядок больше s_b , что означало продолжение миграции на всех площадках.

Рассмотрим полученные параметры миграции. Для площадок 1, 4, 5, 6 величины параметров моделей диффузии и конвективной диффузии одинаковы для сроков миграции 15 и 20 лет, что дополнительно свидетельствует в пользу адекватности обеих моделей. Для площадки 2 оценка параметра диффузионной модели (D) остается постоянной для 10 и 15 лет миграции, а затем возрастает со временем, а для конвективно-диффузионной модели оценка D_k возрастает после 20 лет миграции. Оценка скорости конвективного переноса (V) оставалась постоянной для всех 4-х сроков миграции. Таким образом, с одной стороны, можно в этом случае говорить о большей адекватности конвективно-диффузионной модели по сравнению с диффузионной, а, с другой стороны, можно предполагать какие-то неучитываемые в моделях обстоятельства, вызывающие рост параметров во времени.

Таблица 8. Параметры моделей миграции ^{90}Sr в почвах ВУРС для разных сроков миграции после загрязнения, площадка 3 (чернозем выщелоченный, залежь)

Срок миграции, годы	Диффузия из мгновенного источника	Конвективная диффузия из мгновенного источника		Диффузия из мгновенного источника с кинетикой необменной сорбции	
	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}/\text{с}$ (см/год)	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$
10				600–20 8 5 4 2	500–15 (фикс) 6–9.5 2.4–6.5 2–5 ≤ 1.8
15				600–20 8 5 4 2	470–8 (фикс) 2.7–6.5 1.3–3.5 0.7–3 ≤ 0.9
10 и 15	1.5–2.5	1.4–1.8	1.5 (0.047)		
20				600–20 8 5 4	200–4 (фикс) 1.2–2.5 ≤ 1.5 ≤ 1
25				600–20 8 6 5	123–2.5 (фикс) 0.3–1 ≤ 0.7 ≤ 0.3
20 и 25	4.2–4.8	3.5	1.5 (0.047)		

Примечание. L_1 – диффузионный параметр, относящийся к диффундирующей части вещества и частям почвы, где происходит диффузия; β – константа скорости необменной сорбции диффундирующего вещества; (фикс) означает, что при этих величинах параметров и сроков миграции все вещество должно быть фиксировано в профиле почвы, и миграция останавливается.

Таблица 9. Глубина проникновения ^{90}Sr вглубь почв экспериментальных площадок через 10–25 лет после загрязнения (средние 20-ти повторностей распределения), см

Вещество, %	Площадки, №															
	1		2				3				4		5		6	
	15	20	10	15	20	25	10	15	20	25	15	20	15	20	15	20
50	3.5	4.4	3	3.3	4.6	6.8	2.3	3.2	4.3	6	4.7	5.4	5.9	7.2	4.1	4.9
95	9.7	12.8	8.6	11.2	17.8	24.3	8.1	10	15.1	19.1	14	17.4	17	22.4	11.5	13.9
100	20	26	18	26	34	38	16	20	26	30	26	34	30	40	20	26

Подобная ситуация выявилась и для площадки 3: постоянство оценок параметров D и D_k получено на отрезках сроков миграции 10–15 и 20–25 лет, но наблюдался рост при переходе от перво-

го отрезка ко второму. Диффузионная модель с кинетикой необратимой сорбции во всех случаях площадки 3 показала непрерывные полосы сочетаний оценок параметров L_1 и β в рамках первого

критерия адекватности. Поэтому в табл. 8 приведены выбранные нами реперные точки внутри этих полос, позволявшие сопоставить между собой оценки параметров для разных сроков миграции. Верхним ограничением для L_1 была скорость диффузии Sg в разбавленных водных растворах, нижним ограничением – то обстоятельство, что L_1 по смыслу не может быть меньше D и D_k . При $L_1 \geq 20 \times 10^{-8}$ см²/с весь ⁹⁰Sr должен фиксироваться уже к 10 годам, что явно не соответствовало реально видимому заглублению (табл. 9), т.е. более реалистичны оценки $L_1 < 20 \times 10^{-8}$ см²/с.

Чтобы как-то конкретизировать ситуацию, используя возможности модели и экспериментальные данные, подобрали такие сочетания параметров модели (L_1 и β) из допустимого диапазона (табл. 8), при которых расчетная доля необменно-го ⁹⁰Sr в верхних 20 см почвы при сроках миграции 15–20 лет соответствовала экспериментальной величине $\approx 7\%$ (табл. 4). Получилось, что такое соответствие найдено для 15 лет миграции при $L_1 \approx 2 \times 10^{-8}$ см²/с и $\beta \leq 0.2 \times 10^{-9}$ 1/с, а для 20 лет миграции – при $L_1 \approx (4-5) \times 10^{-8}$ см²/с и $\beta \approx 0.1 \times 10^{-9}$ 1/с. Следовательно, эти параметры модели более вероятны из всего возможного диапазона в таблице 8. Найденные оценки β соответствовали времени фиксации 99% радиостронция в 730–1460 лет, что не противоречило имеющимся представлениям о том, что фиксация радиостронция происходит, но довольно медленно. При этом оценки L_1 сравнивались с оценками D и D_k для этих же сроков миграции. Данный результат требует дальнейшего изучения, хотя бы потому что во всех почвах ВУРС со временем возрастает количество фиксированных форм ⁹⁰Sr [6].

Рассмотрим теперь вопрос об ожидаемой связи диффузионных и сорбционных параметров. Из теоретических представлений о диффузии в адсорбирующей среде [1] следует, что чем сильнее сорбция диффундирующего вещества, тем медленнее идет процесс диффузии. Обычно степень сорбции выражают через коэффициент распределения вещества между твердой и жидкой фазами. Одна из моделей коэффициента диффузии в пористой двухфазной среде можно записать [1] следующим образом:

$$D = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\Theta_1 + D_2(l_0/l_2)^2\Theta_2K}{\Theta_1 + \Theta_2K} = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\Theta_1}{\Theta_1 + \Theta_2K} + \frac{D_2(l_0/l_2)^2\Theta_2K}{\Theta_1 + \Theta_2K} = D(I) + D(II),$$

где D – коэффициент диффузии для среды в целом (то, что обычно определяют из эксперимен-

та), D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии в жидкой фазе и в адсорбированном состоянии, Θ_1 и Θ_2 – объемные доли жидкой и адсорбирующей фаз, $(l_0/l_1)^2$ и $(l_0/l_2)^2$ – коэффициенты извилистости диффузии в обеих фазах, K – безразмерный коэффициент распределения между твердой (адсорбирующей) и жидкой фазами. Отметим, что величина D_2 отражает, в том числе, прочность сорбции диффундирующего вещества.

В нашем случае среднюю величину K для почвы можно оценить через медианные величины долей форм ⁹⁰Sr в верхних слоях почв (до 30–40 см), где наблюдали миграцию. Например, для площадки 1 (табл. 3) $K = (100-1.6) / 1.6 = 61.5$ (верхний штрих означает, что K рассчитано по данным табл. 3).

Используем разделение параметра D на 2 составляющие $D(I)$ и $D(II)$, как показано выше. Составляющая $D(I)$ может быть оценена на основе литературных, справочных ($D_1, (l_0/l_1)^2$) и экспериментальных ($\Theta_1, \Theta_2, K, (l_0/l_1)^2$) данных. Тогда для интерпретации результатов может быть применен очевидный критерий: $D(I) < D$. Если это условие выполняется, то оценки величин, входящих в $D(I)$, допустимы, а из разности $D - D(I)$ можно дополнительно оценить величину $D(II)$ и затем $D_2 (l_0/l_2)^2$. В противном случае ситуация более сложная, либо для самой модели, либо для экспериментальных данных.

Применяя этот подход, использовали величину D_1 , равную 6.3×10^{-6} см²/с [13], величины $(l_0/l_1)^2$ на основе работы [14], величины Θ_1 и Θ_2 из наших экспериментальных данных влажности и плотности почв (медианные показатели). Результаты расчетов K и $D(I)$ представлены в табл. 10.

В результате получили, что $D(I) < D$ (допустимый результат) имел место для площадок 2 и 3 (почвы серая лесная среднесуглинистая и чернозем выщелоченный), если для расчета K использовать обменную форму ⁹⁰Sr (отдельно или совместно с необменной). Для площадок 1 и 4 (почвы темно-серая лесная на дресве и черноземно-луговая солончаковатая) результаты получились на грани допустимого, а для площадок 5 и 6 (почвы лугово-болотная осолодевшая и темно-серая лесная осолодевшая) – недопустимыми. Конечно, все эти результаты были в пределах правильности и точности экспериментальных данных и адекватности принятых моделей. Тем не менее, по данным табл. 10, констатируем, что в данном случае привычное представление о соотношении величин K и D ограничено определенными рамками. Естественно, встает вопрос и о том, насколько

Таблица 10. Рассчитанные по экспериментальным данным коэффициенты распределения ^{90}Sr и величины $D(I)$

Параметр	Площадки, №					
	1	2	3	4	5	6
$K(2/1)$	55	64	150	43	27	47
$K(3/1)$	5	6.1	12	4.4	3.6	3.7
$K((2+3)/1)$	60	70	170	48	30	51
$K'((2+3)/1)$	62	90	120	58	32	52
$D(I) \times 10^8 \text{ см}^2/\text{с}$						
- (2/1)	2.6	2.3	1.1	6.2	12	5.9
- (3/1)	27	23	13	52	72	61
- ((2+3)/1)	2.5	2.1	0.97	5.6	11	5.4
- ((2+3)/1)'	2.4	1.65	1.4	4.6	10	5.3
$D \times 10^8 \text{ см}^2/\text{с}$	2.4	3–7	2–4.5	5.8	6.5	3.5
$D_k \times 10^8 \text{ см}^2/\text{с}$	1.4	3–5.9	1.6–3.5	4	4.8	2

ко традиционно определяемые формы ^{90}Sr в разных почвах отражают его миграционную подвижность?

Для диффузионной модели, несмотря на разнообразие почв, размах величин коэффициентов диффузии D находится в пределах одного порядка: от 2×10^{-8} до $7 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$. При этом меньшие параметры соответствовали почвам темно-серой лесной на дресве (площадка 1) и серой лесной среднесуглинистой (площадка 2), а большие – черноземно-луговой солончаковой (площадка 4) и лугово-болотной осолоделой (площадка 5). Промежуточные показатели D найдены для почв темно-серой лесной осолоделой (площадка 6) и чернозема выщелоченного (площадка 3).

При анализе экспериментальных данных с помощью модели конвективной диффузии однозначную закономерность отметили для почв, где пик концентрации был ниже поверхностного слоя 0–2 см (табл. 6, 7). Это были все площадки, кроме 3-й с черноземом выщелоченным. Показатели D_k ожидаемо следовали величинам D и были лишь немного ниже последних. Из этих таблиц следует, что наибольшая средняя скорость конвективного (направленного) переноса вглубь почвы определена для лугово-болотной осолоделой почвы (площадка 5) – 0.20 см/год, меньше – для темно-серых лесных почв – 0.14 (площадки 1 и 6), еще меньше – 0.05–0.06 – для остальных типов почв.

Оценили парные корреляции между показателями D и отдельными характеристиками почв (по медианным величинам последних). Оказалось, что с содержанием водорастворимого ^{90}Sr корреляция >0.7 (но незначимая), а корреляции с влажностью почв составили 0.79 (весовая) и 0.87 (объемная) при слабом (0.10) и нормальном (0.025) уровне значимости соответственно, что соотносилось с ранее известным результатом лабораторных опытов [1]. С другими почвенными показателями корреляции были заметно меньше.

Корреляционный анализ всей совокупности показателей все же позволил построить некоторые частные регрессионные зависимости, представленные ниже (только значимые на уровне 0.05):

$$D \times 10^8, \text{ см}^2/\text{с} = -70.7 + 0.743\text{Ca}_{\text{обм}} - 0.0019\text{Ca}_{\text{обм}}^2 + 4.26\text{K}_{\text{обм}} - 0.00122\text{Sr}_{\text{обм}}^2,$$

где s (ошибка уравнения) = 0.046, R^2 (коэффициент детерминации) = 0.9998. Единицы измерения и диапазоны изменения показателей приведены в табл. 1, 2, 4.

$$D \times 10^8, \text{ см}^2/\text{с} = -7.32 - 0.625\text{Вл.вес.} + 1.46\text{Вл.об.} - 0.0126\text{Вл.об.}^2,$$

где $s = 0.37$, $R^2 = 0.98$, данные влажности – из табл. 1.

$$V \times 10^9, \text{ см}/\text{с} = 10.93 - 11.3\text{Ca}_{\text{вал}} + 5.14\text{Ca}_{\text{вал}}^2 - 0.636 \times 10^{-4}\text{Ca}_{\text{обм}}^2,$$

где $s = 0.37$, $R^2 = 0.986$.

$$V \times 10^9, \text{ см}/\text{с} = 3.3 + 0.71\text{Sr}_{\text{вод}}^2 - 1.53\text{Вл.вес.},$$

где $s = 0.61$, $R^2 = 0.94$, содержание водорастворимого Sr – из табл. 3.

Различные наборы показателей для одного и того же параметра миграции свидетельствовали о неоднозначности (частном характере) полученных зависимостей, одной из причин которых был небольшой объем выборки (всего 6 объектов).

Сопоставим наши результаты с имеющимися в литературе. Сначала сравним с лабораторными диффузионными опытами со ^{90}Sr . Для 2-х исследованных в работе почв (серая лесная среднесуглинистая и чернозем выщелоченный) одним из авторов были получены оценки D $(6.8-8.2) \times 10^{-8}$ и $(2.9-7.5) \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно [15]. Это близко к верхним границам диапазонов величин в настоящей работе. В сводке [16] для водонасыщенной глинистой почвы диапазон D составил $(10-12) \times 10^{-8}$; в работе [17] для близких почв получены параметры D $(6.8-10.7) \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$. Вид-

но, что все эти оценки несколько больше тех, что получены нами для полевых условий.

Для полевых условий чернобыльских выпадений имеются сводки [7, 18, 19]: для конвективно-диффузионной модели оценки D_k составили $(0.16-5.5) \times 10^{-8}$ и $(1-10) \times 10^{-8}$ см²/с; это еще лучше согласовалось с нашими оценками, чем лабораторные опыты. Диапазон оценок V в этих сводках равен 0.06–0.92 см/год, что включало и полученные нами оценки.

ВЫВОДЫ

1. Профильные распределения ⁹⁰Sr для 6 различных почв ВУРС и отдельных сроков миграции от 10 до 25 лет после загрязнения адекватно описываются динамическими моделями диффузии, конвективной диффузии и диффузии с необратимой сорбцией. Оценки параметров этих моделей миграции составили для коэффициента диффузии $(2-7) \times 10^{-8}$ см²/с, коэффициента конвективной диффузии – немного меньше, а скорости направленного переноса вниз – 0.05–0.20 см/год. Наиболее вероятная оценка константы скорости необратимой сорбции (фиксации) для чернозема выщелоченного составила $(0.1-0.2) \times 10^{-9}$ 1/с, что соответствует времени фиксации 99% радиостронция 730–1460 лет.

2. Оценки диффузионных параметров имели тенденцию к росту с увеличением времени миграции, что свидетельствовало о необходимости дальнейшего уточнения моделей.

3. Найдено, что в этой выборке почв ожидаемая обратная зависимость между скоростью миграции и степенью сорбции ⁹⁰Sr реализуется ограниченно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические процессы и моделирование / Под ред. Алексахина Р.М. М.: Энергоатомиздат, 1981. 98 с.
2. Миграция в почве и ее моделирование. Научн. тр. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. 340 с.
3. Squire H.M. Long-term studies of strontium-90 in soils and pastures // *Radia. Bot.* 1966. V. 6. № 1. P. 49.
4. Махонько К.П., Чумичев В.Б. О проникновении некоторых продуктов деления в почву // Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Сб. тр. по агроном. физике. Вып. 18. Л.: Колос, 1969. С. 57–74.
5. Поликарпов Г.Г., Клечковский В.М., Алексахин Р.М. Радиоэкология. М., 1971. 422 с.
6. Казаченок Н.Н. Геоэкология техногенных радиоактивных изотопов: Монография. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 283 с.
7. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с.
8. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. М.: Атомиздат, 1974. 215 с.
9. Граковский В.Г., Фрид А.С. Миграция ¹³⁷Cs в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа // *Агрохимия*. 2021. № 11. С. 72–86. <https://doi.org/10.31857/S0002188121110065>
10. О поведении радиоактивных продуктов деления в почвах, их поступлении в растения и накоплении в урожае / Под ред. Клечковского В.М. М.: АН СССР, 1956. (Перепечатка: “XXXVII радиоэкологические чтения, посвящ. акад. ВАСХНИЛ В.М. Клечковскому. Обнинск, 27 ноября 2008 г. / Под ред. Р.М. Алексахина”). Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2009. С. 83–266.
11. Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. М.: Факториал, 1998. 368 с.
12. Фрид А.С., Граковский В.Г. Диффузия ¹³⁷Cs в почвах // *Почвоведение*. 1988. № 2. С. 78–86.
13. Прохоров В.М., Фрид А.С. Вклад адсорбированных ионов в диффузию ⁹⁰Sr в почвах // *Радиохимия*. 1972. Т. 14. № 4. С. 519–526.
14. Розен Г.А. Использование радиоактивного хлора при определении геометрических характеристик диффузии ионов в почвах // *Физико-химические аспекты плодородия почв Нечерноземной зоны*. Бул. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1984. Вып. XXXI. С. 36–40.
15. Граковский В.Г. Диффузия ионов в почвах // *Техногенное воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля*. Научн. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1991. С. 44–53.
16. Shackelford C.D. Laboratory diffusion testing for waste disposal // *J. Contam. Hydrol.* 1991. № 7. P. 177–217.
17. Прохоров В.М., Баранова З.А., Рыжинский М.В., Фрид А.С., Широков В.Д. Изучение связи между подвижностью ⁹⁰Sr и свойствами почвы методами многомерной математической статистики // *Агрохимия*. 1972. № 4. С. 101–108.
18. Strelb F., Gerzabeck M., Kirchner G., Ehlken S, Bossew P. Vertical migration of radionuclides in undisturbed soils // *Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments*. IAEA, Vienna, 2009. P. 103–122.
19. HandboSok of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technic. Report. Ser. Vienna: IAEA, 2010. № 472.

Migration of ^{90}Sr in the Soils of the East Ural Radioactive Trace (VURS)**V. G. Grakovskiy^a and A. S. Frid^{b, #}**^a*Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Institute"
Pyzhevsky p. 7, p. 2, Moscow 119017, Russia*^b*All-Russian Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, vlad. 5, Moscow region, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia*[#]*E-mail: asfrid@mail.ru*

In 6 different soils (from automorphic to hydromorphic (dark gray forest on dense rocks, gray forest medium loamy, leached chernozem, black-meadow saline, meadow-marsh rejuvenated, dark gray forest rejuvenated), profile distributions of ^{90}Sr were measured in 20-fold repetition for periods of 10–25 years after aerogenic pollution. The physical, chemical, physico-chemical properties of soils are determined, as well as the forms of finding ^{90}Sr (water-soluble, exchangeable, non-exchangeable), according to which the distribution coefficients are estimated. Profile distributions of ^{90}Sr are adequately described by dynamic models of diffusion, convective diffusion and diffusion with irreversible sorption for each migration period. The estimates of the parameters of these migration models were for the diffusion coefficient $(2-7) \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, the convective diffusion coefficient – slightly less, the rate of directional downward transport – 0.05–0.20 cm/year. Estimates of diffusion parameters tended to increase with increasing migration time. It is shown that for 25 years after contamination, complete fixation of ^{90}Sr in these soils did not occur, and the estimate of the period of almost complete fixation for leached chernozem was 730–1460 years. It was found that in this sample of soils, the expected inverse relationship between the migration rate and the degree of sorption of ^{90}Sr has limitations.

Key words: ^{90}Sr , migration in soils, migration timing, parameters of migration models, sorption, soil properties, East Ural radioactive trace.

УДК 632.5

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ АГРОЦЕНОЗОВ

© 2022 г. И. М. Михайленко^{1,*}, В. Н. Тимошин¹¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: Iya.mihailenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.08.2021 г.

После доработки 17.09.2021 г.

Принята к публикации 15.12.2021 г.

Разработаны теоретические основы решения задачи управления состоянием агроценозов, в состав которых входят посевы основной культуры и сорные растения. Решение этой задачи направлено на устранения ограниченности существующей парадигмы раздельного управления состоянием посевов культур и сорной растительности. Внесение минеральных удобрений одновременно стимулирует рост и развитие культурных и сорных растений, а обработки гербицидами одновременно подавляют рост как культур, так и сорных растений. В результате это приводит к существенным потерям урожая и перерасходу удобрений и гербицидов. Предложенная теория и методика основана на учете взаимосвязи состояния посевов культур и сорных растений, и их общее влияние на содержание элементов питания в почве. Для этого предложена система математических моделей, в которых учтены эти взаимосвязи и потери урожая при отклонениях параметров химического состояния почвы от оптимальных показателей для культур севооборота и от влияния обработок гербицидами на посевы культур. Результатом решения задачи являются оптимальные стратегии внесения минеральных удобрений, мелиорантов и гербицидов в годы севооборота. Эти стратегии обеспечивают минимизацию потерь урожая всех культур севооборота и расхода агрохимикатов. Они являются основным инструментом планирования агротехнологий и нормирования технологических операций, реализуемых в отдельные годы севооборота. Полученные результаты являются новыми, т.к. в настоящее время такой инструментарий отсутствует.

Ключевые слова: агроценоз, культура, сорные растения, удобрения, гербициды, стратегическое управление.

DOI: 10.31857/S0002188122030073

ВВЕДЕНИЕ

Переход на цифровизацию и интеллектуализацию сельского хозяйства прежде всего связан с необходимостью автоматизации процессов управления агротехнологиями в точном земледелии (ТЗ). В то же время проблема автоматизации управления агротехнологиями связана с неразвитостью теоретической базы в этой области науки. Отсутствие эффективной теории управления привело к тому, что современная техника ТЗ обладает низкой экономической отдачей, т.к. не обладает эффективными средствами автоматического управления. В то же время при создании такой теории необходимо иметь в виду, что в современной аграрной науке сложилась парадигма раздельного управления состоянием посевов культур за счет оптимизации доз минеральных удобрений и сорных растений — за счет обработки их гербицидами или механических обработок

почвы. При этом не принимается во внимание тот факт, что и культуры, и сорные растения произрастают вместе в составе единого агроценоза, а минеральные удобрения влияют на состояние как культурных, так и сорных растений, а гербициды угнетают не только сорняки, но и посевы возделываемых культур.

В части управления агротехнологиями возделывания культур была разработана общая концепция, согласно которой общая задача управления разделяется на 4 уровня управления, реализуемые в годовом, суточном и часовом масштабе времени [1]. Для каждого уровня была разработана теория управления и апробированы алгоритмы управления, которые могут стать теоретической базой для современных систем ТЗ. Однако такая концепция направлена только на управление состоянием культур и не учитывает тот факт, что в составе агроценоза присутствуют сорные расте-



Рис. 1. Компоненты стратегии борьбы с сорными растениями.

ния, конкурирующие с растениями основного посева за питание и влагу. При этом вынос влаги и элементов питания сорными растениями может превышать вынос культурными растениями, что уменьшает их урожайность до 50%.

Контроль популяции сорных трав (особенно многолетних) является сложной задачей, поэтому для ее решения обычно применяют системный подход, который объединяет несколько управленческих компонентов (мероприятий) в единую стратегию (рис. 1). Эффективная система подавления многолетних сорняков направлена на снижение содержания углеводов в тканях растений, поэтому одним из методов воздействия является механическая обработка почвы. Однако уничтожение и подавление сорняков одними агротехническими методами не дает желаемых результатов. Поэтому для подавления и уничтожения многих видов сорняков широко используют гербициды. По характеру поражения растений гербициды условно делят на гербициды сплошного действия и гербициды избирательного действия. Гербициды избирательного действия составляют наибольшую группу из применяемых в практике земледелия. Они минимально повреждают возделываемые культуры, но уничтожают или подавляют развитие определенных видов сорных растений [2]. Подразделение гербицидов на общеистребительные и избирательные является условным также и потому, что гербициды сплошного действия, чаще используемые в форме добавок в небольших дозах к другим соединениям, применяют в качестве препаратов избирательного действия.

Наличие в составе агроценозов однолетних и многолетних сорных растений значительно усложняет общую задачу управления, что указывает на то, что и в этом случае целесообразна декомпозиция сложной задачи на отдельные уровни управления в соответствии с ранее разработанной концепцией.

Цель работы – дальнейшее развитие стратегического уровня управления агротехнологиями с учетом параметров состояния посевов основных культур в составе севооборотов и многолетних сорных растений [3].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Сначала введем ряд условий и допущений, при которых решается рассматриваемая задача:

- среди всех возможных методов подавления сорной растительности рассматривается только химический метод, где используются гербициды;
- задача решается для выбранного севооборота;
- параметры всех используемых математических моделей априорно известны, т.е. они оценены заранее путем проведения идентификационных экспериментов;
- для каждой культуры используемого севооборота известно оптимальное содержание основных элементов питания и оптимальная величина показателя кислотности;
- снижение потенциального урожая культур происходит за счет отклонения содержания элементов питания растений (химических параметров состояния почвы) от оптимальных показателей, за счет использования гербицидов, а также за счет конкуренции культур с сорняками.

Вербально задача стратегического управления агроценозом формулируется следующим образом. Для последовательности культур в принятом севообороте, с обозначением отдельных культур индексами $j = 1, 2, 3 \dots, N$ найти стратегию внесения основных элементов питания, мелиорантов и обработок гербицидами на заданном поле, обеспечивающую минимизацию потерь суммарного урожая всех культур севооборота, при минимальном расходе ресурсов и при заданных технологических ограничениях. Такими ограничениями могут быть допустимые по экологическим требованиям дозы удобрений, мелиорантов и гербицидов.

При решении задачи стратегического управления необходимо иметь в виду, что в годовом масштабе времени непрерывно изменяется только химическое состояние почвенной среды (ПС) и биомасса многолетних сорняков, а урожаи культур в отдельные годы представляют собой дискретную последовательность величин. При оптимальном сочетании параметров химического состояния ПС урожаи могут достигать своего потенциального уровня, обусловленного другими нерегулируемыми данной стратегией условиями возделывания культур. Для прогнозирования этой величины введем в рассмотрение вектор условий, нерегулируемых на данном уровне управления: $F = [4 \times 1]$, с компонентами: f_1 – сезонная сумма температур, f_2 – сезонная сумма осадков, f_3 – суммарный приток ФАР, f_4 – годовой расход доступных форм азота. Тогда потенциальные уровни урожая для отдельных культур можно определять по следующей математической модели:

$$u_j(T) = B_j^T F(T), \quad (1)$$

где $B_j^T = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5]_j$ – вектор параметров линейной модели потенциального урожая.

При допущении о том, что для каждой культуры используемого севооборота известно оптимальное содержание основных элементов питания и оптимальная величина показателя кислотности, любое отклонение в большую или в меньшую сторону от этих оптимальных показателей приводит к потерям урожая. Кроме того, к дополнительным потерям урожая приводит применение гербицидов. С учетом того, что все вышеуказанные показатели химического состояния почвы действуют одновременно, то будем рассматривать следующую нелинейную форму модели потерь урожая каждой j -й культуры в севообороте:

$$\Delta u_j(T) = k_{1j}^T (V_j^* - V(T)) + (V_j^* - V(T))^T K_{2j} (V_j^* - V(T)) + k_{3j} g(T), \quad (2)$$

где V^* – оптимальная величина вектора химического состояния почвы на заданном поле для j -й культуры севооборота, $V(T)$ – прогнозная величина вектора химического состояния почвенной среды для T -го года севооборота, компонентами которого являются: $v_1 = \text{pH}$, $v_2 = \text{P}$, $v_3 = \text{K}$, $v_4 = \text{Mg}$, P – фосфор, K – калий, Mg – магний; $g(T)$ – прогнозные величины доз гербицидов, $T = 1, 2, \dots, N$ – индексы сельскохозяйственных сезонов во всем рассматриваемом интервале управ-

ления, $\Delta u_j(T)$ – потери урожая для j -й культуры T -го года севооборота, возникающие за счет отклонения вектора химического состояния почвы от оптимальной величины и применения гербицидов;

$k_{1j}^T = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]_j$ – матрица-строка параметров линейной части модели, учитывающей влияние элементов питания;

$$K_{2j} = \begin{bmatrix} k_5 & k_6 & k_7 & k_8 \\ k_6 & k_9 & k_{10} & k_{11} \\ k_9 & k_{10} & k_{12} & k_{13} \\ k_8 & k_{11} & k_{13} & k_{14} \end{bmatrix}_j \quad \text{– матрица параметров}$$

квадратичной части модели;

$k_{3j} = k_{15j}$ – матрица-строка параметров линейной части модели, учитывающей влияние гербицидов.

Каноническая векторно-матричная форма модели (2) неудобна для идентификации, поэтому необходимо ее представить в линейной векторной форме, удобной для оценки неизвестных параметров по экспериментальным данным

$$\Delta u_j(T) = K_j^T Y_j,$$

$$K_j^T = [k_{1j} \ \dots \ k_{15j}],$$

$$Y^T = [k_5(v_1^* - v_1)k_6(v_2^* - v_2)k_7(v_3^* - v_3)k_8(v_4^* - v_4) \times \\ \times k_9(v_1^* - v_1)^2 k_{10}(v_1^* - v_1)(v_2^* - v_2) \times \\ \times k_{11}(v_1^* - v_1)(v_3^* - v_3)k_{12}(v_1^* - v_1)(v_4^* - v_4) \times \\ \times k_{13}(v_2^* - v_2)^2 k_{14}(v_2^* - v_2)(v_3^* - v_3) \times \\ \times k_{15}(v_2^* - v_2)(v_4^* - v_4)k_{16}(v_3^* - v_3)^2 \times \\ \times k_{17}(v_3^* - v_3)(v_4^* - v_4)k_{18}(v_4^* - v_4)^2 k_{19}g]. \quad (3)$$

При этом для идентификации модели (3) потребуется реально наблюдаемый выход, который формируется путем сравнения потенциального урожая для j -й культуры для заданных условий возделывания, определяемых вектором F , и прогнозируемого урожая $u_j(T)$ для этих же условий:

$$\Delta u_j(T) = B_j^T F(T) - u_j(T). \quad (4)$$

Поиск компромиссных решений по стратегиям внесения агрохимикатов, мелиорантов и обработок гербицидами возможен только при наличии прогнозов параметров химического состояния почвы и биомассы сорняков, по которым возможно прогнозировать суммарные потери урожая. Для этого необходимо введение динами-

ческих моделей всех параметров химического состояния почвы и общей биомассы многолетних сорняков:

$$\dot{v}_{1j} = a_{11}v_{1j}(T) + b_{11}d_{Ca}(T) + c_{12}f_2(T), \quad (5)$$

$$\dot{v}_{2j} = a_{22}v_{2j}(T) + b_{22}d_p(T) + c_{22}f_2(T) - d_2\hat{u}_j(T) - q_2s(T), \quad (6)$$

$$\dot{v}_{3j} = a_{33}v_{3j}(T) + b_{33}d_K(T) + c_{32}f_2(T) - d_3\hat{u}_j(T) - q_3s(T), \quad (7)$$

$$\dot{v}_{4j} = a_{44}v_{4j}(T) + b_{44}d_{Mg}(T) + c_{42}f_2(T) - d_4\hat{u}_j(T) - q_4s(T), \quad (8)$$

$$\dot{s} = a_{55}s(T) + a_{52}v_2(T) + a_{53}v_3(T) + a_{54}v_4(T) - b_g g(T) + c_{51}f_1(T) + c_{52}f_2(T) + c_{53}f_{53}(t), \quad (9)$$

где $v_1 = \text{pH}$, $v_2 = \text{P}$, $v_3 = \text{K}$, $v_4 = \text{Mg}$, P – фосфор, K – калий, Mg – магний, $s(T)$ – общая биомасса многолетних сорняков, $\hat{u}_j(T) = B_j^T F(T) - \Delta u_j(T)$ – урожай с учетом потерь культуры, $d_p(T)$, $d_K(T)$, $d_{Ca}(T)$, $d_{Mg}(T)$ – дозы внесения элементов питания и мелиоранта в годы севооборота (элементы стратегии), a_{11} – a_{44} , b_{11} – b_{44} , c_{12} – c_{42} , d_2 – d_4 , q_2 – q_4 – параметры модели.

Введенные обозначения и модели позволяют сформировать критерий оптимальности решения задачи, адекватный поставленной цели:

$$I = (V^* - V(N))^T G(V^* - V(N)) + M \left\{ \sum_{T=1}^N [c_{Tu}(k_1^T(V^* - V(T)) + (V^* - V(T))^T K_2(V^* - V(T)) + k_3g(T)) + C_d^T D(T) + c_g g(T)] \right\}, \quad (10)$$

где M – операция математического ожидания по площади поля, c_{Tu} – цена единицы урожая T -й культуры севооборота, C_d^T – вектор цен на минеральные удобрения по каждому элементу пита-

ния, c_g – цена на гербицид, $G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{55} \end{bmatrix}$ –

весовая матрица, конечных величин химических параметров почвы и биомассы многолетних сорняков.

В критерии (10) опущены индексы культур j , считая, что он совпадает с номерами лет севообо-

ротов T . Этот критерий включает в себя следующие компоненты: квадратичный штраф за отклонения параметров химического состояния от оптимальных показателей, чем неявно задаются ограничения на их допустимые величины, суммарные потери урожая всех культур севооборота, а также затраты на минеральные удобрения и гербициды. При таком составе компонентов критерий оптимальности имеет смысл среднего риска недополучения урожая в севообороте и перерасхода ресурсов, затрачиваемых на его получение. В качестве технологического ограничения на параметры химического состояния в этом случае рассматривается 20%-ное поле допуска показателя кислотности почвы вблизи оптимального показателя.

При использовании принципа максимума для решения задачи формирования оптимальных стратегий внесения удобрений и гербицидов в годы севооборота необходимо ввести в рассмотренные гамильтониан системы (5)–(10) [4]:

$$H(T) = C_d^T D(T) + c_{Tu}(V^* - V(T))^T K_2(V^* - V(T)) + k_3g(T) + c_g g(T) + \lambda_1(a_{11}v_1(T) + b_{11}d_{Ca}(T) + c_{12}f_2(T)) + \lambda_2(a_{22}v_2(T) + b_{22}d_p(T) + c_{22}f_2(T) - d_2\hat{u}_j(T) - q_2s(T)) + \lambda_3(a_{33}v_3(T) + b_{33}d_K(T) + c_{32}f_2(T) - d_3\hat{u}_j(T) - q_3s(T)) + \lambda_4(a_{44}v_4(T) + b_{44}d_{Mg}(T) + c_{42}f_2(T) - d_4\hat{u}_j(T) - q_4s(T)) + \lambda_5(a_{55}s(T) + a_{52}v_2(T) + a_{53}v_3(T) + a_{54}v_4(T) - b_g g(T) + c_{51}f_1(T) + c_{52}f_2(T) + c_{53}f_{53}(t)), \quad (11)$$

где λ_1 – λ_5 – сопряженные переменные задачи.

Весь алгоритм формирования стратегии внесения удобрений и обработки гербицидами включает в себя следующие шаги.

Шаг 0. Задается циклическая переменная $i = 0$. Задаются начальные условия для переменных системы моделей (5): v_{10} , v_{20} , v_{30} , v_{40} , s_0 ; начальные параметры стратегий внесения удобрений в годы севооборота: $d_{0P}(T)$, $d_{0K}(T)$, $d_{0Ca}(T)$, $d_{0Mg}(T)$, и годовых доз обработок гербицидом $g_0(T)$, $T = 1, 2, 3, 4, 5$.

Шаг 1. Решается система моделей (5)–(9), в результате получают решения для годов севооборота $v_{1i}(T)$, $v_{2i}(T)$, $v_{3i}(T)$, $v_{4i}(T)$, $s_i(T)$. Вычисляется критерий (10) I_i ; если $I_i \leq \delta$, то вычисления прекращаются, иначе осуществляется переход к шагу 2.

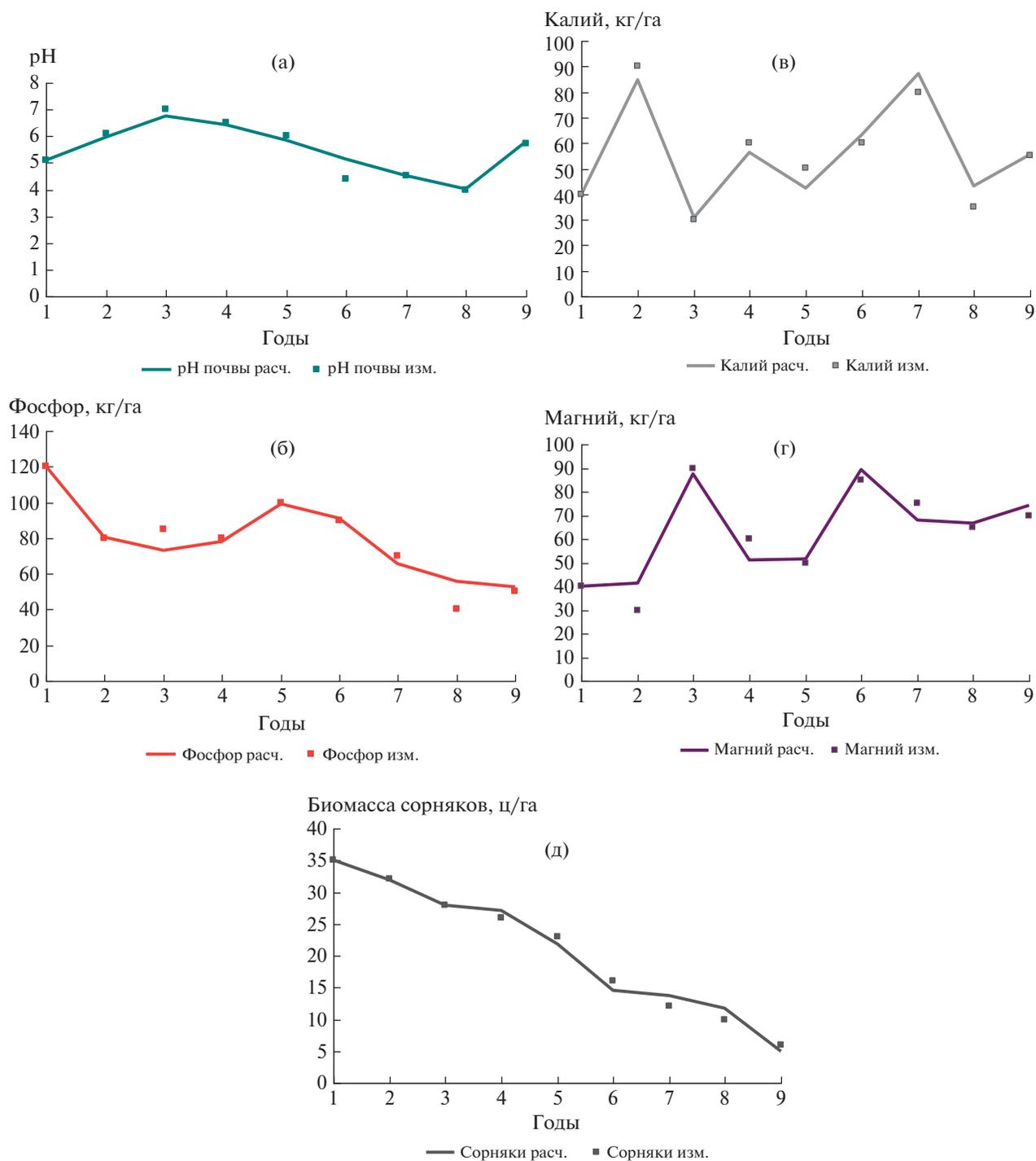


Рис. 2. Результаты идентификации моделей динамики показателей химического состояния почвы в годы севооборота: (а) – величины рН; содержания в почве доступных (б) – фосфора, (в) – калия, (г) – магния; (д) – общей биомассы многолетних сорняков.

Шаг 2. Решается система сопряженных переменных в обратном времени (справа–налево):

$$\dot{\lambda}_1 = -\frac{\partial H(T)}{\partial v_1} = -[c_{7u}(k_1 + 2k_5(v_1^* - v_1) + k_6(v_2^* - v_2) + k_7(v_3^* - v_3) + k_8(v_4^* - v_4) + a_1\lambda_1],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_1(N) = 2g_{11}(v_1^*(N) - v_1(N));$$

$$\dot{\lambda}_2 = -\frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = -[c_{7u}(k_2 + 2k_6(v_1^* - v_1) + k_9(v_2^* - v_2) + k_{10}(v_3^* - v_3) + k_{11}(v_4^* - v_4) + a_{22}\lambda_2],$$

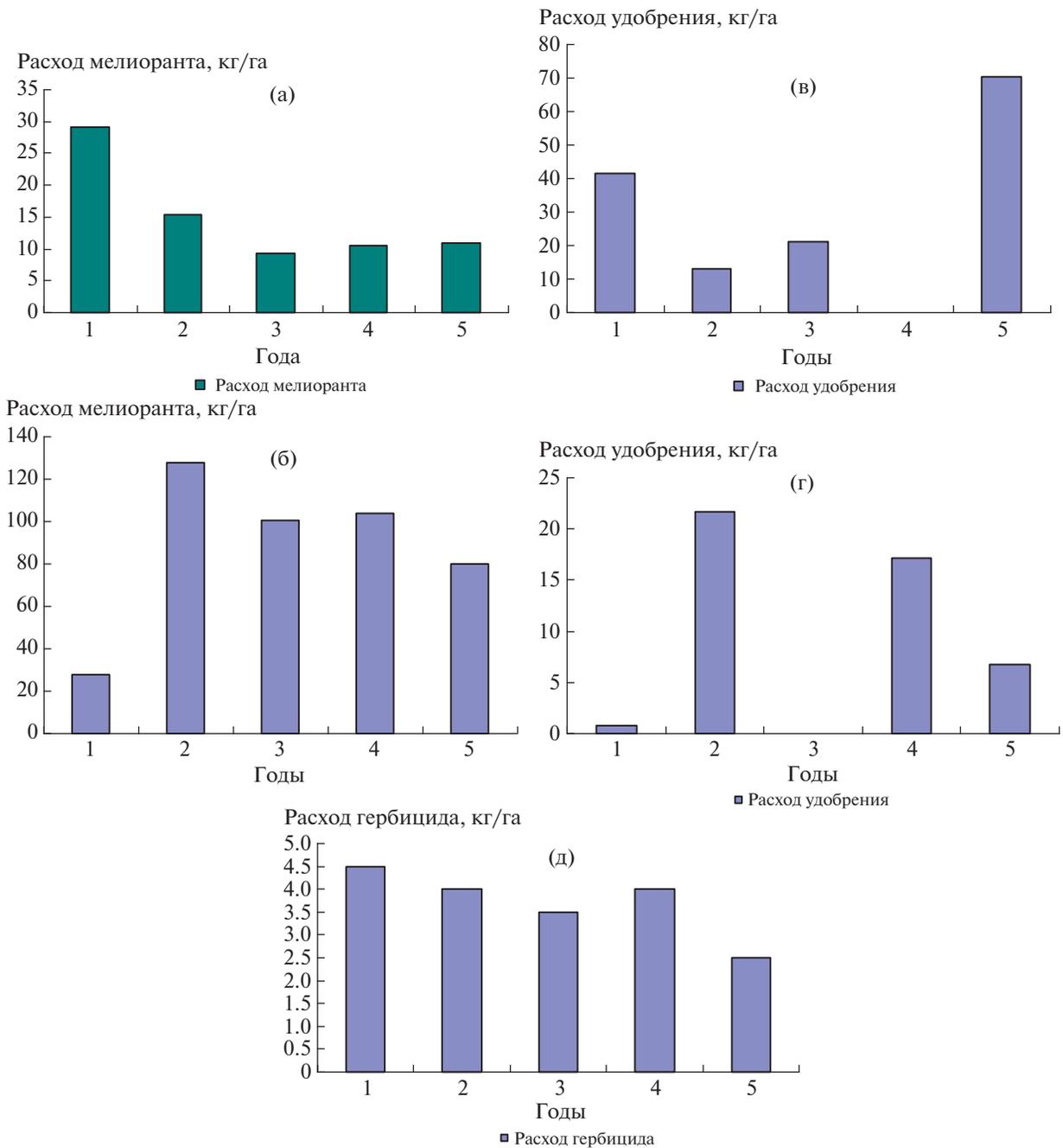


Рис. 3. Оптимальная стратегия внесения в годы севооборота: (а) – мелиоранта, (б) – фосфора, (в) – калия, (г) – магния, (д) – обработок гербицидами многолетних сорняков.

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_2(N) = 2g_{11}(v_2^*(N) - v_2(N));$$

$$\dot{\lambda}_3 = -\frac{\partial H}{\partial v_3} = -[c_{Tu}(k_3 + k_7(v_1^* - v_1) + k_{10}(v_2^* - v_2) + 2k_{12}(v_3^* - v_3) + k_{13}(v_4^* - v_4) + a_{33}\lambda_2],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_3(N) = 2g_{33}(v_3^*(N) - v_3(N));$$

$$\dot{\lambda}_4 = -\frac{\partial H}{\partial v_4} = -[c_{Tu}(k_4 + k_8(v_1^* - v_1) + k_{11}(v_2^* - v_2) + 2k_{13}(v_3^* - v_3) + 2k_{14}(v_4^* - v_4) + a_{33}\lambda_4],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_4(N) = 2g_{44}(v_4^*(N) - v_4(N));$$

$$\dot{\lambda}_5 = -\frac{\partial H}{\partial s} = -[a_{55}\lambda_5],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_5(N) = 2g_{55}(s^*(N) - s(N))$$

получаются решения в обратном времени $\lambda_{1i}(-T), \lambda_{2i}(-T), \lambda_{3i}(-T), \lambda_{4i}(-T), \lambda_{5i}(-T), T = N,$

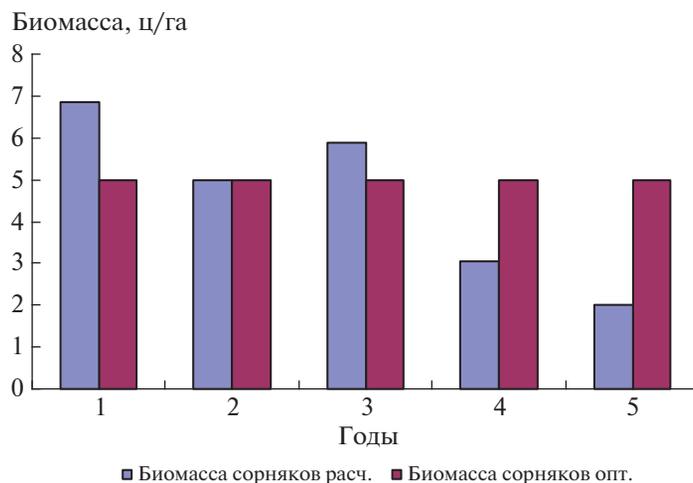


Рис. 4. Прогноз динамики накопления биомассы многолетних сорняков в годы севооборота.

$N - 1, \dots, 1$. Эти решения разворачиваются в прямом времени (T).

Шаг 3. Уточняются оптимальные стратегии:

$$d_{Ca,i+1}(T) = d_{Ca,i}(T) - \Delta_{1i}[c_{Ca} + b_{11}\lambda_{1i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Ca}(T) < d_{Ca1}, \text{ то } d_{Ca}(T) = 0,$$

$$\text{если } d_{Ca,i}^*(T) > d_{Ca2}, \text{ то } d_{Ca,i}(T) = d_{Ca2};$$

$$d_{Pi+1}(T) = d_{Pi}(T) - \Delta_{2i}[c_P + b_{22}\lambda_{2i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Pi}(T) < d_{1P}, \text{ то } d_{Pi}(T) = 0,$$

$$\text{если } d_{Pi}^*(T) > d_{P2}, \text{ то } d_{Pi}(T) = d_{P2};$$

$$d_{Ki+1}(T) = d_{Ki}(T) - \Delta_{3i}[c_K + b_{33}\lambda_{3i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Ki}(T) < d_{1K}, \text{ то } d_{Ki}(T) = 0, \quad (12)$$

$$\text{если } d_{Ki}^*(T) > d_{K2}, \text{ то } d_{Ki}(T) = d_{K2};$$

$$d_{Mgi+1}(T) = d_{Mgi}(T) - \Delta_{4i}[c_{Mg} + b_{44}\lambda_{4i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Mgi}(T) < d_{1Mg}, \text{ то } d_{Mgi}(T) = 0,$$

$$\text{если } d_{Mgi}^*(T) > d_{Mg2}, \text{ то } d_{Mgi}(T) = d_{Mg2};$$

$$g_{i+1}(T) = g_i(T) - \Delta_{5i}[c_g - b_g\lambda_{5i}(T)],$$

$$\text{если } g_i^*(T) < 0, \text{ то } g_i^*(T) = 0,$$

$$\text{если } g_i^*(T) > g_m, \text{ то } g_i^*(T) = g_m,$$

принимается циклическая переменная $i = i + 1$ и осуществляется переход к шагу 1, вплоть до выполнения условия $I_i \leq \delta$, где $\Delta_{1i} - \Delta_{5i}$ – оптимальные шаги алгоритма, являющиеся результатом дополнительной одномерной процедуры оптимизации; $d_{1,Ca}, d_{1,P}, d_{1,K}, d_{1,Mg}$ – нижние уровни ограничений на дозы внесения удобрений и мелиорантов, $d_{2,Ca}, d_{2,P}, d_{2,K}, d_{2,Mg}$ – верхние уровни ограничений на дозы внесения удобрений и мелиорантов; g_m – ограничение на дозы обработок гербицидами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отправным пунктом решения задачи и гарантией точности и надежности решения задачи является качество используемых математических моделей. При этом, если оценка параметров моделей потенциального урожая культур (1) и потерь урожая (2) осуществляется вне реального времени, по результатам многих экспериментальных данных, полученных за предшествующие периоды исследования, то идентификация системы динамических моделей (5) осуществляется повторно, после каждого сельскохозяйственного года. На рис. 2 представлены результаты идентификации моделей динамики показателей химического состояния почвы в годы севооборота. Они получены по результатам многолетних наблюдений на биополигоне Меньковского филиала Агрофизического института. Ошибки моделирования во всех представленных моделях укладываются в допуск $\pm 5\%$, что вполне допустимо для решения задач управления. Следует отметить, что параметры этих моделей уточняются по результатам очередного сельскохозяйственного сезона, после ввода новых данных о реальных параметрах состояния почвы и сорных растений. Этим самым осуществляется адаптация задачи к меняющимся условиям и стабилизация ошибок моделирования.

На диаграммах (рис. 3) представлены оптимальные стратегии внесения удобрений, мелиорантов и обработок гербицидами в годы севооборота. Они найдены путем минимизации критерия оптимальности (10) и по своей сути представляют компромиссное решение между процессами стимуляции роста и развития растений за счет удобрений и мелиорантов и процессами подавления

роста и развития за счет влияния гербицидов. Это иллюстрируется диаграммой (рис. 4), на которой представлен процесс подавления сорной растительности в годы севооборота, где в 4-м и 5-м годах севооборота биомасса сорняков могла быть даже меньше требуемого уровня.

Для читателей, впервые сталкивающихся с рассматриваемой проблемой, невольно возникает вопрос: какая польза от полученного результата и где он может быть использован? Возвращаясь к общей концепции управления агротехнологиями, следует отметить, что полученные стратегии являются как основным инструментом планирования технологий, так и средством формирования ограничений на параметры технологий, реализуемых в течение вегетационных периодов для каждой из культур севооборота. Это позволяет избежать потерь урожая при смене культур с противоречивыми требованиями к содержанию элементов питания, а также чрезмерного подавления роста и развития культур в отсутствие обоснования доз обработок гербицидами.

В представленной работе отображены первые шаги в решении задачи управления состоянием агроценозов. В этом случае для простоты обработки методики решения использованы самые простые математические модели и подходы. В дальнейшем может быть расширено число рассматриваемых многолетних сорняков, учтено влияние однолетних сорных растений, рассмотрены другие севообороты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые в современной аграрной науке поставлена и решена задача стратегического управления состоянием агроценоза, в составе которого содержится основная культура на примере яровой пшеницы и многолетние сорные растения. Результатом решения задачи является стратегия внесения минеральных удобрений, мелiorантов и обработок гербицидами в годы севооборота. Стратегия является результатом минимизации критерия оптимальности, учитывающего потери урожая и расхода затрачиваемых агрохимикатов. Рассматриваемый уровень управления является основным инструментом планирования агротехнологий и нормирования технологических операций, реализуемых в отдельные годы севооборота. Пример решения задачи показал работоспособность предложенной методики решения, а также обоснованность использованного программно-алгоритмического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайленко И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб.: СПбГТУ, 2017. 250 с.
2. Немченко В.В., Рыбина Л.Д., Гилев С.Д., Кунгурцева Н.М., Степных Н.В., Копылов А.Н., Копылова С.В. Современные средства защиты растений и технологии их применения. Куртамыш: ГУП "Куртамышская типография". 2006. 348 с.
3. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Оптимизация управления химическими параметрами почв в полевых севооборотах // Агрохимия. 2016. № 3. С. 3–10.
4. Казаков И.Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука, 1987. 3034 с.

Strategic Level of Agrocenosis State Management

I. M. Mikhailenko^{a,#} and V. N. Timoshin^a

^a Agrophysical Research Institute, Grazhdansky prosp. 14, Sankt-Petersburg 195220, Russia

[#] E-mail: Ilya.mihailenko@yandex.ru

The theoretical foundations of solving the problem of managing the state of agrocenoses, which include crops of the main crop and weeds, have been developed. The solution of this problem is aimed at eliminating the limitations of the existing paradigm of separate management of the state of crops and weeds. The application of mineral fertilizers simultaneously stimulates the growth and development of cultivated and weed plants, and herbicide treatments simultaneously inhibit the growth of both crops and weeds. As a result, this leads to significant crop losses and overspending of fertilizers and herbicides. The proposed theory and methodology is based on taking into account the relationship between the state of crops and weeds, and their overall effect on the content of nutrients in the soil. For this purpose, a system of mathematical models is proposed, which takes into account these relationships and crop losses when the parameters of the chemical state of the soil deviate from the optimal indicators for crop rotation crops and from the influence of herbicide treatments on crops. The result of solving the problem is optimal strategies for applying mineral fertilizers, meliorants and herbicides in the years of crop rotation. These strategies ensure minimization of crop losses of all crop rotation crops and consumption of agrochemicals. They are the main tool for planning agricultural technologies and rationing technological operations implemented in certain years of crop rotation. The results obtained are new, because currently there is no such toolkit.

Key words: agrocenosis, culture, weeds, fertilizers, herbicides, strategic management.

УДК 632.951: 632.95.028

МЕТОД СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ АБАМЕКТИНА И ИНДОКСАКАРБА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУРАХ

© 2022 г. Е. Ю. Алексеев^{1,*}, В. И. Долженко¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: anscreation@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 27.12.2021 г.

Принята к публикации 15.01.2022 г.

Анализ растительных образцов на содержание остаточных количеств пестицидов после обработки сельскохозяйственных культур многокомпонентными препаратами достаточно трудоемкий процесс, поэтому разработка мультиметодов определения остаточных количеств пестицидов в одной пробе является важным направлением. В данной работе была разработана методика совместного определения индоксакарба и абамектина в капусте, сое и картофеле при использовании метода пробоподготовки QuEChERS и метода ВЭЖХ-УФ анализа. Разработанный метод имеет высокую степень извлечения действующих веществ, а также показал практическую значимость при изучении препарата Стилет, МД.

Ключевые слова: пестициды, абамектин, индоксакарб, QuEChERS, ВЭЖХЭ, капуста, соя, картофель.

DOI: 10.31857/S0002188122040032

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в настоящее время бóльшая часть выращиваемой сельскохозяйственной продукции обрабатывается пестицидами для защиты урожая от вредителей, сорных растений и возбудителей болезней. Однако пестициды являются токсичными веществами для теплокровных животных и человека. Также среди ассортимента химических средств защиты растений выделяется группа препаратов, в состав которых входит не одно, а 2 и более действующих веществ [1].

Анализ растительных образцов на содержание остаточных количеств пестицидов после обработки сельскохозяйственных культур многокомпонентными препаратами достаточно трудоемкий процесс. Для каждого из компонентов по существующим методам анализа проводят отдельную пробоподготовку с последующим качественным и количественным определением [2]. Разработка универсальных методик, которые позволяют совместно определять действующие средства многокомпонентных пестицидов, является приоритетным направлением.

Препарат Стилет, МД (индоксакарб 100 г/л + абамектин 40 г/л), содержит в своем составе

2 действующих вещества – индоксакарб и абамектин. Абамектин относится к авермектинам – инсектицидам и акарицидам, которые получают из почвенных бактерий *Streptomyces avermitilis*. Абамектин – естественный продукт брожения этой бактерии [3], является нейротоксикантом. Абамектин способствует выделению γ -аминомасляной кислоты, что приводит к ингибированию передачи нервного импульса и, как следствие, параличу у насекомых и клещей [4] (рис. 1).

Индоксакарб – химическое действующее вещество пестицидов из класса оксидиазины, используется в сельском хозяйстве и личных подсобных хозяйствах для борьбы с вредными насекомыми. Индоксакарб блокирует движение ионов натрия в каналах нервных клеток, что приводит к параличу и гибели вредителей [6, 7] (рис. 2).

На сегодняшний день в основе большинства современных методик определения остаточных количеств пестицидов лежит метод пробоподготовки QuEChERS. QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, and Safe – Быстро, Просто, Дешево, Эффективно, Надежно и Безопасно) – быстрый и эффективный метод, позволяющий извлекать из проб остаточные количества

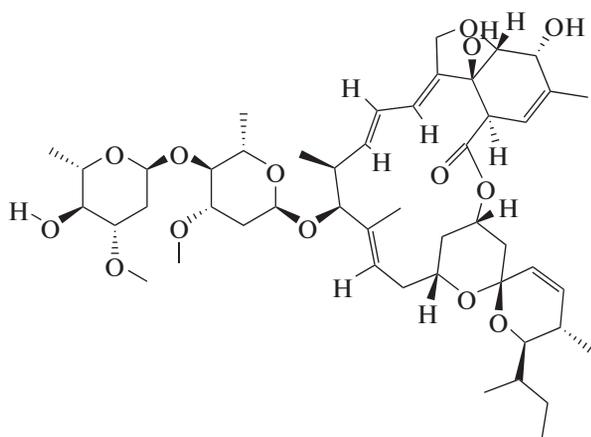


Рис. 1. Структурная формула абамектина (Авермектин В1а) [5].

целевых соединений, удаляя нежелательные помехи, такие как органические кислоты, липиды, пигменты, сахара и другие соединения [9].

Одной из задач исследователей является разработка методов, которые могли бы определять сразу несколько действующих веществ в анализируемом объекте. Такие методы позволяют проводить экотоксикологический анализ быстрее и дешевле. На сегодняшний день существует несколько разработанных методов, которые позволяют одновременно определять десятки пестицидов в различных матрицах [10, 11]. Однако это возможно только с использованием дорогих масс-спектрометрических (МС) детекторов, которые не всегда доступны в большинстве лабораторий. Современные диодно-матричные детекторы, работающие с системой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ-УФ), позволяют идентифицировать разные вещества одновременно, благодаря использованию широкого диапазона длин волн. Существуют методы, позволяющие определять несколько пестицидов с использованием метода детектирования ВЭЖХ-УФ [12, 13]. Однако чаще всего определяемые данными методами пестициды принадлежат одному классу. Стоит отметить, что действующие вещества большинства комбинированных препаратов часто относятся к разным химическим классам. Поэтому разработка быстрых и дешевых мультиметодик по определению остаточных количеств на основе методов QuEChERS и ВЭЖХ-УФ является перспективным направлением.

Цели работы – разработка мультиметода определения остаточных количеств абамектина и индоксакарба в картофеле, капусте, сое и масле сои, а также его апробирование при изучении препарата Стилет, МД.

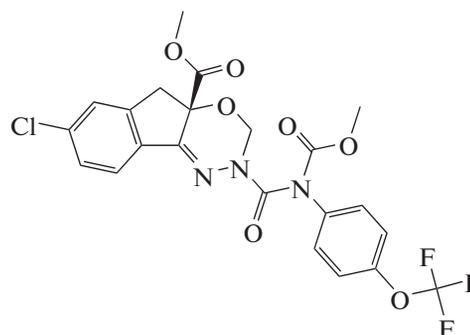


Рис. 2. Структурная формула индоксакарба [8].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Модифицированный метод пробоподготовки QuEChERS. Навеску измельченной матрицы помещают в полипропиленовую центрифужную пробирку вместимостью 50 см³, последовательно добавляют 10 см³ ацетонитрила и 1 г хлористого натрия. При анализе сои дополнительно добавляют 10 см³ дистиллированной воды. Пробирку плотно закрывают и помещают в перемешивающее устройство на 10 мин, затем центрифугируют в течение 10 мин при скорости 4000 об./мин. От верхнего ацетонитрильного слоя отбирают 5 см³, переносят в центрифужную пробирку вместимостью 15 см³, содержащую 150 мг сорбента на основе силикагеля с привитыми пропиламинными группами (PSA) и 900 мг безводного сульфата магния. Пробирку плотно закрывают и помещают в перемешивающее устройство на 10 мин, затем центрифугируют в течение 10 мин при скорости 4000 об./мин. Далее отбирают 2 см³ экстракта, упаривают досуха и растворяют в 1 см³ смеси ацетонитрил : 0.005 М раствор ортофосфорной кислоты (1 : 1 по объему).

Условия детектирования. Используют ультраэффективный жидкостной хроматограф (“ACQUITY” фирмы Waters) с быстросканирующим УФ-детектором, снабженный дегазатором, автоматическим пробоотборником и термостатом колонки, и аналитическую колонку, заполненную сорбентом с привитыми монофункциональными полярными группами C18 (ACQUITY BEH C-18 (Waters)) (100 × 2.1) мм, 1.7 мкм. Температура колонки – 30 ± 1°С, скорость потока элюента – 0.2 см³/мин, рабочая длина волны УФ-детектора – 310 и 245 нм, объем вводимой пробы – 10 мм³, режим элюирования – градиентный. Элюент А – ацетонитрил, элюент В – 0.005 М раствор ортофосфорной кислоты (табл. 1).

Таблица 1. Схема градиента элюирования

А, %	Поток, см ³ /мин	Время, мин
20	0.2	0
20	0.2	4
75	0.2	5
75	0.2	14

Таблица 2. Полнота извлечения абамектина и индоксакарба в анализированных матрицах

Объект исследования	Доля извлечения абамектина	Доля извлечения индоксакарба
Картофель	90.1 ± 2.6	91.2 ± 2.9
Капуста	87.3 ± 1.9	85.1 ± 3.1
Соя	85.2 ± 3.4	83.8 ± 4.4
Масло сои	86.7 ± 2.4	80.9 ± 3.3

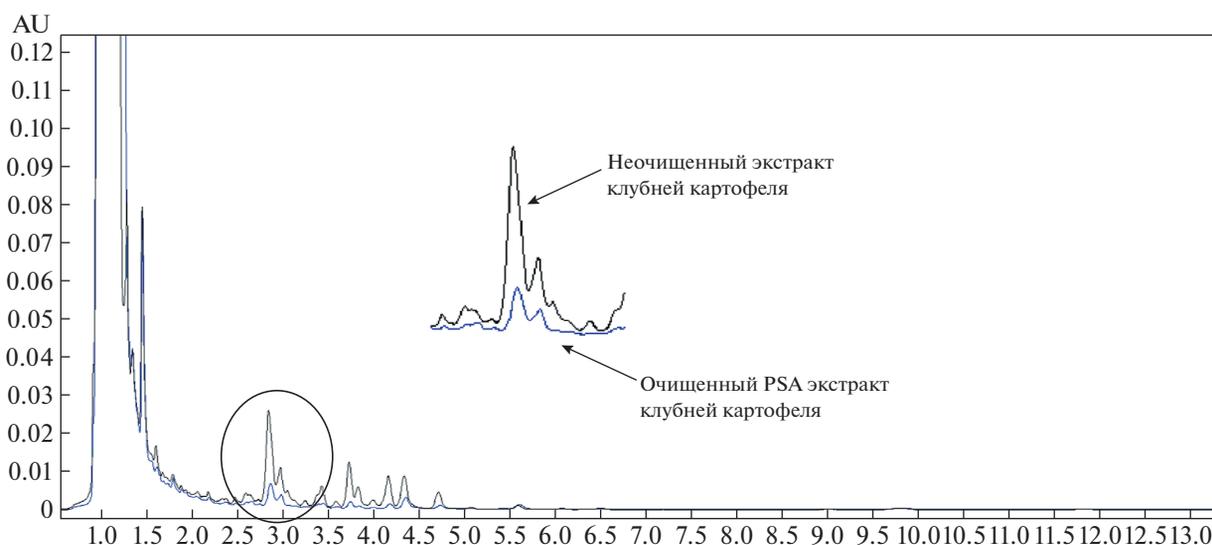
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для первичной экстракции пестицидов из растительных матриц по методу QuEChERS EN 15662 обычно используют следующие соли: безводный сульфат магния, цитратный буфер, состоящий из двухосновного сесквигидрата цитрата натрия и трехосновного дигидрата цитрата натрия, и хлористый натрий. Данные соли повышают ионную силу раствора, создают комфортный для экстракции pH, что увеличивает долю (в %) извлечения аналитов. Однако нами было выдвинуто предположение, что использование дорого-

стоящих реактивов для создания стабильного pH не целесообразно, т.к. исследуемые матрицы не обладают выраженными кислотными или основными свойствами и скорей всего не смогут оказать сильный эффект на процесс экстракции. Также из опыта прошлых исследований было отмечено, что для увеличения эффективности экстракции необходимо, чтобы в системе присутствовала вода. Безводный сульфат магния связывает часть воды, а также может сорбировать на себе некоторые количества действующих веществ. Поэтому было принято решение отказаться от него. Для разделения жидкой и органической фазы добавляется NaCl в количестве 1 г. Данного количества хватает для разделения фаз и повышения ионной силы водного раствора.

Было проведено 2 испытания: первичная экстракция по классическому методу и по модифицированному методу. Первичная экстракция с использованием только NaCl и ацетонитрила показала лучшее извлечение действующих веществ. Поэтому данный вариант был принят за основной.

Так как в пробе присутствует достаточно много сопутствующих веществ (жиры, пигменты и т.п.), которые могут мешать точной идентификации целевого аналита, а также могут привести к загрязнению хроматографической колонки, что непосредственно может сказаться на точности анализа, необходимо провести очистку первичного экстракта. Очистку было решено провести насыпными сорбентами. Были апробированы следующие сорбенты: силикагель, PSA, C18E, силикагель и GCB (графитированная сажа), PSA.

**Рис. 3.** Хроматограммы экстрактов клубней картофеля до и после очистки PSA.

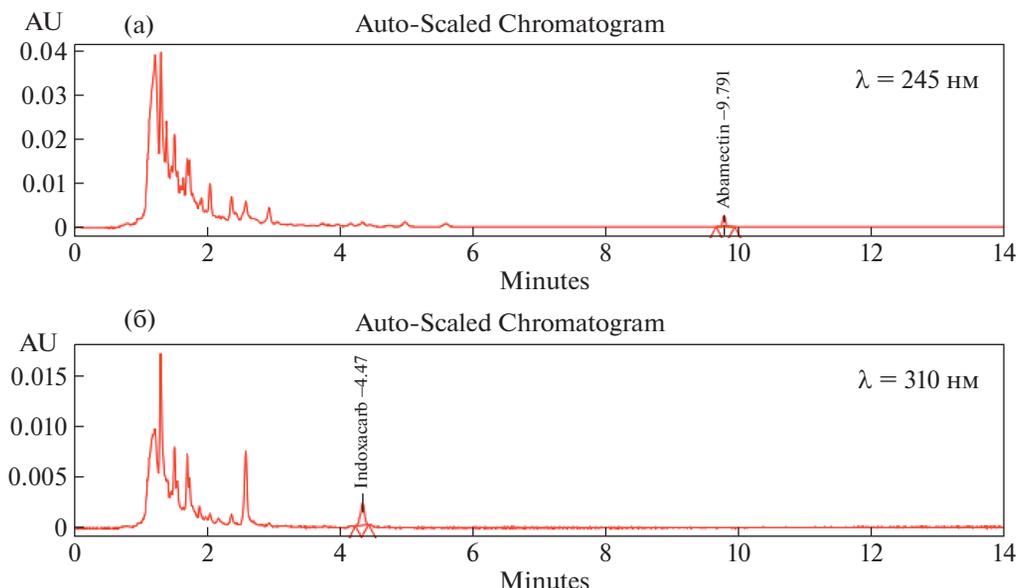


Рис. 4. Хроматограммы сои с внесением: (а) – индоксакарба и (б) – абамектина в количестве 0.1 мг/кг.

GCB и его сочетания обеспечивают хорошую очистку, но сильно уменьшают долю выхода (в %) действующего вещества. Сорбент C18E оказал эффект только при очистке экстрактов сои и продукта его переработки – масла. Ощутимое уменьшение хроматографического фона происходит при использовании сорбента PSA, при этом он никак не влияет на долю выхода действующих веществ и эффективен для всех исследуемых матриц. На рис. 3 представлены хроматограммы кар-

тофеля до и после очистки PSA. Таким образом, было принято проводить пробоподготовку по схеме, приведенной выше. Полнота извлечения абамектина и индоксакарба по данной методике приведена в табл. 2.

Для совместного определения настройки диодно-матричного детектора были выставлены 2 длины волны – 310 и 245 нм. Для быстроты проводимого анализа было принято использовать градиентный режим хроматографирования, что

Таблица 3. Концентрация индоксакарба и абамектина в анализированных пробах капусты

Время после обработки, сут	Анализируемый объект	Почвенно-климатические зоны		
		Санкт-Петербург (1-я зона)	Тамбов (2-я зона)	Волгоградская обл. (3-я зона)
Индоксакарб				
Обработка	Сегменты кочанов	3.58	4.89	1.52
7	То же	2.58	3.26	0.12
14	“_”	н/о	0.25	н/о
21	“_”	н/о		
Урожай (29 сут)	“_”	н/о		
Абамектин				
Обработка	Сегменты кочанов	0.28	0.14	0.15
7	То же	н/о	0.13	0.03
14	“_”	н/о		
21	“_”			
Урожай (29 сут)	“_”	н/о		

Примечание. н/о – не обнаружено.

Таблица 4. Концентрация индоксакарба и абамектина в анализированных пробах сои и продукте ее переработки

Время после обработки, сут	Анализируемый объект	Почвенно-климатические зоны		
		Орел (1-я зона)	Краснодар (2-я зона)	Волгоградская обл. (3-я зона)
Индоксакарб				
Обработка	Зеленая масса	3.01	2.67	1.57
7	То же	0.98	1.32	1.33
14	“_”	0.48	0.74	0.90
21	Бобы	0.12	0.09	0.01
Урожай (29 сут)	То же	Не обнаружено		
Урожай (29 сут)	Масло	Не обнаружено		
Абамектин				
Обработка	Зеленая масса	0.21	0.40	0.20
7	То же	Не обнаружено		
14	“_”			
21	Бобы			
Урожай (29 сут)	То же			
Урожай (29 сут)	Масло			

позволяет детектировать действующие вещества за 10 мин. На рис. 4 представлены хроматограммы сои с внесением индоксакарба и абамектина, полученные из одной пробы. С использованием данной методики были проанализированы пробы сои и капусты после обработки препаратом Стилет, МД в 3-х почвенно-климатических зонах в 2019 г. Результаты представлены в табл. 3, 4. В урожае и продуктах переработки остаточных количеств действующих веществ обнаружено не было. Таким образом, при соблюдении регламентов препарат Стилет, МД может быть использован для защиты капусты и сои от вредителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод имеет ряд неоспоримых преимуществ: во-первых, он позволяет детектировать 2 действующих вещества, относящихся к разным химическим классам, одновременно. Во-вторых, он значительно сокращает время, затраченное на пробоподготовку и непосредственно на хроматографический анализ. В-третьих, данный метод позволяет отказаться от использования дорогостоящих и труднодоступных реактивов, что положительно сказывается на стоимости анализа. Разработанный метод показал высокую долю извлечения действующих веществ. Преимущества данного метода подтверждены в процессе изучения динамики деградации действующих веществ в сое и капусте при обработке препаратом Стилет, МД. Данный метод может быть использован для

экотоксикологической оценки препаратов на основе данных действующих веществ не только в комбинации, но и в отдельности. Также данная методика будет актуальна для изучения остаточных количеств действующих веществ в импортной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Остроухова О.К., Комарова А.С.* Оптимизация методов контроля содержания многокомпонентных пестицидов в сельскохозяйственных культурах. 2016. Вып. 2. С. 72–75.
2. *Зенкевич И.Г., Остроухова О.К., Долженко В.И.* Выбор оптимальных аналитических параметров для хроматографической идентификации пестицидов // ЖАХ. 2002. Вып. 57. № 1. С. 43–48.
3. *Белов Д.А.* Химические методы и средства защиты растений в лесном хозяйстве и озеленении. Учеб. пособ. для студентов. М.: МГУЛ, 2003. 128 с.
4. *Долженко Т.В., Буркова Л.А., Долженко В.И.* Абамектин в защите сада от сосущих вредителей // Мат-лы научн. конф. “Проблемы защиты растений в условиях современного сельскохозяйственного производства”. СПб., 2009. С. 51–52.
5. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 6435890, Abamectin. [Electronic resource]. 2021.
6. *McCann S.F.* The discovery of indoxacarb: oxadiazines as a new class of pyrazoline-type insecticides. // Pest Manag. Sci. 2001. V. 57. № 2. P. 153–164.
7. *Lapied B., Grolleau F., Sattelle D.B.* Indoxacarb, an oxadiazine insecticide, blocks insect neuronal sodium

- channels // Br. J. Pharmacol. 2001. V. 132. № 2. P. 587–595.
8. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 107720, Indoxacarb [Electronic resource]. 2021.
9. *Anastassiades M.* Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce // J. AOAC Int. AOAC Inter. 2003. V. 86. № 2. P. 412–431.
10. *Tian F.* Development of a fast multi-residue method for the determination of succinate dehydrogenase inhibitor fungicides in cereals, vegetables and fruits by modified QuEChERS and UHPLC-MS/MS // J. Chromatogr. B Anal. Technol. Biomed. Life Sci. Elsevier B.V., 2020. V. 1152.
11. *Feng C.* Comprehensive strategy for analysis of pesticide multi-residues in food by GC-MS/MS and UPLC-Q-Orbitrap // Food Chem. Elsevier Ltd, 2020. V. 320.
12. *Hou.* A Modified QuEChERS method for determination of pyrethroid residues in traditional chinese medicine oral liquids by high-performance liquid chromatography // Mol. MDPI AG. 2019. V. 24. № 8. P. 1470.
13. *Mahdavi V.* Health risk assessment of neonicotinoid insecticide residues in pistachio using a QuEChERS-based method in combination with HPLC-UV // Biomed. Chromatogr. John Wiley and Sons Ltd, 2020. V. 34. № 3. P. e4747.

Method for Joint Determination of Residual Amounts of Abamectin and Indoxacarb in Agricultural Crops

E. Yu. Alekseev^{a,#} and V. I. Dolzhenko^a

^aAll-Russian Research Institute of Plant Protection, Shosse Podbel'skogo, 3, St. Petersburg—Pushkin 196608, Russia

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

The analysis of plant samples for the content of residual amounts of pesticides after processing crops with multicomponent preparations is a rather laborious process, therefore, the development of multimethods for determining the residual amounts of pesticides in one sample is an important area. In this work, a method was developed for the joint determination of indoxacarb and abamectin in cabbage, soybeans, and potatoes using the QuEChERS sample preparation method and the HPLC-UV analysis method. The developed method has a high degree of extraction of active substances, and also showed practical significance in the study of the preparation Stilett, MD.

Key words: pesticides, abamectin, indoxacarb, QuEChERS, HPLC.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

DOI: 10.31857/S000218812204010X

1. В журнале “Агрохимия” публикуются оригинальные теоретические, проблемные, экспериментальные и методические статьи, соответствующие профилю журнала, а также аналитические обзоры, рецензии и хроники. Работы, ранее опубликованные, редакция не принимает.

2. Объем экспериментальных статей не должен превышать 25 машинописных страниц (включая таблицы и список литературы), обзоров – 35 страниц. **Повторение одних и тех же данных в таблицах и рисунках не допускается.**

3. Статьи должны сопровождаться направлением на опубликование от того учреждения, в котором выполняли работу, и экспертным заключением, в котором говорится об отсутствии сведений, запрещенных к опубликованию. К статье необходимо приложить договор о передаче авторского права РАН (текст договора на имя главного редактора журнала размещен на сайте РАН www.ras.ru). **Статьи и сопроводительные документы должны быть представлены только в электронном виде и присланы в редакцию по электронной почте. Адрес электронной почты редакции: j.agrochem@mail.ru.** Текст, таблицы и рисунки следует размещать в одном файле.

4. Присылаемую в редакцию статью подписывают все авторы. При этом обязательно указывают фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, контактный телефон, адрес электронной почты одного из авторов, с которым следует вести переписку.

5. Текст и таблицы должны быть напечатаны в формате Word, Times New Roman, 14 пунктов через 2 интервала. Таблицы, подрисуночные подписи и рисунки печатаются на отдельных листах. Все страницы должны быть пронумерованы.

6. Начало статьи оформляется по образцу: название, инициалы и фамилии авторов, полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнена работа, почтовый адрес каждого учреждения с индексом, страна, адрес электронной почты. Далее приводится расширенная аннотация (до 1 страницы), а также ключевые слова. Аннотация должна включать цель работы, методику кратко и основные результаты. Кроме того,

все эти данные необходимо представить на английском языке в конце рукописи на отдельной странице.

7. Рисунки желательно выполнять в формате PDF, обеспечивающем четкость всех деталей и возможности редактирования.

8. Материал статьи излагается в последовательности: введение, методика исследования, результаты и их обсуждение, выводы (заключение), список литературы. Эти подзаголовки должны быть указаны в тексте статьи.

Заглавие статьи должно быть информативным, включать ключевые слова.

Аннотация должна содержать главную информацию о статье: суть экспериментов, результаты и их интерпретацию.

Во введении нужно логически обосновать проведение данного исследования, показать актуальность и новизну, ответить на вопросы: что известно в данной области, что остается неизвестным, какова цель настоящей публикации.

Методика исследования должна содержать сведения: где, когда, на какой почве (субстрате) проводили опыты; агрохимическую характеристику и другие характеристики почвы с указанием методов определения; об условиях выращивания растений; об аналитических методах и использованных приборах и реактивах (с указанием фирмы на языке оригинала и производящей страны). Для малоизвестных или новых методов необходимо подробное их изложение с указанием всех примененных реактивов, при этом нужно приводить ошибку определения и чувствительность метода. Обязательно давать ссылку на классификацию, по которой дано название почвы.

При описании полевых опытов дозы удобрений, выраженные в кг/га N, P₂O₅ и K₂O, пишутся на строке (N90P60K60); для вегетационных опытов дозы питательных веществ (N, P, K), выраженные в мг/кг, пишутся в нижнем индексе (N₁₀₀P₇₅K₁₀₀).

При описании опытов с культурами растений должны быть указаны их сорта. При упоминании видов растений необходимо приводить их латинское название и авторов классификации; назва-

ния микроорганизмов и грибов следует писать только на латыни. Родовые и видовые латинские названия растений, грибов и микроорганизмов надо печатать курсивом. Например, *Triticum aestivum* L., *Sinorhizobium meliloti*.

В конце методического раздела следует указать повторность в опыте, методы статистической обработки. Необходима статистическая обработка всех количественных данных. При ее использовании в методике нужно указать, что означает плюс-минус в таблицах и отклонение от среднего на графиках: стандартную ошибку среднего или стандартное отклонение. Если для данной задачи предложено несколько различающихся методов статистической обработки, то необходимо дать ссылку на конкретный использованный метод.

Результаты и их обсуждение. Изложение результатов должно заключаться в выявлении следующих из таблиц и рисунков закономерностей, а не пересказе их содержания.

Количественные данные, представленные без ошибок, округляются до 3-х значащих цифр. Например, величина 1044 округляется до 1040, 1045 – до 1050, величина 1.253 округляется до 1.25, 1.257 – до 1.26 и т.п.

Все виды ошибок (метрологические и статистические) приводить не более, чем с двумя значащими цифрами (начиная с первой ненулевой цифры слева); в соответствии с этим сами величины (в том числе средние) округляются до того же числа десятичных знаков, которые содержатся в их ошибке.

При обсуждении результатов следует сравнить полученную информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна.

Выводы (или заключение) должны быть конкретными и вытекать из непосредственно полученного материала.

При описании методики, обсуждении результатов и в выводах следует употреблять глаголы в прошедшем времени.

9. В статье необходимо использовать физические единицы и обозначения, принятые в Международной системе единиц СИ (ГОСТ 8.417-2002 и РД 50-160-79), агрохимические термины – в соответствии с ОСТами 10 294-2002–10 297-2002. При названии различных химических соединений желательно использовать терминологию ИЮПАК. В таблицах употребляются символы химических элементов.

10. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общепотребительных.

11. При обозначении удобрений (азотных, фосфорных, калийных, комплексных, сложных, смешанных) целесообразно пользоваться сокращениями:

N_{aa} – аммоний азотнокислый (селитра аммиачная);

N_a – аммоний серноокислый;

N_m – мочевины (карбамид);

N_c – селитра натриевая;

N_{ck} – селитра калийная;

$N_{ckл}$ – селитра кальциевая;

$N_{ц}$ – цианамид кальция;

$N_{ва}$ – водный аммиак;

$N_{ба}$ – безводный аммиак;

P_c – суперфосфат простой;

$P_{ст}$ – суперфосфат простой гранулированный;

$P_{сд}$ – суперфосфат двойной;

P_n – преципитат;

$P_{оф}$ – обесфторенный фосфат;

P_f – фосфоритная мука;

$P_{фш}$ – фосфатшлак;

K_x – калий хлористый;

K_c – калий серноокислый;

$K_{мг}$ – калимагнезия;

АФ – аммофос;

ДАФ – диаммофос;

ДАФК – диаммофоска;

АЗФК – азофоска;

КАФ – карбоаммофос;

КАФК – карбоаммофоска;

МФК – метафосфат калия;

НАФ – нитроаммофос;

НФ – нитрофос;

НФК – нитрофоска;

НАФК – нитроаммофоска;

ПФА – полифосфат аммония;

ФМ – фосфат мочевины;

ЖКУ – жидкое комплексное удобрение;

ОМУ – органо-минеральное удобрение (с расшифровкой состава двух последних видов удобрений в разделе “Методика исследований”).

Другие сокращения необходимо расшифровать.

12. Формулы, на которые есть ссылки в тексте, должны быть пронумерованы. Пронумерованные формулы пишутся с красной строки, номер формулы ставится у правого края страницы в круглых скобках. Все ссылки в тексте на литературные источники даются на языке оригинала и нумеруются.

ся. Фамилии и названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский алфавит, пишутся в русской транскрипции. Номера ссылок в тексте должны идти строго по порядку упоминания и быть заключены в квадратные скобки.

13. Список литературы составляется по порядку упоминания работ в тексте статьи. Для всех библиографических источников приводятся фамилии и инициалы **всех** авторов и полное название цитируемой работы.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ

Для монографий:

Кореньков Д.А. Методы применения изотопа ^{15}N в агрохимии. М.: Колос, 1977. 158 с.

Hewitt E.L. Plant mineral nutrition. London: The English University Press, 1974. 219 p.

Для сборников:

Clarkson D.T. Regulation of the absorption and release of nitrate by plant cell: a review of current ideas and methodology // Fundamental, ecological and agricultural aspect of nitrogen metabolism in higher plants. Dordrecht; Boston; Lancaster: Martinus Nijhoff Publishes, 1986. P. 3–27.

Ловцова Н.М. Влияние регуляторов роста на интенсивность дыхания укореняющихся зеленых черенков облепихи // Ростовые процессы и их регуляция / Под. ред. Якушкиной Н.И. М.: МОПИ, 1992. С. 98–101.

Ладонин В.Ф., Посмитная Л.В., Петросян А.Г. К вопросу оценки загрязнения зерна озимой пшеницы в условиях комплексного применения средств химизации // Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Почвенно-агрохимические и экологические проблемы формирования высокопродуктивных агроценозов". Пушино, 1988. С. 177.

Для трудов:

Варзунова Т.А. Влияние минеральных удобрений на урожай зерна горохоовсяной смеси // Тр. Сев.-Зап. ВНИИ молоч. и лугопастб. хоз-ва. 1971. Вып. 6. С. 17–20.

Булгакова Н.Н. Влияние дозы азота на включение в метаболизм нитрата запасного фонда при разных условиях выращивания // Бюл. ВИУА. № 112. 1999. С. 10–11.

Для журналов:

Монастырский О.А. Факторы эволюции высококотоксичных штаммов рода *Fusarium* в агроценозе // С.-х. биология. 1998. № 1. С. 28–34.

Baer R.G., Collet F.G. In vivo determination of parameters of nitrate utilization in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings grown with low concentration of nitrate in the nutrient solution // Plant Physiol. 1981. V. 68. № 6. P. 1237–1243.

Для авторефератов и диссертаций:

Глянько А.К. Реакция растительного организма на азотное питание и температуру среды (физиолого-экологические механизмы): Дис. ... д-ра биол. наук в форме научн. докл. Иркутск, 2000. 56 с.

Котлярова Т.И. Особенности усвоения азота корнями и листьями разных растений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИФР АН СССР, 1987. 22 с.

Для патентных документов:

Шаповалов А.А., Тацц В.П., Пуцын Ю.Г. Соли 1-фенил-3-(1,2,4-триазол-4-ил) мочевины, обладающие свойством регуляторов роста растений: А. с. 1732651 (РФ) // Б.И. 1992. № 14. С. 25.

Шаповалов А.А., Пуцыкин Ю.Г., Егоров Б.Ф. Способ борьбы с сорными растениями, гербицидная композиция и синергист, повышающий активность гербицидов: Пат. 2130260, РФ // Б.И. 1998. № 5. С. 30.

15. Рукопись статьи направляется на рецензирование члену редколлегии журнала или ведущему специалисту в данной области исследований. Срок рецензирования статьи – 1 месяц. Положительная рецензия достаточна для приема к публикации. Если в рецензии имеются замечания, рукопись отправляется автору на переработку. Сроки переработки статьи – 4 месяца. Переработанную автором статью редакция направляет рецензенту на повторное рецензирование.

16. Статьи, оформленные без соблюдения изложенных правил, редакцией к рассмотрению не принимаются и возвращаются автору.

17. Рассылка отписок опубликованных статей осуществляется в электронном виде на адрес электронной почты, указанный авторами для переписки.

18. Плата за публикацию рукописей не взимается.