

Номер 2

ISSN 0002-1881

Февраль 2023



АГРОХИМИЯ

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Агрохимические параметры плодородия пахотных луговых дифференцированных почв Приморского края в условиях длительного сельскохозяйственного использования

Е. А. Жарикова, М. Л. Бурдуковский, О. М. Голодная

3

Эффективность приемов биоконверсии питательных веществ удобрений в зеленые корма на торфянике

Т. Ю. Анисимова

10

Удобрения

Изучение длительного действия минеральных удобрений в стационарном опыте в степном Поволжье

В. В. Пронько, Д. Ю. Журавлев, Т. М. Ярошенко, Н. Ф. Климова

15

Эффективность новых форм NPK-удобрений с замедленным и регулируемым высвобождением питательных веществ при выращивании яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве

В. М. Лапушкин, Ф. Г. Израйлев, А. А. Лапушкина, С. П. Торшин, А. М. Норов, Д. А. Пагалешкин, П. С. Федотов, В. В. Соколов, И. М. Кочетова, Е. А. Рыбин

29

Эффективность применения навоза, биокомпостов и сидератов под овощные культуры

В. А. Борисов, О. Н. Успенская, А. А. Коломиец, И. Ю. Васючков

36

Регуляторы роста растений

Использование синтетических цитокининовых регуляторов роста как антистрессовых препаратов при выращивании огурца в защищенном грунте

А. С. Лукаткин

41

Пестициды

Новые комбинированные препараты для защиты картофеля от колорадского жука

М. Н. Шорохов, О. А. Кривченко, О. В. Долженко

48

Агроэкология

Влияние различных мелиорантов на интенсивность дыхания и содержание органического углерода в почвах Ростовского зоопарка

А. Н. Федоренко, А. А. Гобарова, К. Ш. Казеев

54

Оценка влияния различных катализаторов на деструкцию пищевых отходов в процессе их переработки

А. С. Баикин, Е. П. Севостьянова, Е. В. Гришина, М. А. Каплан, Е. О. Насакина, К. В. Сергиенко, С. В. Конушкин, С. М. Севостьянов, С. Е. Нефедова, Д. В. Демин, А. П. Глинушкин, М. А. Севостьянов

62

Радиационная обработка семенного картофеля как метод подавления различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая

Н. С. Чуликова, А. А. Малюга, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговская, С. А. Золотов, Я. В. Зубрицкая, В. С. Ипатова, А. П. Черняев, И. А. Родин

69

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробоподготовка QuEChERS при определении пестицидов в яблоках хромато-масс-спектрометрическим методом

А. З. Мухарлямова, М. В. Балымова, А. Г. Мухамметшина, К. Е. Буркин, Ф. А. Бекмуратова

79

ОБЗОРЫ

Негативные эффекты применения гербицидов группы имидазолинонов: проблемы и решения

В. В. Бычкова, И. А. Сазонова, П. С. Пиденко, С. А. Пиденко, Н. А. Бурмистрова

87

Contents

No. 2, 2023

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Agrochemical Parameters of the Fertility of the Arable Meadows Differentiated Soils of the Primorsky Region in the Conditions of Long-Term Agricultural Use
E. A. Zharikova, M. L. Burdukovskii, O. M. Golodnaya 3
- Efficiency of Methods of Bioconversion of Fertilizer Nutrients into Green Fodder in a Peat Bog
T. Yu. Anisimova 10

Fertilizers

- Study of the Long-Term Effect of Mineral Fertilizers in a Stationary Experiment in the Steppe Volga Region
V. V. Pronko, D. Y. Zhuravlev, T. M. Yaroshenko, N. F. Klimova 15
- Efficiency of New Forms of NPK-Fertilizers with Delayed and Controlled Release of Nutrients when Growing Spring Wheat on Sod-Podzolic Soil
V. M. Lapushkin, F. G. Igliev, A. A. Lapushkina, S. P. Torshin, A. M. Norov, D. A. Pagaleshkin, P. S. Fedotov, V. V. Sokolov, I. M. Kochetova, E. A. Rybin 29
- Effectiveness of the Use of Manure, Biocompost and Siderates for Vegetable Crops
V. A. Borisov, O. N. Uspenskay, A. A. Kolomiets, I. Yu. Vasyuchkov 36

Plant Growth Regulators

- Use of Synthetic Cytokinin-Like Growth Regulators as Antistress Agents at Cucumber Cultivation in Greenhouses
A. S. Lukatkin 41

Pesticides

- New Combined Preparations to Protect Potatoes from the Colorado Potato Beetle
M. N. Shorokhov, O. A. Krivchenko, O. V. Dolzhenko 48

Agroecology

- Effect of Various Meliorants on Respiration Intensity and Organic Carbon Content in the Soils of the Rostov Zoo
A. N. Fedorenko, A. A. Gobarov, K. S. Kazeev 54
- Assessment of the Effect of Various Catalysts on the Destruction of Food Waste during Their Processing
A. S. Baikin, E. P. Sevostyanova, E. V. Grishina, M. A. Kaplan, E. O. Nasakina, K. V. Sergienko, S. V. Konushkin, C. M. Sevostyanov, S. E. Nefedova, D. V. Demin, A. P. Glinushkin, M. A. Sevostyanov 62
- Radiation Processing of Seed Potatoes as a Method for Suppressing Various Forms of Rhizoctonia in New Harvest Tubers
N. S. Chulikova, A. A. Malyuga, U. A. Bliznyuk, P. Yu. Borshchegovskaya, S. A. Zolotov, Ya. V. Zubritskaya, V. S. Ipatova, A. P. Chernyaev, I. A. Rodin 69

RESEARCH METHODS

- Sample Preparation of QuEChERS in the Determination of Pesticides in Apples by Chromatography-Mass Spectrometry
A. Z. Mukharlyamova, M. V. Balymova, A. G. Mukhammetshina, K. Ye. Burkin, F. A. Bekmuratova 79

REVIEWS

- Negative Effects of Imidazolinone Herbicides Usage: Problems and Desicions
V. V. Bychkova, I. A. Sazonova, P. S. Pidenko, S. A. Pidenko 87
-

АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛОДОРОДИЯ ПАХОТНЫХ ЛУГОВЫХ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ПОЧВ ПРИМОРСКОГО КРАЯ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ[§]

© 2023 г. Е. А. Жарикова^{1,*}, М. Л. Бурдуковский¹, О. М. Голодная¹

¹Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН
690022, Владивосток, просп. 100 лет Владивостоку, 159, Россия

*E-mail: ejarikova@mail.ru

Поступила в редакцию 14.09.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Представлены результаты исследования агрохимических свойств луговых дифференцированных почв реперных участков, находящихся длительный период в сельскохозяйственном обороте. За 35 лет интенсивного использования почв содержание гумуса, обменная кислотность и степень насыщенности основаниями практически не изменились. Выявлено снижение величины гидrolитической кислотности и содержания подвижного фосфора, а также значительное увеличение содержания обменного калия. Отмечена тенденция к снижению содержания обменных оснований. Рассчитанный комплексный показатель агрохимического состояния почвы указывает на разнонаправленность изменения плодородия почв исследованных участков, что связано с различиями в обеспеченности гумусом и подвижным фосфором. Выявлена необходимость в повсеместном внесении фосфорных удобрений и снижении дифференциации плодородия почв различных участков.

Ключевые слова: плодородие, гумус, фосфор, калий, обменные основания, индикаторы кислотности, реперные участки.

DOI: 10.31857/S0002188123020138, **EDN:** MTFRKK

ВВЕДЕНИЕ

Продовольственную безопасность любого государства обеспечивает в первую очередь наличие одного из важнейших перемещаемых и незаменимых экономических ресурсов — земельного. В Приморском крае доля сельскохозяйственных угодий составляет 10.07% от общей площади сельскохозяйственных угодий Дальневосточного федерального округа. В составе земель сельскохозяйственного назначения края это более 80%, из которых на пашню приходится 703.8 тыс. га (19.676%). Данные показатели постепенно и неуклонно снижаются, в частности, за счет перевода земель в другие категории [1]. Тем важнее поддержание стабильного уровня плодородия почв, изменение которого на земельных территориях

находится в тесной зависимости от действия нескольких разнонаправленных факторов. Снижению уровня плодородия, с одной стороны, способствуют интенсификация процессов минерализации органического вещества в почвах под влиянием глобального изменения климата и распашки, снижение запасов питательных элементов вследствие их отчуждения урожаем. С другой стороны, внесение удобрений, различные мелиоративные и агротехнические мероприятия стабилизируют и улучшают агрохимические показатели почв. В зависимости от преобладающего действия данных факторов плодородие пахотных почв может снижаться, стабилизироваться либо улучшаться относительно исходного состояния.

Значительное снижение внесения минеральных и практически полное отсутствие органических удобрений, фактический отказ от системы сбалансированных севооборотов ради выращивания более выгодных полевых культур ведут к снижению плодородия и деградации интенсивно ис-

[§]Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме № 121031000134-6 “Динамика почвенного и растительного покрова континентальных и островных территорий Восточной Азии в условиях экологической нестабильности”.

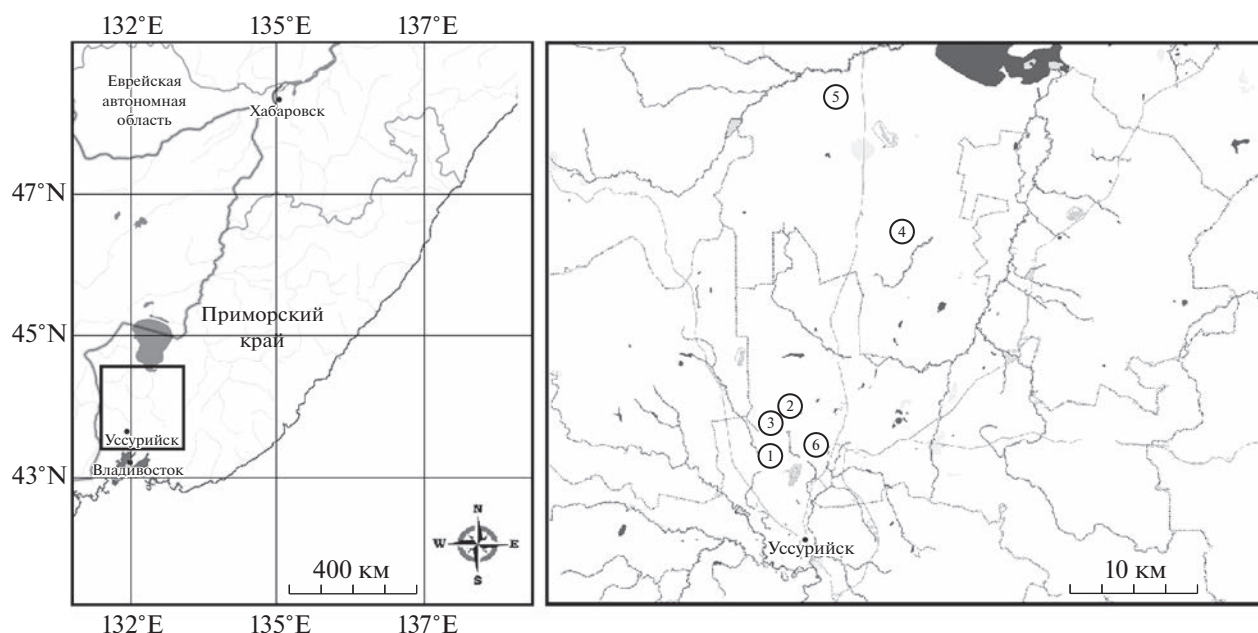


Рис. 1. Карта-схема района исследований, реперные участки: 1 – Воздвиженский, 2 – Степной, 3 – Ленинский, 4 – Благодатный, 5 – Поповский, 6 – Михайловский.

пользуемых почв [2–4]. Общемировая тенденция к использованию в качестве доминирующих высокоурожайных сортов сои и кукурузы способствует заметному уменьшению обеспеченности почв элементами питания. В связи с этим в последние годы в США и Канаде зафиксировано увеличение количества пахотных угодий с критически низким уровнем содержания подвижных форм фосфора и калия [5].

В Приморском крае доля сельскохозяйственных угодий с неблагоприятными агрохимическими свойствами почв, с учетом возможных комбинаций негативно влияющих факторов, составляет 93.26%. При этом доля средне-, сильно- и очень сильнокислых почв ($pH < 5.0$) равна 26.95% [1]. Хотя, согласно концепции нейтрального баланса, по показателю продуктивности в Приморье доля земель в стабильном и улучшенном состоянии составляет более 90%, край находится в первой десятке субъектов РФ по снижению запасов органического углерода в агропочвах [6].

Вследствие отсутствия центра агрохимической службы почвенно-агрохимическое обследование сельскохозяйственных земель, позволяющее определить эффективность комплекса агротехнических, агрохимических, противоэрозийных, мелиоративных и других мероприятий, в Приморье проводится крайне нерегулярно и на небольших площадях [3, 7]. Мизерные сведения о плодородии являются одним из следствий активно

проводимой земельной политики, в которой земли рассматриваются лишь как недвижимость, а не природный ресурс, являющийся национальным достоянием [8].

В почвенном покрове Приморского края одними из наиболее плодородных считаются луговые дифференцированные почвы. Несмотря на то, что они занимают всего 953.2 тыс. га (5.79%), на них приходится 34.5% пахотных угодий, поэтому анализ динамики свойств данных почв представляет как научный, так и практический интерес [9]. Данные почвы имеют преимущественно средне- и тяжелосуглинистый состав, приурочены к пологим низковершинным увалам и террасам среднечетвертичного возраста, формируются под разнотравно-злаковыми остепненными лугами и в настоящее время в целинном состоянии практически не встречаются (рис. 1) [10].

К сожалению, анализ имеющихся литературных и картографических материалов часто вызывает затруднение вследствие отсутствия в России единой общепризнанной классификации почв. Согласно классификации и диагностике почв СССР [11], исследованные почвы относятся к луговым подбелам оподзоленным, при кадастровой оценке сельскохозяйственных угодий Приморского края они были выделены как лугово-бурые оподзоленные [12]. В Классификации почв России данные почвы соответствуют агротемному-муловым подбелам [13, 14]. В научной литературе

они встречаются как луговые подбелы, лугово-бурые и лугово-бурые отбеленные почвы [2, 10]. В Едином государственном реестре почвенных ресурсов России (ЕГРПР) эти почвы описаны как луговые дифференцированные [15].

Цель работы — установить на реперных участках тренды изменения плодородия луговых дифференцированных почв Приморья в условиях длительного интенсивного сельскохозяйственного использования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления плодородия среднесуглинистых луговых дифференцированных почв были использованы результаты агрохимического обследования почв реперных полей сотрудниками ГЦАС “Приморский” в 1986 г. и авторами в 2021 г. Данные агрохимических свойств целинных ненарушенных почв получены из литературных источников [10] и фондовых материалов ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН.

Обследование почв проводили на реперных участках, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения согласно методическим указаниям по проведению локального мониторинга на реперных и контрольных участках [16]. Площадь каждого реперного участка составляла 8 га. Для уточнения классификационной принадлежности почв были заложены пробные площадки размером 10 × 10 м с почвенными разрезами, смешанные образцы из пахотного слоя (0–20 см) отобраны ручным буром методом конверта (рис. 1). Аналитические работы были выполнены согласно общепринятым методикам: содержание гумуса определяли методом И.В. Тюрина, pH_{KCl} — потенциометрическим методом на pH -метре FE20-Kit FiveEasy (Mettler Toledo, Швейцария), гидролитическую кислотность — по Каппену, сумму обменных оснований — по Каппену–Гильковицу. Подвижные соединения элементов питания определяли в 0.2 н. солянокислой вытяжке (по методу Кирсанова), фосфор — колориметрическим методом на КФК-2, калий — методом пламенной фотометрии на ПФА-378 [17]. Все определения выполнены в трехкратной повторности. Оценку агрохимических показателей проводили по шкале, разработанной В.И. Оздобихиным и Э.П. Синельниковым для почв Приморского края [18].

Показатель агрохимического состояния почвы (АСП), отражающий сочетание гумусово-пищевых и физико-химических параметров, рассчитывали как среднее от суммы индивидуальных по-

Таблица 1. Базовые показатели оценки агрохимических свойств почв Приморского края [2]

Показатель	Оптимальное содержание X_{opt}	Минимальное содержание X_{min}
Гумус, %	4.6	0.5
pH_{KCl} , ед. pH	5.8	3.5
H_T , смоль (экв)/кг почвы	8.6	0.5
S , смоль (экв)/кг почвы	27	5
P_2O_5 подвижный, мг/кг почвы	70	5
K_2O подвижный, мг/кг почвы	145	20

Примечание. H_T — гидролитическая кислотность, S — сумма обменных оснований. То же в табл. 2, 3.

казателей, каждый из которых определяли по формуле С.Д. Черемушкина [19]:

$$АСП \text{ (в баллах)} = \frac{(X_{fact} - X_{min})}{(X_{opt} - X_{min})} \times 100, \quad (1)$$

где X_{fact} — фактическая величина агрохимического показателя, X_{opt} и X_{min} — оптимальная и минимальная величины для данной почвы. Для Приморского края X_{opt} и X_{min} были определены Э.П. Синельниковым и Ю.И. Слабко в результате многолетних исследований (табл. 1) [2]. Все статистические характеристики получены с помощью программы Microsoft Office Excel 2007. Оценка различий средних величин сопряженных выборок агрохимических свойств почв 1986 и 2021 гг. по t -критерию Стьюдента показала, что разница была существенной только для содержания обменного калия.

В конце прошлого века (1970–1990 гг.) на исследуемых полях в полевой севооборот входили зерновые с подсевом многолетних трав, пар сидеральный, соя, зерновые (ячмень, овес, гречиха, пшеница), многолетние травы. В настоящее время выращивают только сою и кукурузу в чередовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Естественные луговые дифференцированные почвы Приморья обладают достаточно высоким уровнем плодородия. Преимущественно слабокислые, они хорошо гумусированы, характеризуются средним содержанием подвижного фосфора и высоким содержанием доступного калия. Сумма обменных оснований в них оценивается как высокая, а степень насыщенности почвенного

Таблица 2. Агрохимические свойства целинных луговых дифференцированных почв

Показатель	Гумус, %	pH _{KCl}	H_{Γ}	S	V , %	P ₂ O ₅	K ₂ O
			смоль (экв)/кг почвы			мг/кг почвы	
Естественные почвы, $n = 9$							
Min	3.3	4.5	3.4	19.0	75	21	107
Max	14.0	5.9	12.0	37.0	87	70	250
M	7.1	5.1	5.5	27.3	83	43	187
$\pm m$	1.34	1.70	1.85	9.1	27.3	14.6	62.5
V , %	56	9	49	25	4	31	33

Примечание. V – степень насыщенности основаниями, n – количество образцов, Min – наименьшая величина, Max – наибольшая величина, M – среднее арифметическое, $\pm m$ – ошибка среднего арифметического, V , % – коэффициент вариации. То же в табл. 3.

поглощающего комплекса обменными основаниями – как повышенная (табл. 2).

Интенсивное использование почв в земледелии заметно изменило их свойства. Распашка способствовала снижению содержания гумуса и подвижного фосфора, гидролитической кислотности и суммы обменных оснований. На прежнем уровне остались величина обменной кислотности и степень насыщенности почв основаниями. Снизилась вариабельность большинства изученных показателей.

За период 1986–2021 гг. среднее содержание гумуса в почвах реперных участков несколько возросло (на 0.14%), но по-прежнему оценивается как ниже среднего (табл. 3). При этом на участках Степной и Ленинский в настоящее время оно выросло до среднего, в то время как на участках Благодатный, Поповский и Михайловский осталось в прежней градации при снижении числовых показателей. Минимальное содержание сохранилось на прежнем уровне, но выросли максимальные показатели, заметно увеличился коэффициент вариации, что было результатом заметного увеличения содержания гумуса на отдельных полях, а не его равномерного роста повсеместно. Стагнация слабой обеспеченности гумусом является следствием практически полного прекращения внесения навоза, когда пополнение почв органическим веществом происходит лишь за счет листового опада и пожнивных остатков [20, 21]. Кроме этого, при устоявшемся производстве аграрной продукции происходит также стабилизация накопления и трансформации корневого детрита, а одним из наиболее реалистичных способов накопления гумуса является введение в севооборот посевов трав [22, 23]. В современном интенсивном земледелии роль гумуса как источника элементов питания невелика, но его значение в регулировании гидрофизического и биоло-

гического режимов огромно, как и его санитарно-буферная функция [24].

Величина обменной кислотности в целом изменилась слабо, уменьшился диапазон варьирования. Подкисление отмечено на участках Воздвиженский (переход из почв слабокислых в среднекислые) и Поповский (переход из близких к нейтральным в слабокислые). Улучшились показатели на участках Степной и Михайловский. Сложившаяся ситуация несомненно вызвана несбалансированным известкованием. Средняя величина гидролитической кислотности снизилась с низкой до очень низкой. Полученные данные подтверждают наличие тесной связи между величинами обменной и гидролитической кислотностей: $r = -0.76$, (1986 г.) и $r = -0.97$ (2021 г.) (при $P = 0.95$), что ранее было отмечено также для дерново-подзолистых почв [25]. Для обоих параметров сузился диапазон изменений и снизился коэффициент варьирования.

Средняя величина суммы обменных оснований в период с 1986 по 2021 г. снизилась с высокого уровня до повышенного, при этом увеличились пределы изменений и величина коэффициента вариации. Наиболее заметное снижение отмечено на участках Благодатный и Поповский (до среднего уровня). Подобный тренд к снижению величины суммы обменных оснований при длительном использовании почв в земледелии уже был отмечен для серых лесных почв [26]. Степень насыщенности почв основаниями со временем практически не изменилась, оставаясь на повышенном уровне.

Среднее содержание подвижного фосфора на реперных участках в 1986 г. оценивалось как низкое, в 2021 г. – как очень низкое. Значительное снижение зафиксировано на участках Воздвиженский, Степной, Поповский, небольшой рост – на участках Благодатный и Михайловский. За

Таблица 3. Агрохимические свойства пахотных луговых дифференцированных почв

Реперный участок	Гумус, %	pH _{KCl}	H_T	S	V , %	P ₂ O ₅	K ₂ O
			смоль (экв)/кг почвы			мг/кг почвы	
1986 г.							
Воздвиженский	3.30	5.2	3.3	18.9	85	39	57
Степной	3.60	4.7	4.6	18.7	80	70	82
Ленинский	3.43	5.1	3.4	24.8	88	7	96
Благодатный	3.74	5.1	3.7	21.4	85	23	122
Поповский	3.50	5.7	2.2	20.5	90	39	100
Михайловский	3.70	5.1	2.1	18.4	90	15	98
Min	3.30	4.7	2.1	18.4	80	7	57
Max	3.74	5.7	4.6	24.8	90	70	122
M	3.55	5.1	3.3	20.4	86	32	92.4
$\pm m$	0.07	0.1	0.35	1.01	1.5	9.6	9.9
V , %	5	7	27	12	4	73	26
2021 г.							
Воздвиженский	3.69	4.8	3.3	25.6	89	22	162
Степной	4.16	5.1	2.9	19.6	71	8	180
Ленинский	4.17	5.1	2.7	26.4	91	9	188
Благодатный	3.49	5.3	2.6	11.2	81	50	129
Поповский	3.30	5.4	2.1	11.1	84	15	174
Михайловский	3.31	5.6	1.9	17.6	90	33	229
Min	3.30	4.8	1.9	11.1	71	8	129
Max	4.17	5.6	3.3	26.4	91	50	229
M	3.69	5.2	2.6	18.6	84	23	177
$\pm m$	0.16	0.11	0.20	2.73	3.0	6.6	14
V , %	11	6	19	36	9	71	19

счет уменьшения максимальных показателей снизились и пределы их изменений, хотя коэффициент вариации остался практически на прежнем уровне, что указывало на высокую степень неоднородности обеспеченности исследованных участков доступным для растений фосфором. Поскольку $\approx 80\%$ поглощенного фосфора отчуждается урожаем, возникает насущная необходимость в регулярном его внесении в виде удобрений [5, 27], тем более, что активно практикуемые в последнее время бессменные посевы или плодосмены соя—кукуруза способствуют повышенному выносу фосфора из почв. Полученные данные подтверждали негативное состояние почв Дальнего Востока, где пахотные почвы с очень низким и низким содержанием фосфора составляют 59.1% [1]. Поэтому сбалансированное и обоснованное внесение фосфорных удобрений не потеряло своей актуальности [2, 3].

Результатом внесения калийных удобрения стало заметное улучшение обеспеченности почв подвижным калием [28], его содержание из грации среднее преимущественно перешло в гра-

цию высокое. Как повышенное оно характеризуется только на участках Воздвиженский и Благодатный.

Анализ величин рассчитанного комплексного показателя агрохимического состояния почвы (АСП) свидетельствовал о разнонаправленности изменения плодородия исследованных реперных участков (рис. 2). В наибольшей степени за период 1986—2021 гг. величина показателя АСП увеличилась на участках Михайловский (за счет снижения обменной кислотности и увеличения содержания фосфора и калия), Ленинский (за счет увеличения содержания гумуса, подвижного калия и суммы обменных оснований и снижения гидролитической кислотности) и Воздвиженский (за счет увеличения содержания гумуса, подвижного калия и суммы обменных оснований). Практически стабильным осталось состояние плодородия на участке Степной (несмотря на увеличение содержания гумуса и подвижного калия произошло резкое снижение содержания подвижного фосфора). Уровень плодородия реперного участка Благодатный снизился за счет

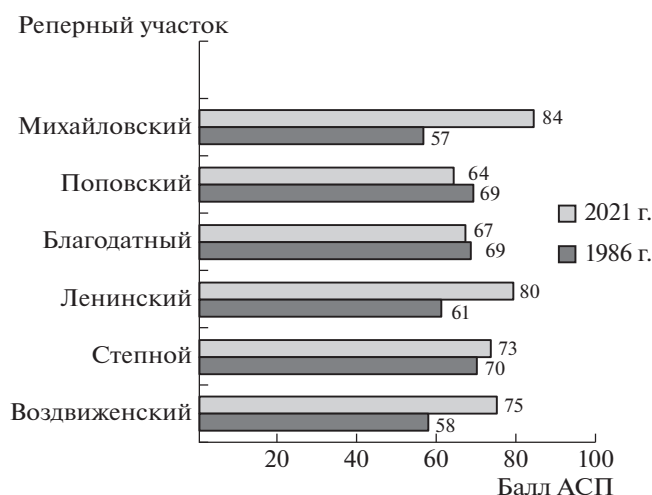


Рис. 2. Изменение показателя агрохимического состояния почвы (АСП) за период 1986–2021 гг.

уменьшения содержания гумуса и обменных оснований, а участка Поповский — еще и за счет снижения количества подвижного фосфора. Средняя величина АСП реперных участков увеличилась с 66 (1986 г.) до 74 (2021 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, интенсивное использование луговых дифференцированных почв в качестве пахотных угодий заметно изменило их свойства. После распашки в почвах зафиксировано снижение содержания гумуса, показателей гидролитической кислотности, содержания суммы обменных оснований и подвижного фосфора. За период интенсивного использования (1986–2021 гг.) содержание гумуса, обменная кислотность и степень насыщенности основаниями в целом практически не изменились. Выявлено снижение величины гидролитической кислотности и содержания подвижного фосфора, а также значительное увеличение содержания подвижного калия.

Величина комплексного показателя агрохимического состояния почвы (АСП) свидетельствовала о разнонаправленности изменения плодородия почв различных реперных участков, но средний показатель АСП за исследованный период увеличился. Уровень плодородия вырос на участках Ленинский, Михайловский и Воздвиженский, стабилизировался на участке Степной и снизился на участках Благодатный и Поповский.

В настоящий момент нет достаточных оснований говорить о значительном ухудшении агрохимического состояния исследованных луговых дифференцированных почв реперных участков

Приморского края, хотя очевидна насущная необходимость в повсеместном внесении фосфорных удобрений и снижении дифференциации плодородия почв различных участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году. М.: Росинформагротех, 2021. 404 с.
2. Синельников Э.П., Слабко Ю.И. Агрогенезис почв Приморья. М.: ВНИИА, 2005. 280 с.
3. Мухина Н.В., Суржик М.М. К вопросу оперативного контроля почвенного плодородия при выращивании сельскохозяйственных культур на юге Дальнего Востока // Усп. совр. естествозн. 2020. № 4. С. 35–40.
4. Емельянов А.Н., Слабко Ю.И., Пуртова Л.Н., Мохань О.В. Состояние и трансформация плодородия почв Приморского края // Вестн. ДВО РАН. 2022. № 3. С. 7–17.
5. Бендер Р.Р., Хаегеле Дж.В., Руффо М.Л., Белоу Ф.Е. Динамика поглощения элементов питания современными гибридами кукурузы // Вестн. междуна-род. ин-та питания раст. 2014. № 1. С. 8–13.
6. Андреева О.В., Куст Г.С. Оценка состояния земель в России на основе концепции нейтрального баланса их деградации // Изв. РАН. Сер. географ. 2020. Т. 84. № 5. С. 737–749.
7. Нестерова О.В., Семаль В.А., Трегубова В.Г. Правовое и организационное совершенствование механизмов сохранения плодородия почв и земель Российской Федерации (на примере Дальнего Востока) // Почвоведение. 2016. № 6. С. 765–772.
8. Разумов В.В., Молчанов Э.Н., Разумов Н.В., Братков В.В. К проблеме изучения воздействия деградационных и опасных природных процессов на сельскохозяйственные земли России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 50–70.
9. Костенков Н.М., Ознобихин В.И. Почвы и почвенные ресурсы юга Дальнего Востока и их оценка // Почвоведение. 2006. № 5. С. 517–526.
10. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
11. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н., Розов Н.Н. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
12. Костенков Н.М., Ознобихин В.И., Жарикова Е.А., Толстоконева Е.Н., Травин В.А. Кадастровая оценка земель Приморского края // Международ. сел.-хоз. журн. 2007. № 3. С. 47–51.
13. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
14. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
15. Алёбина И.О., Андроханов В.А., Вершинин В.В., Волков С.Н., Ганжара Н.Ф., Добровольский Г.В., Иванов А.В., Иванов А.Л., Иванова Е.А., Ильин Л.И.,

- Карпачевский М.Л., Каиштанов А.Н., Кирюшин В.И., Колесникова В.М., Колесникова Л.Г., Лойко П.Ф., Манылов И.Е., Маречек М.С., Машинова Э.Н., Молчанов А.Ф., Прохоров А.Н., Пягай Э.Т., Рожков В.А., Рыбальский Н.Н., Савин И.Ю., Самойлова Н.С., Сапожников П.М., Сизов В.В., Столбовой В.С., Суханов П.А., Урусевская И.С., Чочаев А.Х., Шеремет Б.В., Шоба С.А., Яковлев С.А. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Верс. 1.0. Коллективная монография / Под ред. Иванова А.Л., Шобы А.С. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
16. Сычев В.Г., Кузнецов А.В., Павлихина А.В., Кручинина Л.К., Васильева Н.М., Лобас Н.В. Методические указания по проведению локального мониторинга на реперных и контрольных участках. М.: Росинформагротех, 2006. 76 с.
 17. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
 18. Оздобихин В.И., Синельников Э.П. Характеристика основных свойств почв Приморского края и пути их рационального использования. Уссурийск: Изд-во Приморского СХИ, 1985. 72 с.
 19. Черемушкин С.Д. Теория и практика экономической оценки земель. М.: Сельхозгиз, 1963. 256 с.
 20. Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Ковшик И.Г. Изменение агрохимических свойств пахотных почв юга Дальнего Востока России при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1244–1250.
 21. Бурдуковский М.Л., Голов В.И. Накопление и вынос элементов питания и тяжелых металлов растением сои // Маслич. культуры. Научн.-техн. бюл. ВНИИМК. 2011. № 1. С. 94–100.
 22. Иванов А.Л., Куст Г.С., Козлов Д.Н., Андреева О.В., Андронов Е.Е., Бардин М.Ю., Вильфанд Р.М., Говоркова В.А., Десяткин Р.В., Зволинский В.П., Иванова Е.А., Карпова Д.В., Катцов В.М., Киктев Д.Б., Кирюшин В.И., Кислов А.В., Корзухин М.Д., Костовска С.К., Кулинцев В.В., Лобковский В.А., Мартынюк А.А., Павлова В.Н., Панченко И.И., Паищевский В.С., Перевертин К.А., Першина Е.В., Романовская А.А., Савин И.Ю., Соломина О.Н., Степанов А.Л., Столбовой В.С., Страшная А.И., Тарасова Л.Л., Тихонович И.А., Тельнова Н.О., Филиппчук А.Н., Хан В.М., Хитров Н.Б., Чекмарев П.А., Чернов Т.И., Школьник И.М., Якушев В.П. Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад / Под ред. А.И. Бедрицкого. Т. 1. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, ГЕОС, 2018. 357 с.
 23. Пуртова Л.Н., Киселева И.В. Влияние фитомелиорации на показатели плодородия и интегральное отражение агрогенных почв Приморья // Вестн. ДВО РАН. 2019. № 1. С. 51–57.
 24. Минеев В.Г. Химизация земледелия и плодородная среда // М.: Агропромиздат, 1990. 288 с.
 25. Уткин А.А. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской области // Агрохимия. 2022. № 6. С. 3–13.
 26. Уткин А.А., Лукьянов С.Н. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // Агрохимия. 2022. № 3. С. 12–21.
 27. Голов В.И. Особенности поглощения и выноса элементов питания и тяжелых металлов растением сои // Маслич. культуры. Научн.-техн. бюл. ВНИИМК. 2009. № 1. С. 96–100.
 28. Berezhnaya V.V., Kushayeva E.J., Timoshinov R.V., Klykov A.G. Changes in the fertility of meadow-brown bleached soil with long-term use of different fertilizer systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 677. № 4. P. 042049.

Agrochemical Parameters of the Fertility of the Arable Meadows Differentiated Soils of the Primorsky Region in the Conditions of Long-Term Agricultural Use

E. A. Zharikova^{a, #}, M. L. Burdukovskii^a, and O. M. Golodnaya^a

^aFederal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
prosp. Stoletiya Vladivostoka 159, Vladivostok 690022, Russia

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

The results of studies of the agrochemical properties of meadow differentiated soils of reference plots that have been in agricultural circulation for a long period are presented. The humus content, exchange acidity and the degree of saturation with bases have not changed much over 35 years of intensive soil use in agriculture. A decrease of hydrolytic acidity and the content of available phosphorus, as well as a significant increase in the content of exchangeable potassium was revealed. A trend towards a decrease in the content of exchange bases was noted. The calculated complex indicator of the agrochemical state of the soil indicates the multidirectional change in soil fertility in the studied areas, which is associated with differences in the availability of mobile forms of phosphorus and humus. The need for the widespread application of phosphorus fertilizers and a decrease in the differentiation of soil fertility in various areas has been identified.

Key words: fertility, humus, phosphorus, potassium, exchange bases, acidity indicators, reference sites.

УДК 631.81:631.82:631.445.12

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИЕМОВ БИОКОНВЕРСИИ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ УДОБРЕНИЙ В ЗЕЛЕННЫЕ КОРМА НА ТОРФЯНИКЕ

© 2023 г. Т. Ю. Анисимова

Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа – филиал Верхневолжского ФАНЦ

601390 п. Вяткино, Судогодский р-н, Владимирская обл., ул. Прянишникова, 2, Россия

E-mail: anistan2009@mail.ru

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

После доработки 09.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В полевом двухфакторном опыте изучили эффективность использования минеральных удобрений в сочетании с прямым севом семян трав в дернину выработанного торфяника для разработки мало-затратных приемов биоконверсии питательных веществ минеральных удобрений в зеленые корма. В ходе агроэкономической и энергетической оценки использованных агроприемов установлено, что сочетание подсева и внесения минеральных удобрений было эффективным и способствовало получению самой высокой прибыли, которая составила 24–53 тыс. руб./га, снижению себестоимости 100 к.е./га в среднем на 41–46%, повышению энергоотдачи затрат в 1.8 раза по сравнению с контролем. Наибольшая окупаемость кормовой единицы 1 кг NPK отмечена в вариантах с окультуренным удобрением фитоценозом, этот показатель вырос в среднем в 1.2–1.6 раза по сравнению с вариантами естественных фитоценозов. Учитывая показатели почвенного плодородия и окупаемости затрат на проведение комплекса агроприемов, сделан вывод, что оптимальной дозой минеральных удобрений в естественном фитоценозе (без подсева) была доза N60P90K120, в окультуренном фитоценозе – дозы N60P60K90 и N60P90K120.

Ключевые слова: выработанный торфяник, минеральные удобрения, многолетние травы, прямой сев, чистый доход, рентабельность, агроэнергетический коэффициент

DOI: 10.31857/S0002188122120031, **EDN:** SOJMIY

ВВЕДЕНИЕ

Для удешевления себестоимости сельскохозяйственной продукции необходим поиск малозатратных приемов возделывания культур на основе рационального применения средств химизации и биологизации при обязательном сохранении и воспроизводстве плодородия почвы. Вопрос создания на торфяных почвах культурных долголетних сенокосов по-прежнему актуален с экологической точки зрения: это позволит избежать риска природных пожаров, деградации почв. Многолетние травы лучше всего адаптированы к условиям выработанных торфяников, они полнее используют атмосферные осадки и почвенный азот, характеризуются стабильным долголетием и продолжительным вегетационным периодом, в течение которого они несколько раз отчуждаются, что определяет особенности их минерального питания и потребность во внесении удобрений [1, 2].

Использование агрономической, экономической и энергетической оценки позволяет выде-

лить наиболее выгодные варианты применения удобрения в сочетании с подсевом и без него, которые можно использовать в агропрактике при выращивании трав на выработанном торфянике. Цель работы – разработка эффективных малозатратных агротехнологических приемов повышения продукционной способности выработанного мелкоконтурного торфяника за счет биоконверсии питательных веществ минеральных удобрений в сочетании с прямым севом семян трав.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили с 2017 по 2021 г. на Байгушском торфяном месторождении (Владимирской обл.), тип торфяной залежи установлен как переходный (А – 15.4, R – 45%). На части одной из пяти торфяных карт в 2017 г. был заложен полевой опыт по определению влияния на плодородие почвы и продуктивность лугового фитоценоза ежегодного внесения минеральных удобрений с однократным при закладке опыта прямым

севом смеси семян клевера красного и тимopheев-ки луговой в ненарушенную дернину [3]. Почва опытного участка – болотно-подзолистая (Gleyic (Histic) Albeluvisols) со следующими агрохимическими характеристиками: содержание гумуса – 1.86–2.0%, pH_{KCl} 6.1–6.4, содержание подвижного фосфора – 56–75 мг/кг почвы, обменного калия – 46.5–58.2 мг/кг, мощность пахотного слоя – 27–39 см.

Исследования проводили по следующей схеме, варианты: 1 – естественный фитоценоз (ЕФ) без подсева клеверо-тимopheеечной смеси – абсолютный контроль, 2 – окультуренный фитоценоз (ОФ) с подсевом клеверо-тимopheеечной смеси, 3 – ЕФ + N60P60K90, 4 – ОФ + N60P60K90, 5 – ЕФ + N60P90K120, 6 – ОФ + N60P90K120. Площадь делянки 62.5 м² (12.5 × 5 м), повторность четырехкратная, общая площадь под опытом – 0.15 га.

Фосфорные (суперфосфат простой), калийные (калимаг) удобрения и часть азотных (аммиачная селитра) вносили в период весеннего отрастания трав путем поверхностного равномерного разбрасывания. Остальную часть азотных удобрений вносили после укоса трав.

Реализация исследовательских работ была основана на методике проведения опытов на сенокосах и пастбищах [4]. Анализы почвенных образцов выполнены в аналитической лаборатории с использованием следующих методов: определение pH_{KCl} – по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85), гидролитической кислотности – по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91), суммы поглощенных оснований – по методу Каппена (ГОСТ 27821-88), содержания подвижных соединений фосфора и калия – по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ Р 54650-2011).

Анализ растительных образцов проводили в соответствии с методиками: содержание азота – по ГОСТ Р 51417-99 с дальнейшим пересчетом в сырой протеин (коэффициент 6.25), фосфора – по ГОСТ 26657-97, калия – по ГОСТ 30504-97, содержание сухого вещества – по ГОСТ 31640-2012. Учет урожая трав проведен при наступлении начала фазы цветения бобовых растений и колошения злаковых. Определение качества зеленой массы многолетних трав исполнено также с использованием расчетных методик [5], оценка агроэкономической эффективности агроприемов выполнена с использованием методик, используемых в системе кормопроизводства [6, 7]. При расчете экономической и энергетической эффективности учитывали затраты на семена, удобрения, сев, уборку и доработку продукции, удельные затраты энергии на единицу урожая. Товар-

ный урожай оценивали в руб./кг в ценах 2021 г. Для объективной оценки изученных агроприемов их сравнивали с базовой технологией, применяемой на полевых участках с маломощными торфяно-болотными почвами, включающей операции: срезка кустарника и мелкокося кусторезом, безотвальная обработка плугами и боронование, дискование в несколько следов, планировка, внесение удобрений, прикатывание, сев, скашивание. Дозы удобрений, величина продуктивности трав при базовой технологии приняты такие же как в варианте “окультуренный фитоценоз + N60P90K120”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние агроприемов на агрохимическую характеристику почвы представлено в табл. 1. Показано, что применение удобрений и подсева не оказало негативного влияния на показатели pH и суммы обменных оснований в корнеобитаемом слое почвы полевого опытного участка. За 5 лет исследования в почве вариантов без удобрений зафиксировано увеличение содержания подвижного фосфора по сравнению с исходным на 3.7–3.8 мг/кг, обменного калия – на 9.6–31.9 мг/кг. В вариантах с применением удобрений содержание доступного растениям фосфора относительно исходного возросло в 2.0–2.6 раза, калия – в 3.1–4.7 раза, что можно объяснить как внесением минеральных удобрений в различных дозах, так и формированием большей биомассы корней и отавы трав после отчуждения урожая в удобренных вариантах опыта как с подсевом, так и без подсева. Таким образом, применение минеральных удобрений и опосредованно подсев способствовали накоплению запасов подвижных фосфора и калия в корнеобитаемом слое почвы, снижая риск деградации почвы выработанного торфяника.

Использование изученных агроприемов оказало значительное влияние на урожайность трав: за 4 года хозяйственного пользования их урожайность на фоне применения минеральных удобрений в сочетании с подсевом (варианты ОФ + N60P60K90 и ОФ + N60P90K120) достоверно превышала контрольный вариант, а также вариант с подсевом без удобрений (вариант ОФ) (табл. 2). При этом только применение подсева позволило повысить продуктивность трав в 2 раза, а применение удобрений без подсева (варианты ЕФ + N60P60K90 и ЕФ + N60P90K120) – в среднем 2.8–3.0 раза. Наибольшая продуктивность трав отмечена в вариантах ОФ + N60P60K90 и

Таблица 1. Агрохимическая характеристика почвы опытного участка (слой 0–20 см)

Вариант	pH _{KCl}		Содержание фосфора подвижного		Содержание калия обменного		Σ _{Ca + Mg} , мг-экв/100 г почвы	
			мг/кг					
	1	2	1	2	1	2	1	2
Естественный фитоценоз (ЕФ)	6.2	6.15	51.7	55.5	40.8	50.4	3.88	3.86
Окультуренный фитоценоз (ОФ)	6.15	6.25	48.4	52.1	32.1	56.8	3.76	4.04
ЕФ + N60P60K90	6.2	6.34	51.7	102	40.8	146	3.88	4.88
ОФ + N60P60K90	6.05	6.06	48.4	126	32.1	150	3.76	4.40
ЕФ + N60P90K120	6.2	6.29	51.7	110	40.8	128	3.88	4.88
ОФ + N60P90K120	6.05	6.14	48.4	102	32.1	123	3.76	4.76

Примечание. В графе 1 — до закладки опыта, 2 — в конце 5-го года опыта.

Таблица 2. Урожай зеленой массы многолетних трав, т/га

Вариант	Год пользования				Среднее	Сбор (среднее) за 4 года, ц/га	
	2018	2019	2020	2021		к.е.	ПП*
Естественный фитоценоз (ЕФ)							
Без удобрений (контроль)	0.34	0.65	7.8	2.4	2.8	5.6	1.8
N60H60K90	0.86	2.53	16.4	7.4	6.8	13.6	2.8
N60P90K120	1.0	3.85	21.9	8.0	8.7	17.3	3.6
Окультуренный фитоценоз (ОФ)							
Без удобрений	1.92	2.3	14.2	4.5	5.7	11.4	2.4
N60H60K90	2.46	5.01	27.6	13.5	12.1	24.3	5.1
N60P90K120	2.34	6.12	28.6	15.0	12.9	25.8	5.5
HCP ₀₅	0.4	1.3	2.7	3.0			
HCP ₀₅ фактор А	0.1	0.8	1.9	2.2			
HCP ₀₅ фактор Б	0.3	0.9	1.6	1.8			

Примечание. Фактор А — подсев, фактор Б — применение удобрений.

*ПП — переваримый протеин.

ОФ + N60P90K120, в этом случае урожайность превосходила абсолютный контроль в 4.3–4.8 раза.

Применение подсева и ежегодное внесение минеральных удобрений оказало положительное влияние на показатели питательной ценности зеленой массы трав: содержание кормовых единиц и переваримого протеина. Зеленая масса трав, выращенная в удобренном окультуренном фитоценозе (вариант ОФ), содержала в 2 раза больше ц к.е./га по сравнению с абсолютным контролем. В удобренных вариантах естественного фитоценоза в урожае трав величина продуктивности (ц к.е./га) увеличилась в среднем в 2.4–3.0 раза. В вариантах с подсевом и ежегодным внесением минеральных удобрений получены наибольшие показатели сбора кормовых единиц и они составили 24.3–25.8 ц/га, что превосходило контроль в

4.0–4.6 раза. Аналогичная тенденция влияния агроприемов при возделывании клеверо-тимофеечной смеси отмечена и при расчете содержания переваримого протеина в полученном зеленом корме.

Оценка агроэкономической эффективности агроприемов представлена в табл. 3. Применение удобрений в совокупности с подсевом трав (варианты ОФ + удобрения) обеспечило получение наибольшего чистого дохода (24.4–53.7 тыс. руб./га) и рентабельности (72.2–85.5%), а окупаемость кормовой единицы 1 кг NPK минеральных удобрений в этих вариантах возросла в 1.2–1.6 раза по сравнению с вариантами естественного фитоценоза (без использования подсева). Комбинация подсева и применение удобрений способствовали снижению себестоимости 100 кормовых единиц в

Таблица 3. Агроэкономическая эффективность использования прямого сева и применения удобрений на выработанном торфянике при выращивании многолетних трав (в сумме за 5 лет)

Вариант	Сбор к.е., ц/га	Стоимость продукции, руб./га	Себестоимость 100 к.е., руб.	Условно чистый доход, руб./га	Рентабельность производства, %	Окупаемость, к.е./кг NPK
Естественный фитоценоз						
Без удобрений	22.3	26748	1246	—	—	—
N60P60K90	54.4	65316	1107	5058	8.4	3.1
N60P90K120	69.4	83232	1002	13684	19.8	3.5
Окультуренный фитоценоз						
Без удобрений	45.8	54972	667	24405	79.8	—
N60P60K90	97.1	116568	647	53717	85.5	4.9 (7.1)*
N60P90K120	104	124572	697	52221	72.2	4.3 (6.0)*
Базовая технология						
—	104	1248572	849	36444	41.4	3.1

*К абсолютному контролю.

Таблица 4. Агроэнергетическая эффективность использования агроприемов при выращивании многолетних трав

Вариант	Выход с 1 га		Затраты совокупной энергии		Энергоотдача, ед.
	СВ, т	ОЭ, ГДж	на 1 га, ГДж	на 1 кг СВ, МДж	
Естественный фитоценоз					
Без удобрений (абсолютный контроль)	4.0	47.1	11.6	2.9	4.0
N60P60K90	7.9	61.1	38.6	4.9	1.6
N60P90K120	10.8	83.5	41.0	3.8	2.0
Окультуренный фитоценоз					
Без удобрений	10.0	69.4	12.5	1.2	5.5
N60P60K90	13.9	115	36.3	2.8	2.9
N60P90K120	16.9	144	41.8	2.6	3.4
Базовая технология					
—	16.9	144	91.8	5.4	1.6

Примечание. СВ — сухое вещество, ОЭ — обменная энергия.

среднем на 41% по сравнению с вариантами с удобрениями, но без подсева (естественным фитоценозом), и на 21% по сравнению вариантом виртуальной базовой технологии. Вместе с тем наибольший уровень снижения себестоимости 100 кормовых единиц (46%) отмечен в варианте с подсевом без удобрений (ОФ) по сравнению с абсолютным контролем (ЕФ).

Энергетическую оценку изученных агротехнологий проводили с учетом 4-х основных показателей: сбора обменной энергии с 1 га, окупаемости их сбором обменной энергии — агроэнергетическим коэффициентом (энергоотдачи) и удельных затрат на произведенный 1 ГДж энергии (табл. 4). В вариантах без применения минеральных удобрений (ЕФ и ОФ) установлены самые низкие затраты совокупной энергии на 1 га,

они составили 11.6–12.5 ГДж, а также, что логично, наибольший агроэнергетический коэффициент, который составил 4.0–5.5 при 2.0–3.4 в вариантах с удобрениями. Но все же это не означало, что варианты без удобрений были перспективными, запасы питательных веществ в почве этих вариантов почти не пополнялись, поэтому в этом случае существовал реальный риск деградации почвенного плодородия. Агроэнергетический анализ примененных приемов позволил обосновать наиболее выгодные предложения с учетом необходимости увеличения производства кормов. Энергетически оптимальными дозами удобрений в естественном фитоценозе можно было считать N60P90K120, в окультуренном фитоценозе — обе дозы N60P60K90 и N60P90K120.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что получение прибыли и наибольшая окупаемость 1 кормовой единицы в опыте зависело от удобрений и использования подсева семян трав. Анализ агроэкономической и энергетической оценки показал, что сочетание приемов за 5 лет исследования (с 2017 по 2021 г.) было эффективным и способствовало снижению себестоимости 100 к.е./га в среднем на 41–46%, получению наибольшей прибыли, которая составила 24–53 тыс. руб./га. Сбор кормовых единиц с 1 га при применении только подсева возрос в 2 раза, разница между удобренными вариантами с подсевом и без него составила 1.5–1.8 раза, сбор кормовых единиц с 1 га был наибольшим в вариантах с подсевом на фоне внесения минеральных удобрений, по сравнению с контролем он возрос в 4.4–4.7 раза. Наибольшая окупаемость кормовой единицы 1 кг NPK также была отмечена в вариантах с окультуренным фитоценозом, этот показатель возрос в 1.2–1.6 раза по сравнению с естественным фитоценозом.

Было установлено, что применение подсева на фоне применения NPK повысило энергоотдачу в 1.8 раза. Поэтому, учитывая показатели окупаемости энергозатрат и влияние агроприемов на почвенное плодородие, можно сделать вывод, что экономически и энергетически оптимальными дозами удобрений в вариантах с естественным фитоценозом была доза N60P90K120, в вариантах с окультуренным фитоценозом — дозы N60P60K90 и N60P90K120.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковшова В.Н. Экологические аспекты использования выработанных торфяников под луговыми фитоценозами // Сб. мат-лов Междунаро. научн.-практ. конф., посвящ. 100-летию основания Кировской луго-болотной опытной станции “Многофункциональное адаптивное кормопроизводство”. ФНЦ “ВИК им. В.Р. Вильямса”, Кировская луго-болотная опытная станция, 2018. Вып. 18 (66). С. 29–35.
2. Мееровский А.С., Пастушок Р.Т., Бирюкович А.Л., Михайлова О.С. Технологический регламент производства зеленого корма и сырья для заготовки кормов на улучшенных сенокосах // Мелиорация. 2021. № 1 (95). С. 31–37.
3. Анисимова Т.Ю. Агроэкономическая и энергетическая оценка приемов выращивания многолетних трав на выработанном торфянике // Владимир. земледелец. 2021. № 3. С. 4–9. <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-3-4-9>
4. Новоселов Ю.К. Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. 2-е изд. М.: ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса, 1997. 197 с.
5. Сычев В.Г., Лепешкин В.В. Методические указания по оценке качества и питательности кормов. М.: МСХ РФ, ЦИНАО, 2002. 75 с.
6. Михайличенко Б.П., Кутузова А.А., Новоселов Ю.К. Методическое пособие по агроэнергетической и экономической оценке технологий и систем кормопроизводства. М.: РАСХН, 1995. 174 с.
7. Лазарев Н.Н. Агроэнергетическая эффективность улучшения природных и старосеяных сенокосов и пастбищ // Изв. ТСХА. 2005. № 4. С. 60–67.

Efficiency of Methods of Bioconversion of Fertilizer Nutrients into Green Fodder in a Peat Bog

T. Yu. Anisimova

*All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat –
a Branch unit of “Upper Volga Federal Agrarian Research Centre”,
ul. Pryanisnikova 2, p. Vyatkino, Sudogda district, Vladimir region 601390, Russia
E-mail: anistan2009@mail.ru*

In a two-factor field experiment, the effectiveness of the use of mineral fertilizers in combination with direct sowing of grass seeds in the turf of a cultivated peat bog was studied for the development of low-cost methods of bioconversion of nutrients of mineral fertilizers into green feeds. During the agro-economic and energy assessment of the agricultural practices used, it was established that the combination of sowing and application of mineral fertilizers was effective and contributed to obtaining the highest profit, which amounted to 24–53 thousand. rub/ha, reducing the cost of 100 k.e./ha by an average of 41–46%, increasing the energy efficiency of costs by 1.8 times compared to the control. The highest payback of a feed unit of 1 kg of NPK was noted in variants with cultivated fertilized phytocenosis, this indicator increased by an average of 1.2–1.6 times compared with variants of natural phytocenoses. Taking into account the indicators of soil fertility and the payback of the costs of carrying out a complex of agricultural practices, it was concluded that the optimal dose of mineral fertilizers in the natural phytocenosis (without sowing) was the dose of N60P90K120, in the cultivated phytocenosis — doses of N60P60K90 and N60P90K120.

Key words: developed peat bog, mineral fertilizers, perennial grasses, direct sowing, net income, profitability, agro-energy coefficient.

УДК 631.82:631.421.1:631.445.41 (470.4)

ИЗУЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В СТАЦИОНАРНОМ ОПЫТЕ В СТЕПНОМ ПОВОЛЖЬЕ

© 2023 г. В. В. Пронько^{1,*}, Д. Ю. Журавлев², Т. М. Ярошенко², Н. Ф. Климова²¹Научно производственное объединение “Сила жизни”
410005 Саратов, ул. Большая Садовая, 239, Россия²Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия

*E-mail: victor-pronko@mail.ru

Поступила в редакцию 08.08.2022 г.

После доработки 11.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Представлен анализ результатов, полученных за 48 лет в длительном стационарном опыте с удобрениями, который расположен в Саратовской обл. (Россия) на черноземе южном тяжелосуглинистом. Изучено влияние различных видов и доз минеральных удобрений на продуктивность 6-польного севооборота, урожайность и качество зерна возделываемых культур (озимой и яровой пшеницы, проса, ячменя, овса). Выявлены оптимальные для засушливой степи Поволжья дозы удобрений, обеспечивающие максимальные прибавки урожая и наибольшую окупаемость 1 кг д.в. удобрений. Показано влияние условий увлажнения вегетационного периода на урожайность зерновых культур, накопления белка в зерне и вынос из почвы элементов питания. Установлены масштабы потерь углерода, валовых запасов азота и фосфора как из удобренной почвы, так и при систематическом внесении различных доз минеральных удобрений за 48 лет наблюдений.

Ключевые слова: чернозем южный, длительный стационарный опыт, минеральные удобрения, продуктивность севооборота, окупаемость удобрений, степное Поволжье.

DOI: 10.31857/S0002188123020126, **EDN:** MTBCFJ

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития мирового земледелия улучшить состояние почвенного покрова агроландшафтов и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур можно путем рационального использования удобрений (исключения представляют только случаи мелиоративного и инженерного вмешательства). Из ранее опубликованных работ известно, что действие удобрений зависит от многих факторов: свойств почвы, климатических и погодных условий, биологических особенностей возделываемых культур, сроков, способов, доз внесения удобрений и соотношения в них питательных веществ [1, 2].

В свою очередь, удобрения, внесенные в почву, заметно влияют не только на урожайность сельскохозяйственных культур, но и на плодородие почвы [3]. Оценить то многостороннее действие удобрений, которое они оказывают на свойства почвы, можно только в стационарных опытах. Причем точность и обоснованность выводов повышается с увеличением продолжительности наблюдений. Это, безусловно, способству-

ет повышению достоверности прогнозных оценок изменения тех или иных показателей плодородия изученных почв.

Очень большое значение имеет еще одно обстоятельство. В Поволжье, начиная с середины 1950-х гг., происходит изменение климата. Вкратце оно сводится к следующему: отмечен устойчивый рост температуры воздуха, особенно в холодный период года. Зимы становятся более мягкими, также увеличиваются теплообеспеченность и продолжительность вегетационного периода. В холодный период выпадает большее количество осадков. Они повышают запасы влаги рано весной. Одновременно резко сократилась норма осадков за май–июль. На фоне роста температуры воздуха это увеличивает несоответствие между запасами влаги в почве и потребностями растений. По этим причинам в конце XX-го и в начале XXI-го веков участилась повторяемость засух сильной интенсивности [4].

Отмеченные изменения агроклиматических характеристик не только создают другие условия для роста и развития растений, но и, соответ-

ственно, изменяют их отзывчивость на удобрения. Снижается урожайность отдельных видов культур и увеличивается вариация урожайности по годам. Также изменяются количество и качество растительных остатков, соотношения между растворимыми и нерастворимыми соединениями гумуса, поведение в почве солей кальция и фосфора, активность почвенных микроорганизмов и ферментов. Отсюда становится очевидной настоятельная необходимость в создании и успешном функционировании сети длительных стационарных опытов и мониторинговых площадок с удобрениями.

В 1968 г. под руководством профессора М.П. Чуб в научно-исследовательском институте сельского хозяйства Юго-Востока (г. Саратов) на черноземе южном был заложен длительный стационарный опыт с удобрениями. Повторные закладки этого опыта во времени осуществляли после уравнительных посевов в 1969, 1970 и 1971 гг. До 1992 г. в опыте функционировал 6-польный зернопаропропашной севооборот со следующей сменой возделываемых культур: пар чистый—озимая пшеница—яровая пшеница—кукуруза на зеленую массу—яровая пшеница—ячмень. В 1992 г. приняли другую схему чередования культур, которая существует и в настоящее время: пар чистый—озимая пшеница—яровая пшеница—просо—ячмень—овес. В 2018 г. в опыте завершена 8-я ротация на всех 3-х закладках 6-польного севооборота. В настоящее время в стадии завершения проходит 9-я ротация.

Цель работы — обобщить результаты длительных наблюдений за изменениями продуктивности севооборота, урожайности зерновых культур, плодородия чернозема южного и окупаемости изученных систем удобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В первых 3-х ротациях вносили азотные, фосфорные и калийные минеральные удобрения. Было установлено, что за 20 лет применения калийных удобрений они не оказали положительного влияния как на урожайность культур, так и агрохимические свойства почвы. Поэтому, начиная с 4-й ротации, в опыте применяют только азотные и фосфорные минеральные удобрения, а также их различные сочетания. Ежегодно их заделывают осенью под отвальную вспашку на 22–25 см, которую применяют на всех полях севооборота. Только в посевах озимой пшеницы азотные удобрения вносят в позднеосеннюю подкормку.

Ранее в опыте присутствовали варианты с навозом крупного рогатого скота. В 1-й ротации на-

воз 40 т/га вносили под вспашку чистого пара. Во 2–5-й ротациях его дозу снизили до 20 т/га, начиная с 6-й ротации навоз перестали вносить по организационным причинам. В настоящее время в стационарном опыте ежегодно изучают 20–23 различных вариантов систем удобрения. Они позволяют определить оптимальную насыщенность севооборотов азотными и фосфорными удобрениями, выявить их лучшие дозы и сочетания для различных видов сельскохозяйственных растений, периодичность внесения в севообороте, обосновать приемы повышения окупаемости применяемых удобрений, установить влияние погодных условий на использование растениями удобрений, осуществить мониторинг за трансформацией агрохимических свойств почвы под влиянием удобрений.

Стационарный опыт размещен на черноземе южном малогумусном среднемощном тяжелосуглинистом. При закладке стационарного опыта в почве опытного участка содержание гумуса в слое 0–20 см составляло 4.60–4.45%, общего азота — 0.24, общего фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) — соответственно 0.12 и 1.60%. В степных агроландшафтах Поволжья (Самарская, Саратовская, Волгоградская, Пензенская обл.) на долю чернозема южного приходится ≈30% территории, что составляет >2 млн га.

Закладку стационарного опыта и агрохимические исследования осуществляли по общепринятым в Российской Федерации методическим указаниям [5, 6]. Повторность стационарного опыта в пространстве трехкратная. Площадь одной делянки — 235 м², их размещение — рендомизированное. Во время вегетации растений приемы ухода (подкормки, обработка пестицидами и др.) не проводили. Уборку урожая зерновых культур осуществляли малогабаритными комбайнами Сампо-500 и Сампо-130, кукурузы — вручную методом пробных площадок. Оставшуюся солому после уборки урожая отчуждали с поля. Подробное описание методики проведения стационарного опыта, используемых методов агрохимических анализов и результаты отдельных этапов исследований ранее опубликованы в российской научной литературе [7–9]. В настоящем сообщении подведены итоги изучения длительного действия минеральных удобрений на урожайность зерновых культур и плодородие чернозема южного за 8 ротаций 6-польного севооборота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продуктивность зернопарового севооборота и эффективность удобрений. Подсчет продуктивно-

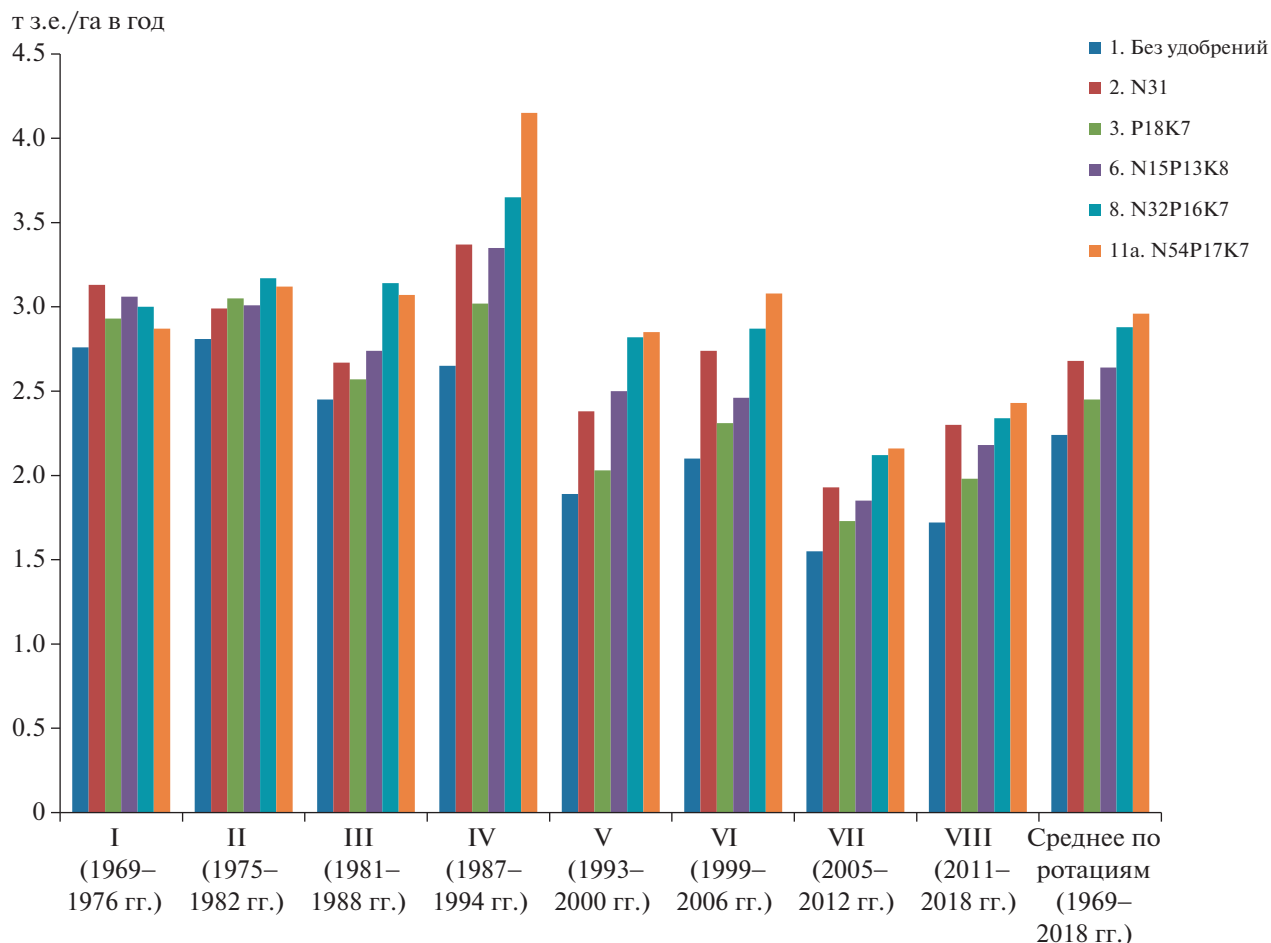


Рис. 1. Продуктивность зернопарового севооборота за 8 ротаций, т/га севооборотной площади.

сти севооборота осуществляли следующим образом. По принятым в Российской Федерации методикам, в каждом варианте подсчитывали не только массу урожая зерна, но и количество полученной побочной продукции. Для зерновых культур — это солома, для кормовых — надземная биомасса растений. Массу побочной продукции переводили в зерновые единицы (з.е.) с помощью переводных коэффициентов. Применительно к культурам данного севооборота они составляли: для соломы озимой пшеницы — 0.20, соломы яровой пшеницы — 0.25, соломы проса — 0.25, соломы ячменя — 0.25, овса — 0.30. Величину массы соломы умножали на соответствующие коэффициенты, получая зерновые единицы (в кг или т), и их суммировали с величиной массы зерна, полученного в том или ином варианте. Подобные перерасчеты производили в соответствии с «Методическими рекомендациями по проведению длительных стационарных опытов» под ред. В.Д. Панникова и В.Г. Минеева (М.: ВИУА, 1982).

Установлено, что влияние удобрений на урожайность как отдельных культур, так и продуктивность севооборота в целом, во многом зависело от погодных условий (рис. 1). В 1-й ротации севооборота преобладали годы с благоприятным увлажнением. В этих условиях наиболее эффективными оказались азотные удобрения (N31), обеспечившие прибавку урожая 0.37 т з.е./га. Прирост урожайности от фосфорных удобрений составлял лишь половину прибавки урожайности от азота (вариант 3). Более высокие дозы удобрений не имели преимущества, а окупаемость 1 кг д.в. при этом снизилась в 2 и более раза (вариант 11a).

Во 2-й ротации урожайность в контроле оказалась практически такой же, как и в 1-й ротации (2.80 т/га). Однако в связи с более засушливыми условиями действие фосфорных удобрений усилилось. Оптимальная прибавка урожайности в 0.38 т/га при наибольшей оплате 1 кг питательных веществ удобрений (6.2 кг з.е.) получена при применении N38P13K8 (вариант 7).

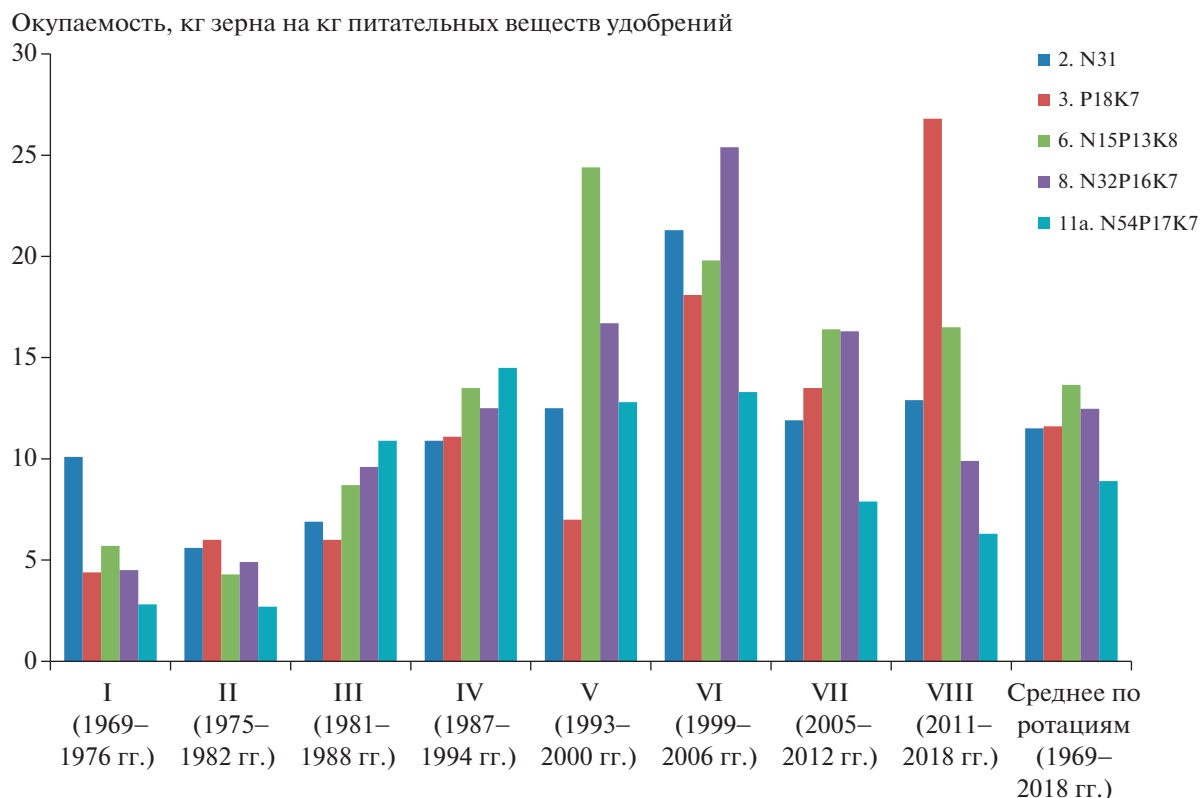


Рис. 2. Окупаемость д.в. удобрений урожаем зерна (кг) за годы исследований.

В период 3-й ротации сложились неблагоприятные погодные условия для возделывания зерновых. Урожайность в контроле по сравнению с 1-й ротацией снизилась на 11%, но при этом возросли абсолютные прибавки урожайности при применении удобрений. Наибольшее увеличение урожайности (на 0.69 т з.е./га) получено в варианте 8 (N32P16K7) при оплате 1 кг питательных веществ 9.6 кг з.е./га (рис. 2). Увеличение дозы азота до N54 (вариант 11a) не имело преимущества перед вариантом 8. В результате систематического применения фосфорных удобрений и накопления легкогидролизуемых фосфатов фосфорные удобрения в этой ротации действовали слабо. Невысокая прибавка урожая (0.22 т з.е./га) была получена и при применении азотных удобрений (N31).

Четвертая ротация по погодным условиям оказалась самой благоприятной за весь 48-летний период. Среднегодовая продуктивность в контрольном варианте составила 2.65 т з.е./га. Благодаря хорошей влагообеспеченности у культур возникла потребность в дополнительном минеральном питании, соответственно и прибавки урожая от удобрений в этой ротации заметно возросли (рис. 1).

Например, внесение N31 на 1 га севооборотной площади повысило урожайность на 0.72 т з.е./га, от P18K7 (вариант 3) — прибавка урожайности была в 2 раза меньше. Хорошие результаты в 4-й ротации показал вариант 8 (прибавка 0.92 т з.е./га) при оплате 1 кг питательных веществ 14.7 кг з.е. (рис. 2). Максимальный среднегодовой прирост урожайности в 1.5 т/га получен в варианте 11a при применении N54P17K7 при практически такой же оплате 1 кг питательных веществ (14.5 кг з.е.) как и в варианте 8.

В 5-й ротации имело место довольно резкое снижение урожайности в контроле (на 32% по отношению к 1-й ротации). Это было обусловлено неблагоприятными гидротермическими условиями в 1993–2000 гг. Самая высокая прибавка урожайности в этих условиях была получена в варианте 8 при применении N32P16K7 (0.86 т з.е./га) при оплате 1 кг д.в. удобрений 19.5 кг з.е. соответственно. Внесение N54P17K7 (вариант 11a) не сопровождалось ростом прибавки урожайности. При этом окупаемость 1 кг питательных веществ снизилась до 12.8 кг з.е.

В 6-й ротации по сравнению с 1-й продуктивность севооборота в контроле уменьшилась на 24%, что было следствием существенного умень-

шения плодородия неудобренной почвы. Максимальное увеличение урожайности на 0.98 т/га обеспечило применение N54P17K7 (вариант 11a). При этом резко снизилась оплата удобрениями 1 кг питательных веществ до 13.3 кг з.е.

В 7-й ротации продолжалось заметное снижение урожайности в контроле по сравнению с исходным показателем (на 44%). Оптимальную прибавку урожайности 0.3 т/га при оплате 1 кг питательных веществ в 16.4 кг з.е. получили в варианте 6 (N15P13K8/га севооборотной площади). Повышение дозы удобрений (N54P17K7) не имело существенного преимущества перед оптимальным вариантом. При этом в 2 раза снизилась окупаемость 1 кг удобрения урожаем з.е. Следует также отметить, что урожайность зерновых в 7-й ротации севооборота на фоне оптимальной дозы минеральных удобрений в варианте 6 (2.16 т з.е./га) не достигала уровня контроля в 1-й ротации (2.76 т з.е./га).

В 8-й ротации севооборота (2012–2018 гг.) среднегодовая продуктивность контрольного варианта была равна всего 1.41 т з.е./га. Внесение одних азотных удобрений (вариант 2) позволило получить 1.82 т з.е./га (рис. 1). В варианте 3 от фосфорных удобрений среднегодовая прибавка урожайности в севообороте составила 0.30 т з.е./га. Азотно-фосфорные удобрения в средних (вариант 8) и высоких (вариант 11a) дозах увеличили продуктивность за ротацию до 1.94 и 2.10 т з.е./га соответственно. Однако окупаемость 1 кг д.в. удобрений снизилась при этом с 7.5 в варианте 8 до 5.5 кг з.е. в варианте 11a (рис. 2).

В среднем за 48 лет исследования продуктивность зернопарового севооборота в агроландшафтах степного Поволжья без внесения удобрений составила 2.24 т з.е./га севооборотной площади. Максимальная среднегодовая урожайность (2.96 т/га) получена при внесении N54P17K7/га севооборотной площади (вариант 11a). Близкие результаты (2.88 т з.е./га) показало применение N32P16K7. Окупаемость 1 кг д.в. удобрений в этих вариантах составила соответственно 8.9 и 12.5 кг з.е.

Ежегодные учеты урожайности и ее прибавки от удобрений в рассматриваемом стационарном опыте позволили обосновать новые выводы, имеющие большое научное и практическое значение.

1. Опровергнуто устоявшееся в агрономических кругах мнение (впервые оно было изложено в научной литературе России еще в 1930-е гг.) о том, что в засушливых условиях Юго-Востока удобрения действуют слабо. В нашем опыте максимальные прибавки урожайности при приме-

нии оптимальных доз удобрений в 1-й ротации достигли 0.37 т з.е./га (13% к контролю), а в 8-й ротации — 0.71 т/га (41% к контролю). Следовательно, в засушливых агроландшафтах Поволжья можно получить такие же, как и в благоприятных условиях, абсолютные (в т/га) и относительные (в %) прибавки урожайности при применении удобрений.

2. Выявлена роль отдельных элементов питания в повышении урожаев зерновых культур. Дело в том, что в агрономической литературе (в том числе и в учебниках) распространено мнение о ведущей роли фосфора в системе удобрений для районов недостаточного увлажнения. Основано оно на том, что фосфор способствует росту корней, тем самым повышая устойчивость зерновых культур к дефициту влаги. Наши исследования показали, что первые 10–12 лет, когда в почве содержалось 10–12 мг/кг солей фосфора, извлекаемых 1%-ной вытяжкой углекислого аммония, прибавки урожаев зерновых культур от азотных и фосфорных удобрений были практически одинаковыми. Когда содержание доступных фосфатов достигло 25–30 мг/кг (в результате систематического применения фосфорных удобрений), размер прибавок урожайности стал главным образом зависеть от дозы азотных удобрений. Отсюда следует, что мнение о доминирующей роли фосфора в засушливых условиях нельзя признать однозначным.

3. При содержании в почве фосфора в размере 25–30 мг/кг, определяемого по методу Мачигина, отзывчивость зерновых культур на внесение фосфорных удобрений резко снижается (прибавки урожайности зерна от фосфора в большинстве случаев становятся статистически недостоверными). В подобной ситуации стало возможным в последних 4-х ротациях севооборота экономически и агрономически целесообразным вносить поддерживающую дозу фосфора в количестве P7/га севооборотной площади.

4. Внесение калийных удобрений в течение 20 лет (как отдельно, так и в различных сочетаниях с азотом и фосфором) не оказало влияния на урожайность зерновых культур и на агрохимические свойства чернозема южного. Причина — высокие и очень высокие запасы доступных соединений калия в почвах тяжелого гранулометрического состава, где доминируют глинистые минералы.

5. Длительные наблюдения в условиях стационарного опыта позволили установить влияние климатических условий в Поволжье (о чем говорилось выше) на продуктивность зерновых куль-

Таблица 1. Изменения продуктивности, прибавок урожайности культур от удобрений и их окупаемости при усилении засушливых условий

Показатель (среднее в ротациях)	Без удобрений, т з.е./га	Варианты					
		8 (N32P16K7)		11a (N54P17K7)		8	11a
		1	2	1	2	Окупаемость 1 кг д.в. удобрений, кг	
I–IV	2.67	3.24	0.57	3.30	0.63	10.4	8.1
V–VIII	1.82	2.54	0.72	2.63	0.81	13.1	10.4
Изменения к контролю, %	68	78	—	80	—	126	128

Примечание. В графе 1 — продуктивность, т з.е./га, 2 — прибавка продуктивности к контролю, т з.е./га.

тур. Для решения этой задачи рассчитали средние показатели продуктивности и окупаемости удобрений отдельно для 1–4-й ротаций и 5–8-й. Такой подход дал возможность выявить масштабы снижения продуктивности сельскохозяйственных культур с усилением засушливых проявлений. Расчеты представлены в табл. 1. Они показали, что среднегодовая продуктивность севооборота без удобрений при активизации засушливых процессов (снижение суммы осадков в теплый период, повышение дневных температур, увеличение количества засух) в конечном итоге снизилась на 32%. В варианте 8 средняя урожайность в 1–4-й ротациях составила 3.24 т з.е./га, а в 5–8-й она стала на 22% меньше. В варианте 11a продуктивность зерновых к концу 7-й ротации снизилась на 20%. Но при этом прибавка урожайности зерновых в варианте 8 повысилась на 26%, а в варианте 11a — на 29%. Окупаемость 1 кг д.в. удобрений возросла в варианте 8 в 1.26 раза, в варианте 11a — в 1.28 раза. Все вышеизложенное убеждает нас в том, что негативное влияние засушливых процессов сильнее проявлялось в неудобренных агроландшафтах. Удобрения в значительной мере снижали отрицательное действие засухи и их роль в формировании урожая резко повышалась.

Вынос и баланс питательных элементов в севообороте. Повышение урожайности сельскохозяйственных культур в удобренных вариантах привело к изменению размера выноса элементов питания основной и побочной продукцией. Суммарный вынос азота в контрольном варианте в 1–4-й ротациях изменялся незначительно и менялся в зависимости от ротации в пределах 259–276 кг/га. К 8-й ротации в связи со снижением урожайности он стабильно уменьшался, и его величина оказалась в итоге на 59% меньше, чем в начале опыта. Среднегодовой вынос азота в зоне южных черноземов в среднем за 48 лет наблюдений составил 38.3 кг/га. Изученные системы удобрения

повышали вынос данного элемента. Больше всего его отчуждалось из почвы с основной и побочной продукцией в варианте 11a (на 56% больше контроля).

Варьирование выноса фосфора в ротациях севооборота также имело место. Но оно было не столь резким, как вынос азота. Удобренные растения также отчуждали из почвы больше фосфора (на 29–30% больше, чем в контроле). В среднем за 48 лет вынос данного элемента в контрольном варианте составил 16.9 кг/га севооборотной площади, а в удобренных вариантах — 19.0–21.6 кг.

Калийные удобрения в стационарном опыте вносили в небольших количествах только в 1-, 2- и 4-й ротациях. Примененные дозы калия не оказали существенного влияния на вынос данного элемента. Он всецело определялся действием азотных и фосфорных удобрений и менялся в удобренных вариантах в 8-й ротации в среднем в год от 37.0 до 50.0 кг/га. В контроле вынос калия составил 34.1 кг/га.

Баланс питательных веществ наиболее полно отражает степень возмещения выноса питательных веществ за счет применения минеральных удобрений. При расчете баланса азота в расходную часть включали вынос элементов питания в среднем за 48 лет, а также среднегодовые потери на эрозию (в количестве 2 кг/га) и потери азота из удобрений на денитрификацию (15% от дозы). В приходной статье учитывали поступление азота с семенами, осадками и за счет деятельности свободноживущих микроорганизмов в количестве 13.5 кг/га в неудобренном контроле и 18.5 кг/га — в удобренных вариантах.

Расчеты показали, что интенсивность баланса азота, т.е. доля возмещения его выноса в контрольном варианте составила 33.4%. Применение N30–35/га севооборотной площади снизило дефицит азота до 12.7% (вариант 8). Полное возме-

шение выноса отмечено в варианте 11а, где вносили N54.

Дефицит фосфора в неудобренном контроле в среднем за 48 лет составил 16.6 кг/га с интенсивностью баланса 6.7%. Внесение в среднем P19.3 в год (вариант 3) возмещало потери фосфора на 91.4–100.4%. Азотные удобрения (вариант 2) не оказали положительного влияния на баланс фосфора.

Среднегодовой баланс калия в контрольном варианте показал нулевую интенсивность, поскольку имел место только расход этого элемента из почвы, а приход полностью отсутствовал. В вариантах с применением удобрений, где периодически вносили калий, интенсивность его баланса менялась от 11.0 (N32P16K7) до 18.3% (N54P17K7). Столь незначительное возмещение выноса обусловлено не только малыми дозами калийного удобрения. Большую роль сыграло и то обстоятельство, что под влиянием азотно-фосфорных удобрений повышался вынос из почвы основной и побочной продукцией не только азота и фосфора, но и калия [11].

Одним из важных критериев при оценке эффективности изученных систем удобрения является балансовый коэффициент использования питательных веществ. Анализ результатов длительного стационарного опыта показал, что в варианте 8 (N32P16K7), который обеспечил оптимальное соотношение прибавки урожайности и окупаемости 1 кг д.в. удобрений, коэффициент использования азота составил 43.9, фосфора — 34.3%. Внесение азотных удобрений выше оптимального уровня (N54P17K7) не повлияло на величину балансового коэффициента использования азота. Минимальная система удобрения (N15P13K8) показала самый высокий коэффициент использования азотных удобрений, но это привело к снижению продуктивности севооборота.

Аналогичным было изменение коэффициентов использования фосфора: повышение или снижение дозы фосфорных удобрений не сопровождалось увеличением коэффициентов, а продуктивность севооборота при этом не превышала оптимального уровня (N32P16K7).

Коэффициенты использования калия во всех вариантах получились выше 100%. Это указывает на то, что обеспечение сельскохозяйственных культур калием осуществлялось главным образом за счет его почвенных запасов.

Значимость определений баланса питательных веществ в агроландшафтах засушливого Поволжья сводится к следующему. Ранее проведенными исследованиями установлены оптимальные

уровни возврата в почву с удобрениями элементов питания: азота — 95–100% от его выноса, фосфора — 110–130% от выноса, калия — 18–20% от выноса (только для почв засушливой зоны). Результаты стационарного опыта позволили определить, что для достижения оптимального уровня возврата, получения экономически оправданных прибавок урожайности и стабилизации агрохимических свойств черноземных почв засушливого Поволжья на 1 га севооборотной площади необходимо вносить с удобрениями 30–35 кг азота и 18–20 кг фосфора.

Коэффициенты использования питательных веществ из удобрений, установленные в стационарном опыте, имеют большое значение при планировании потребности регионов, областей, районов и крупных агрохолдингов в удобрениях.

Урожайность зерновых культур в севообороте и ее зависимость от погодных условий. В научной литературе имеется много фактического материала о существенном влиянии погодных условий не только на величину урожайности, но и на отзывчивость сельскохозяйственных культур на применяемые удобрения. Общеизвестно положение о том, что в благоприятных погодных условиях растения лучше отзываются на применение удобрений [1, 4, 10]. Однако необходима детализация сведений в том, какие виды удобрений дают максимальный эффект в тех или иных погодных условиях. Для решения этого вопроса произвели группировку результатов исследования в стационарном опыте в зависимости от условий увлажнения вегетационного периода. Все показатели урожайности сельскохозяйственных культур распределили на 3 группы: влагообеспеченные, средnezасушливые и остроzасушливые годы. Разделение осуществляли по величине гидротермического коэффициента (ГТК), предложенного Г.Т. Селяниновым, который отражает отношение суммы осадков и суммы температур за вегетационный период. Такой подход позволил установить следующее.

В наших опытах озимую пшеницу возделывали после черного пара и непаровых предшественников. Это очень сильно влияло на обеспеченность посевов влагой и питательными веществами. Например, в зависимости от количества осадков, выпавших за период парования чистого пара, содержание нитратного азота в слое 0–40 см к посеву озимых находилось в пределах от 53 до 139 кг/га, а суммы нитратного и аммонийного азота — от 60 до 207 кг/га. Под непаровыми предшественниками нитрификационная деятельность была слабой. Запасов минерального азота к посеву озимой пшеницы в этом случае обнаруже-

но в 2.0–2.5 раза меньше, чем после чистого пара (соответственно 25–46 кг N–NO₃/га и 30–89 кг (N–NO₃ + N–NH₄)/га).

Анализ условий увлажнения и обеспеченности растений минеральным азотом показал следующее. В группе влагообеспеченных лет без удобрений средняя урожайность зерна озимой пшеницы после чистого пара составила 3.59 т/га с изменениями по годам от 2.40 до 5.29 т/га. После непаровых предшественников в контроле средний сбор зерна был равен всего 1.97 т/га с изменениями от 1.57 до 2.55 т/га. Ввиду хорошей обеспеченности чистых паров элементами питания эффективность азотно-фосфорных удобрений была невысокой – прирост урожайности в среднем за 17 лет составил 0.57 т/га. После непаровых предшественников, где ощущался недостаток минерального азота, в условиях оптимального увлажнения прибавка урожайности озимой пшеницы оказалась в 2.4 раза больше, чем после чистых паров.

В среднезасушливые годы запасы минерального азота перед посевом были такие же, как и в условиях оптимального увлажнения. Но дефицит влаги привел к тому, что после чистого пара урожайность озимой пшеницы в этой группе лет снижалась от 1.58 до 2.60 т/га, а после непаровых предшественников – от 0.98 до 1.98 т/га. Отзывчивость на азотно-фосфорные удобрения также оказалась невысокой.

При возделывании яровой пшеницы во влагообеспеченные годы отмечали относительно равномерное распределение атмосферных осадков в течение всего вегетационного периода. Это создавало оптимальные условия для нитрификационной деятельности, и в почве накапливалось нитратного азота к посеву яровой пшеницы порядка 65–68 кг/га. В таких условиях прирост урожайности от азотно-фосфорных удобрений в среднем за 20 лет составил 0.28 т/га.

В группе среднезасушливых лет урожайность яровой пшеницы в неудобренном контроле варьировала в широких пределах – от 0.76 до 2.31 т/га. При недостатке влаги сбор зерна данной культуры и эффективность удобрений повышались в те годы, когда минимум осадков приходился на период образования вторичных корней яровой пшеницы. В среднем за 20 лет наблюдений прибавка зерна от внесения N38P13K8 составила 0.33 т/га – практически столько же, как и в условиях оптимального увлажнения.

В острозасушливые годы продуктивность яровой пшеницы резко снижалась. В контроле собирали зерна от 0.6 до 0.96 т/га. Внесение минеральных удобрений повысило урожайность всего на

0.14 т/га. При этом следует отметить, что в данной группе лет все прибавки урожайности яровой пшеницы от удобрений были статистически недостоверными.

Улучшение пищевого режима почвы на удобренных делянках оказало положительное влияние на урожайность проса. При этом размер прибавок урожая зерна зависел и от погодных условий вегетационного периода. Самыми высокими они были во влагообеспеченные годы. В условиях оптимального увлажнения сильнее всего проявилось действие полного удобрения в дозе N38P13K8, где была получена самая высокая прибавка урожая – 30% к контролю.

В засушливые годы урожайность проса резко снижалась. Например, в контроле средний сбор зерна оказался в 2.1 раза меньше, чем в условиях благоприятного увлажнения. Азотно-фосфорные удобрения N38P13K8 в среднезасушливые годы позволили получить дополнительно к контролю зерно в количестве 0.52 т/га.

В острозасушливые годы статистически достоверные прибавки урожайности проса от удобрений были зафиксированы только в 2002 г. в отдельных вариантах опыта. В 1998 и 2010 гг. различия в вариантах были статистически незначительными ($F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$). В среднем в рассматриваемой группе лет прирост урожайности зерна от удобрений менялся в пределах 60–110 кг/га.

Гидротермические условия и минеральные удобрения оказали большое влияние на пищевой режим чернозема южного и при возделывании ярового ячменя. В годы с хорошей влагообеспеченностью содержание нитратного азота в период всходы–кушение в слое почвы 0–40 см в контрольном варианте было равно 38 кг/га, при внесении N40–80–54 кг/га. В группе среднезасушливых лет содержание N–NO₃ было повышенным и практически таким же, как и во влагообеспеченные годы. В острозасушливые годы обеспеченность ячменя минеральным азотом находилась на среднем уровне.

Заделка в почву фосфорных удобрений во влагообеспеченные годы практически удвоила фосфатный фонд чернозема южного по сравнению с контролем. В группах среднезасушливых и острозасушливых лет обеспеченность доступными фосфатами в вариантах с азотно-фосфорными удобрениями была повышенной и высокой (31–45 мг/кг почвы в 1%-ной углеаммонийной вытяжке).

Улучшение пищевого режима чернозема южного и изменения условий увлажнения вегетационного периода оказали большое влияние на про-

дуктивность ячменя и его отзывчивость на удобрения. Во влагообеспеченные годы максимальная урожайность ячменя отмечена при внесении N38P13K8. В среднезасушливые годы лучшие результаты обеспечил вариант N60, а в острозасушливые годы — N38P13K8. Следует также отметить, что в острозасушливые годы урожайность ячменя в неудобренном контроле снизилась в 3.7 раза, а при внесении минеральных удобрений — в 3.2 раза.

За 8 ротаций зернопарового 6-польного севооборота овес возделывали 19 лет. Во влагообеспеченные годы содержание нитратного азота в почве контрольного варианта было очень низким (23–29 кг/га), а при внесении N60 оно доходило до 64–70 кг/га. Что касается среднезасушливых и острозасушливых лет, то нитратного азота в слое 0–40 см почвы имелось больше, чем во влагообеспеченные годы как в контроле, так и в удобренных вариантах (соответственно 38 и 55 кг/га).

Содержание доступного фосфора в неудобренной почве под овсом было стабильно низким и не зависело от гидротермических условий вегетационного периода (61–76 кг P_2O_5 /га, или 12.8–16.0 мг P_2O_5 /кг (по Мачигину в 1%-ной углеаммонийной вытяжке)). При внесении одних азотных удобрений (которые для этой культуры обеспечили максимальные прибавки урожайности) количество доступных фосфатов возрастало до 83–109 кг/га. Такое повышение обусловлено не только растворяющим влиянием солей азотной кислоты на труднодоступные соединения фосфатов почвы, но и периодическим внесением фосфорных удобрений под предшествующие культуры севооборота.

В опытах с овсом максимальные прибавки урожайности зерна от удобрений были получены во влагообеспеченные годы. В среднем в этой группе лет она составила 1.06 т/га при внесении N60, и окупаемость 1 кг д.в. удобрений урожаем достигала 17.7 кг.

В среднезасушливые годы прирост урожайности зерна при применении N60 оказался в 2.7 раза меньше, чем в группе влагообеспеченных лет. В острозасушливые годы урожайность овса как в контроле, так и в удобренных вариантах резко снижалась. Следует отметить, что в данной группе лет имела место высокая вариабельность величины урожайности. Например, в контроле изменения сборов зерна были от 0.25 (1998 г.) до 2.12 т/га (2011 г.).

При рассмотрении полученных результатов установлено, что прибавка урожайности зерна овса при применении удобрений в острозасушливые годы была в 3.9 раза больше, чем для яровой пшеницы.

В условиях рыночной экономики важнейшим критерием эффективности является окупаемость 1 кг д.в. удобрений урожаем зерна. Наши расчеты показали, что величина данного показателя у всех изученных культур определялась не только их видом и дозами удобрений, но и гидротермическими условиями вегетационного периода.

Во влагообеспеченные годы в длительном стационарном опыте при внесении N40P40 зафиксирована максимальная окупаемость 1 кг д.в. удобрений урожаем ячменя — 27 кг. В этом же варианте в группе острозасушливых лет на 1 кг д.в. удобрений получено 10.1 кг зерна. При возделывании овса с изменением условий увлажнения окупаемость менялась в пределах от 7.2 до 3.6 кг зерна на 1 кг д.в. удобрений. Минимальными эти показатели были для яровой пшеницы — 3.5 кг зерна во влагообеспеченные годы и 1.8 кг в острозасушливые.

Материалы данного раздела могут быть использованы для построения различных математических моделей для определения зависимости величины урожайности зерновых культур от условий возделывания, а также для составления прогнозных оценок и т.п.

Влияние удобрений и погодных условий на качество зерна. Длительными наблюдениями установлено, что после одинаковых предшественников на всех изученных агрофонах (включая контроль) в засушливые годы белка в зерне озимой пшеницы накапливалось больше, чем во влагообеспеченные. Минеральные удобрения при всех условиях влагообеспеченности оказали положительное влияние на содержание белка. Анализ результатов также показал, что накопление белка в зерне озимой пшеницы на уровне 13.0–14.3% возможно, если расходовать 2.2–2.9 кг азота на формирование 100 кг зерна с соответствующим количеством побочной продукции.

Применение N54P17K7 как во влажные, так и засушливые годы в чистом пару позволило собрать с зерном озимой пшеницы белка 374 кг/га (на 26% больше контроля).

Независимо от уровня влагообеспеченности вегетационного периода сбор белка с урожаем озимой пшеницы в значительной степени зависел от предшественника. По этому показателю озимая пшеница после чистого пара превосходила урожай, полученный после занятого пара, где средний выход белка в удобренном варианте составил 255, а в контроле — 151 кг/га.

В вариантах с внесением минеральных удобрений содержание белка в зерне яровой пшеницы также было больше по сравнению с неудобрен-

ным контролем. Больше всего его было в зерне, полученном с использованием азотных и азотно-фосфорных удобрений: в среднем за 22 года наблюдений этот показатель составил 244, а в не-удобренном контроле — 182 кг/га. Что касается влияния погодных условий, то в условиях наших стационарных опытов подтвердилось общепризнанное положение о повышенном накоплении белка в засушливых условиях.

Применение минеральных удобрений положительно сказалось на характере накопления белка в зерне проса. Во всех удобренных вариантах стационарного опыта на протяжении 48 лет исследований его содержание в зерне превосходило неудобренный контроль. Например, если внесение N30 увеличивало содержание белка по сравнению с контролем в среднем в опыте на 18,8–20,0%, то при применении N60 превышение достигало 32,9%. Использование только лишь фосфорных удобрений в дозе P16 под просо не способствовало увеличению белковости зерна. В среднем за годы наблюдений в контрольном варианте сбор белка составил 108 кг/га, а в варианте с применением N54P17K7 — 181 кг/га или на 68% больше.

На белковость зерна ячменя сильное влияние оказали условия увлажнения вегетационного периода и азотные удобрения. Максимальное накопление белка в его зерне (15,4–15,7%) наблюдали в острозасушливые годы. В варианте N54P17K7 среднегодовой сбор белка ячменя составил 294, а в контроле — 158 кг/га. Дополнительный выход белка под влиянием удобрений был равен 136 кг/га, что на 86% больше контроля.

В наших опытах азотные удобрения и погодные условия также определяли содержание белка в зерне овса. В контроле во влажные годы в зерне овса накапливалось в среднем 9,6% белка (изменения по годам от 6,8 до 11,6%). Внесение N30 повысило содержание белка в зерне овса на 0,4, N60 — на 1,7%. Так как масса зерна овса на удобренных делянках заметно увеличивалась, то и сбор белка с единицы площади соответственно повышался (до 245 кг/га) по сравнению с контрольным вариантом, где его накапливалось 157 кг/га.

Таким образом, в стационарном опыте установлены факторы, влияющие на выход растительного белка с единицы площади: вид возделываемой культуры, удобрения и погодные условия. В удобренных агроландшафтах степного Поволжья по величине сбора белка культуры севооборота расположились в следующей убывающей последовательности: озимая пшеница после чистого пара (374 кг/га), ячмень (294 кг/га), озимая пшени-

ца после занятого пара (255 кг/га), овес (245 кг/га), яровая пшеница (244 кг/га), просо (181 кг/га). Под влиянием удобрений максимальное превышение выхода белка над неудобренным контролем отмечено для ячменя (86%), озимой пшеницы после занятого пара (69%), проса (68%), овса (56%). Для озимой пшеницы после чистого пара и яровой мягкой пшеницы увеличения составили соответственно 26 и 34%.

Трансформация агрохимических свойств почвы. В стационарном опыте ежегодно определяли содержание доступных для растений соединений азота и фосфора в почве под всеми культурами севооборота. По завершении каждой ротации проводили определение запасов углерода, валовых форм азота, фосфора и их отдельных фракций.

Установлено, что в контрольном варианте исходное содержание углерода в среднем для 3-х полей менялось от 2,59% в слое 0–20 см почвы до 2,40% в слое 20–40 см. За 48 лет наблюдений в неудобренной почве минерализовалось углерода 8,45 т/га. Интенсивность и направленность процесса при этом изменялись как в зависимости от слоев гумусового горизонта, так и во времени (рис. 3).

Систематическое внесение минеральных удобрений оказало влияние на содержание углерода. В варианте N15P13K8 потери углерода к концу 2-й ротации были больше по сравнению с контролем на 18,1% (на 0,47 т/га или 0,04 т/га/год). К концу 4-й ротации при максимальных за весь период наблюдения потерях в контроле в рассматриваемом варианте запасы углерода оставались более стабильными: убыль оказалась на 1,63 т/га или в среднем на 0,27 т/га/год меньше по сравнению с контролем. В сумме за 8 ротаций в этом варианте степень минерализации органического вещества почвы была близка к уровню контроля. Таким образом, минимальная доза удобрений не имела существенного значения для гумусообразования по сравнению с контролем.

В варианте с дозой удобрений N32P16K7 до конца 5-й ротации потери углерода происходили относительно равномерно и менялись от 0,12 до 0,20 т/га/год. Следовательно, такая доза минеральных удобрений обеспечила относительную стабилизацию содержания гумуса южного чернозема за счет накопления запасов легкодоступных азотистых соединений, повышения прибавки урожайности и поступления большей массы растительных остатков на фоне изменения гидротермического режима осенних месяцев в период 2007–2012 гг. [13].

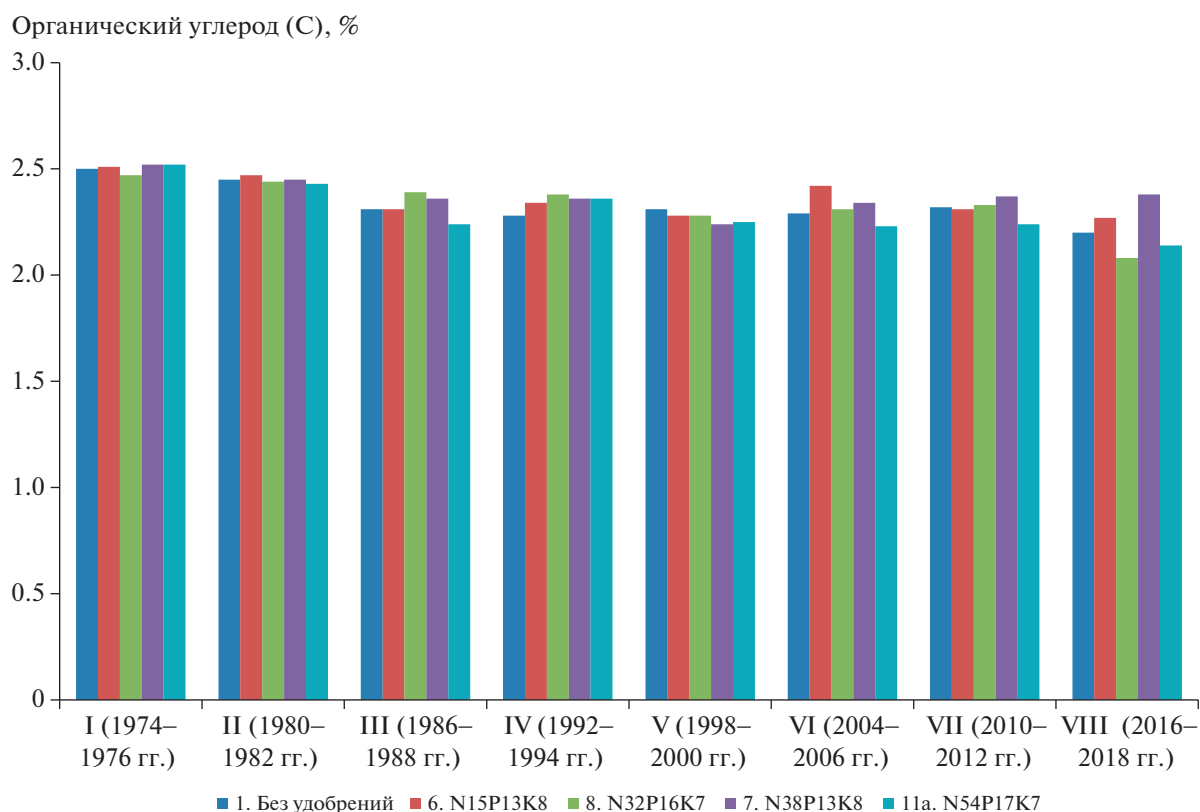


Рис. 3. Изменение содержания органического углерода в почве опыта (слой 0–40 см).

При среднегодовой дозе удобрений N38P13K8 до конца 4-й ротации ежегодные потери углерода менялись от 0.04 до 0.39 т/га. К концу 5-й ротации они достигли максимума (3.54 т/га за ротацию или 0.51 т/га/год). Это склонно связывать с влиянием повышенных доз азота. В 6–8-й ротациях в данном варианте отмечено увеличение содержания углерода, его потери по сравнению с исходными показателями сократились и были на 1.35 т/га меньше, чем в контроле (рис. 3).

При систематическом внесении на 1 га севооборотной площади N54P17K7 наблюдали максимальные в условиях наших экспериментов потери углерода. За 48 лет в этом варианте минерализовалось 13.2 т углерода органических соединений почвы/га. Это было на 4.77 т/га больше, чем в контроле. Причиной усиления процессов минерализации стало узкое соотношение C : N в почвенной среде, активизировавшее деятельность микрофлоры. В таких условиях процесс минерализации существенно преобладал над процессами гумификации, способствуя интенсивному разложению растительных остатков и гумуса.

Внесение навоза 40 т/га в 1-й ротации способствовало снижению потерь углерода в 2 раза по сравнению контролем уже к концу 2-й ротации.

Уменьшение его дозы во 2–5-й ротациях привело к повышенной минерализации углерода. Его ежегодные потери были больше по сравнению с контролем и составили соответственно в 3-й ротации 0.35, в 4-й – 0.20, а в 5-й – 0.31 т/га/год. В 6-й и последующих ротациях, когда навоз уже не вносили, наблюдали стабилизацию содержания углерода в почве. Из этого можно сделать вывод, что внесение очень низких доз навоза (20 т/га) за ротацию стимулировало микробиологическую активность и разложение органического вещества в почве.

Содержание общего азота в слое 0–40 см в начале опыта составляло в среднем 0.23%. Через 12 лет, к концу 2-й ротации, его запасы в неудобренном контроле в верхнем слое снизились на 1.12 т/га, что соответствовало ежегодным потерям в размере 0.01 т/га [14]. На удобренных участках потери азота в слое 0–20 см мало отличались от контроля (0.01–0.02 т/га/год). Самыми низкими они были при внесении навоза (0.01 т/га/год).

В вариантах применения N15P13K8 и N32P16K7, а также в контроле к концу 8-й ротации потери азота резко возросли (до 0.02 т/га/год). Внесение удобрений N38P13K8 привело к накоплению в почве остаточных азотистых веществ.

В результате снижение запасов азота в верхнем слое 0–20 см почвы в этом варианте замедлилось по сравнению с контролем. Максимальная доза (N54) снизила интенсивность потерь в последние 2 ротации до 0.008 т/га/год. Однако общие потери оказались больше по сравнению с вариантом N38 на 142 кг/га. Высокая аккумуляция азота в органическом удобрении и его длительное последствие стабилизировало потери азота на достаточно низком уровне (0.007 т/га/год), в результате чего в этом случае его было утрачено 0.864 т/га за 48 лет. Таким образом, за весь период наблюдения во всех разноудобренных вариантах наблюдали потери валового азота. Применение N38, а также навоза минимизировали потери азота во всех ротациях севооборота.

Важным генетическим показателем, характеризующим степень обогащенности гумуса азотом и характер минерализации органического вещества, является соотношение углерода к азоту. В начале опыта этот показатель во всех вариантах менялся в пределах 10.8–11.2, что свидетельствовало о благоприятных условиях минерализации органического вещества в почве. Затем произошло сужение соотношения C : N до 10.6–11.0 в слое 0–40 см почвы. Это было связано с более интенсивными потерями углерода по сравнению с азотом. По мере стабилизации запасов углерода к концу 8-й ротации и возрастания интенсивности потерь валового азота произошло расширение соотношения до 11.3–11.5. Исключения составили варианты применения N54P17K7 и навоза, где рассматриваемый показатель сохранился на исходном уровне (10.8–10.6).

Изучение фракционного состава азота показало, что при максимальных его потерях в вариантах без применения удобрений, с минимальной и максимальной дозами минерального азота происходило значительное нарушение структуры фонда азотистых соединений. Содержание фракции, в которой депонируется основная часть азота, снижалась в варианте N54P17K7 и в контроле на 145–146 мг/кг, в варианте N15P13K8 — на 57.4 мг/кг. В то же время отмечено сокращение ближайшего резерва минерального азота — легкогидролизуемой фракции — от 18.8 (N54P17K7) до 59.3 мг/кг (контроль). Оптимальным вариантом оказалось внесение N38P13K8. В этом варианте максимально сохранился уровень депонирования азота. Потери составили всего 11.5 мг/кг. Незначительными были потери легкогидролизуемой фракции (–2.00 мг/кг) при сохранении ее оптимальной доли в составе общего азота (8.3%).

Сопоставление данных баланса фосфора и количества доступных фосфатов в начале и конце

ротации позволили определить расход P_2O_5 удобрений (кг/га) на повышение в почве содержания подвижных фосфатов на 1 мг/кг. Установлено, что в 1-й ротации севооборота на повышение в почве количества доступного для растений фосфора на 1 мг/кг потребовалось 11.2 кг P_2O_5 удобрений/га. В 8-й ротации этот показатель составил 5.4–7.1 кг P_2O_5 удобрений/га. Это было обусловлено накоплением подвижных фосфатов в почве в результате систематического применения фосфорных удобрений. Следует также отметить, что показатель расхода P_2O_5 удобрений на накопление в почве 1 мг/кг доступных для растений фосфатов мало зависел как от доз, так и периодически внесения фосфора в почву [15].

Изменения в содержании доступных для растений фосфатов чернозема южного зависят не только от потребления фосфора культурами севооборота, но и характера поглощения растворимых фосфатов почвой. Наблюдения показали, что за период от закладки стационарного опыта до 3-й ротации систематическое применение минеральных удобрений в варианте 11а не влияло на содержание рыхлосвязанных фосфатов (1-ю фракцию определяли по методу Чанга–Джексона). Зато в удобренной почве незначительно снизилось количество алюмофосфатов (2-я фракция) и железофосфатов (3-я фракция). Сумма минеральных фосфатов в этой ротации под влиянием удобрений практически не изменилась.

Начиная с 4-й ротации в почве стационарного опыта отмечено снижение содержания всех фракций минеральных фосфатов, а их суммарное количество уменьшилось в варианте 1 на 35, в варианте 11а — на 19% по отношению к исходному содержанию. В последующий период (5–8-я ротации) суммарное содержание минеральных фосфатов находилось практически на одном уровне, но при этом менялся их фракционный состав. В первую очередь происходило увеличение фосфатов 2-й и 3-й фракций.

За период наблюдений установлено, что суммарное содержание активных минеральных фосфатов, определяемых по Чангу–Джексона, в вариантах изменилось незначительно, различия между вариантами не превышали 7.5%. Но что касается отдельных фракций, то здесь произошли некоторые изменения. Прежде всего, под влиянием минеральных удобрений, внесенных в средних (N32P16K7, N38P13K8) и повышенных (N54P17K7) дозах резко возросли (на 36–54% больше, чем в неудобренной почве) запасы фосфатов 2-й группы. Известно, что в эту фракцию

входят алюмофосфаты и кислые фосфаты кальция и магния, являющиеся ближайшим резервом фосфора для питания растений.

Что касается минимальной системы удобрений N15P13K8, то периодическое внесение в почву небольших доз фосфора в среднем за 8 ротаций не повлияло на содержание как общей суммы минеральных фосфатов, так и на их отдельных фракций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительное изучение действия минеральных удобрений в условиях стационарного опыта на южном черноземе Поволжья позволило установить, что продуктивность 6-польного севооборота без внесения удобрений снизилась за 8 ротаций на 43% (с 2.76 до 1.55 т з.е./га зерновых единиц в среднем за ротацию). В среднем за изученный период наиболее эффективным оказалось внесение на 1 га севооборотной площади дозы N32P16K7 (среднегодовая прибавка составила 0.64 т/га при окупаемости 1 кг действующих веществ удобрений 11.7 кг з.е.). Выявлено также, что урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность севооборота в целом зависели от погодных условий вегетационного периода, вида и дозы внесенных удобрений. Эти же факторы оказывали большое влияние на накопление белка в зерне.

За время проведения опыта изменялась отзывчивость культур севооборота на виды удобрений. Например, в 1-й и 2-й ротациях достаточно высокие показатели окупаемости урожаем имели как азотные, так и фосфорные удобрения. В последующих ротациях азот имел преимущество перед фосфором, и это позволило снизить дозу фосфора до P6.6 и на его фоне применять только азотные удобрения.

Удобрения увеличивали вынос из почвы питательных веществ, и этот процесс усиливался при улучшении условий увлажнения вегетационного периода. Максимальную продуктивность севооборота в зоне южных черноземов Поволжья обеспечил баланс питательных веществ с уровнем возврата азота 99.7, фосфора — 83.0, калия — 18.3%.

Потери углерода из неудобренной почвы за 8 ротаций в слое 0–40 см составили 0.17% или 8.45 т/га. Минеральные удобрения в дозах N32P16K7 и N38P13K8 снизили потери углерода на 20–22%.

Потери валового азота за изученный период в неудобренной почве (слой 0–40 см) составили 1.12 т/га. Минимальными (0.864 т/га) они были в

варианте N38P13K8. При этом отмечено, что подавляющая часть потерь азота (85% от его общего количества) приходилась на негидролизуюмую фракцию. Именно это могло служить причиной снижения эффективного плодородия.

Отмеченные в течение всего периода наблюдений изменения содержания валового фосфора в слое 0–40 см были незначительными (коэффициент вариации = 7.1%). Минеральные удобрения не оказали существенного влияния на содержание суммы минеральных фосфатов, определенных по методу Чанга–Джексона, но они увеличили на 36–54% количество фосфатов 2-й группы (кальцийфосфаты), которые являются ближайшим резервом фосфорного питания растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пронько В.В. Факторы, усиливающие действие удобрений в засушливых условиях // Вестн. РАСХН. 2004. № 6. С. 33–34.
2. Пронько В.В., Гришин П.Н. Состояние и пути регулирования плодородия черноземных и каштановых почв Саратовской области // Аграрн. научн. журн. 2005. № 3. С. 28–31.
3. Паников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрения и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
4. Левицкая Н.Г., Шаталова О.В. Современные тенденции изменения климата и их влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур в Нижнем Поволжье / Проблемы и пути преодоления засухи в Поволжье: научн. тр. РАСХН. Ч. 2. Саратов, 2000. С. 33–47.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (5-е изд., перераб. и доп.). М.: Агропромиздат, 1985. 416 с.
6. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
7. Чуб М.П., Потатурина Н.В., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Плодородие чернозема южного и продуктивность зернопарового севооборота при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2010. № 7. С. 3–13.
8. Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю., Сычев В.Г., Лошаков В.Г., Романенков В.А. Эффективность длительного применения удобрений в агроценозах степной зоны Саратовского Поволжья в условиях аридного климата / Бюл. Геосети ВНИИА. Вып. 15. М.: ВНИИА, 2014. 55 с.
9. Сычев В.Г., Лошаков В.Г., Романенков В.А., Беличенко М.В., Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Плодородие черноземов засушливого Поволжья и продуктивность полевых культур при длительном применении минеральных удобрений / Бюл. Геосети ВНИИА. Вып. 26. М.: ВНИИА, 2017. 48 с.
10. Федосеев А.П. Погода и эффективность удобрений. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 144 с.
11. Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Влияние минеральных удобрений и

- погодных условий на вынос элементов питания зерновыми культурами в степи Поволжья // Плодородие. 2020. № 2 (113). С. 17–20.
12. Пронько В.В., Корсак В.В., Дружкин А.Ф. Влияние погодных условий и агротехнических приемов на эффективность удобрений в степном Поволжье // Агрохимия. 2004. № 8. С. 20–25.
 13. Сайфуллина Л.Б., Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Изменение содержания общего углерода и азота в черноземе южном при длительном применении удобрений // Плодородие. 2016. № 4. С. 19–23.
 14. Чуб М.П., Потатурина Н.В., Пронько В.В., Сайфуллина Л.Б. Влияние применения удобрений на азотный режим южного чернозема засушливого Поволжья // Агрохимия. 2005. № 10. С. 5–12.
 15. Чуб М.П., Потатурина Н.В., Пронько В.В., Бажан Г.Н. Эффективность и баланс фосфора в зернопаровом севообороте на черноземе южном при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2004. № 11. С. 18–26.

Study of the Long-Term Effect of Mineral Fertilizers in a Stationary Experiment in the Steppe Volga Region

V. V. Pronko^{a, #}, D. Y. Zhuravlev^b, T. M. Yaroshenko^b, and N. F. Klimova^b

^a*Scientific and Production Association "The Power of Life"*
Bolshaya Sadovaya ul. 239, Saratov 410005, Russia

^b*Federal Agrarian Scientific Center of the South-East*
ul. Tulaykova 7, Saratov 410010, Russia

[#]*E-mail: victor-pronko@mail.ru*

The analysis of the results obtained over 48 years in a long stationary experiment with fertilizers, which is located in the Saratov region (Russia) on the southern heavy loam chernozem, is presented. The influence of various types and doses of mineral fertilizers on the productivity of 6-field crop rotation, yield and grain quality of cultivated crops (winter and spring wheat, millet, barley, oats) has been studied. The optimal doses of fertilizers for the arid steppe of the Volga region have been identified, providing maximum yield increases and the greatest payback of 1 kg of mineral fertilizers. The influence of the conditions of humidification of the growing season on the yield of grain crops, the accumulation of protein in the grain and the removal of nutrients from the soil is shown. The scales of carbon losses, gross nitrogen and phosphorus reserves have been established both in untreated soil and with the systematic application of various doses of mineral fertilizers over 48 years of observations.

Key words: southern chernozem, long-term stationary experience, mineral fertilizers, crop rotation productivity, fertilizer payback, steppe Volga region.

УДК 631.82:631.812:633.11“321”:631.445.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НОВЫХ ФОРМ НРК-УДОБРЕНИЙ С ЗАМЕДЛЕННЫМ И РЕГУЛИРУЕМЫМ ВЫСВОБОЖДЕНИЕМ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2023 г. В. М. Лапушкин¹, Ф. Г. Игралиев¹, А. А. Лапушкина¹, С. П. Торшин^{1,*},
А. М. Норов^{2,**}, Д. А. Пагалешкин², П. С. Федотов², В. В. Соколов²,
И. М. Кочетова², Е. А. Рыбин²

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

²Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова
162625 Череповец, Северное шоссе, 75, Россия

*E-mail: sptorshin@rambler.ru

**E-mail: ANorov@phosagro.ru

Поступила в редакцию 07.10.2022 г.

После доработки 29.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Показана эффективность новых форм гранулированных НРК-удобрений с покрытием гранул тонкой пленкой из смесей моно- и дикальцийфосфата на дерново-подзолистой почве при выращивании яровой пшеницы. В качестве защищающих от потерь питательных элементов пленок использовали моно- и дикальцийфосфат в разных соотношениях. Химический анализ урожая, расчет выноса и коэффициентов использования растениями питательных веществ свидетельствовали о том, что наибольшей эффективностью обладало НРК-удобрение с покрытием гранул монокальцийфосфатом.

Ключевые слова: удобрения с покрытием, монокальцийфосфат, дикальцийфосфат, дерново-подзолистая почва, потери азота, ингибиторы нитрификации.

DOI: 10.31857/S0002188123020096, **EDN:** MSXFNF

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важнейшей задачей земледелия является эффективное применение минеральных удобрений, особенно азотных. По многочисленным данным, ≈20% технического дешевого азота удобрений по разным причинам непроизводительно теряется [1, 2]. Среди причин подобных потерь — вымывание из корнеобитаемого слоя, иммобилизация в почве в органической форме и газообразные потери азота. Последний путь трансформации азота вносит наибольший вклад в снижение эффективности азотных удобрений. Существует несколько методов снижения потерь азота удобрений [1–10]: 1 — использование аммонийных и амидных форм легко- и труднорастворимых азотных удобрений. В отличие от нитратов катион NH_4^+ в почве фиксируется в составе ППК, теряет подвижность и не вымывается, при этом доступен растениям. Однако этот азот под-

вергается биологическому окислению с образованием нитратов и нитритов (нитрификация) и становится предметом и вымывания, и денитрификации. Кроме того, азот в виде аммиака может улетучиваться при использовании аммиачных, аммонийных и амидных удобрений, что происходит, как правило, при поверхностном их внесении на карбонатных и свежепроизвесткованных легких почвах с нейтральной и щелочной реакцией [8–10]; 2 — блокирование биологического окисления азота специальными веществами-ингибиторами нитрификации, которые вносят вместе с азотными удобрениями, например, широко применяемым во 2-й половине XX века препаратом “N-serve” [3]; 3 — применение медленно растворимых азотных удобрений, например, мочевино-формальдегидных удобрений [2, 4]. Однако производство таких удобрений оказалось экономически невыгодным; 4 — внесение гранулированных удобрений с покрытием гранул [2, 5].

В качестве покрытия использовали серу, органические полимеры и пр. В настоящее время разрабатывают и испытывают новые, экономически оправданные виды и модификации как пролонгированных форм азотных удобрений, в том числе с включением микроэлементов [6], так и удобрений с покрытием гранул [7].

В связи с этим цель работы — испытание эффективности новых гранулированных НРК-удобрений с покрытием гранул тонкой пленкой из смесей моно- и дикальцийфосфата на дерново-подзолистой почве при выращивании яровой пшеницы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Покрытия наносили с применением лабораторного тарельчатого гранулятора на гранулированные НРК-удобрения марки 15 : 15 : 15, произведенные в промышленных условиях. Выбор ортофосфатов кальция в качестве материалов для покрытия был обусловлен тем, что эти вещества доступны, относительно дешевы, легко могут быть получены на предприятиях по производству минеральных удобрений. Также очень важно, что и монокальцийфосфат (МКФ), и дикальцийфосфат (ДКФ) являются хорошо изученными и широко применяемыми удобрениями, поэтому никаких вопросов по биоразложению покрытий (как в случае с применением полимеров) в этом случае не возникает. Скорость высвобождения питательных веществ можно регулировать как за счет изменения толщины покрытия, так и за счет изменения его состава. Обе соли являются усвояемыми, но имеют разную растворимость, поэтому, изменяя соотношение между монокальцийфосфатом и дикальцийфосфатом, можно также влиять на поступление питательных веществ в почвенный раствор.

Для проведения вегетационных опытов были приготовлены образцы НРК-удобрений с 3-мя видами покрытий: 1 — с покрытием толщиной 0.1 мм, состоящим из смеси МКФ с небольшим (до 5% масс.) количеством ДКФ. Небольшая добавка ДКФ сделана с той целью, чтобы не допустить угнетения корневой системы растений за счет избыточной кислотности. В дальнейшем этот тип покрытия обозначен как МКФ; 2 — с покрытием толщиной 0.1 мм, состоящим из смеси МКФ и ДКФ, взятых в равных долях, в дальнейшем обозначено как МКФ + ДКФ; 3 — с покрытием, идентичным по составу предыдущему, но толщиной 0.05 мм, в дальнейшем обозначено как 1/2 (МКФ + ДКФ). Эффективность новых удобрений испытывали в вегетационном опыте.

Для решения поставленной задачи в РГАУ—МСХА им. К.А. Тимирязева был заложен вегетационный опыт (табл. 1). Все варианты были выровнены по количеству внесенных элементов питания (за исключением контрольного и фоновых). Опыт проводили в сосудах Митчерлиха, емкостью 5 кг сухой почвы. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой, тяжелосуглинистой почвы представлена в табл. 2. Повторность опыта четырехкратная. Опытная культура — яровая пшеница сорта Любава. Опыт заложен 17 мая. В основных фазах развития растений были отобраны образцы с целью оценки темпов накопления биомассы растениями в зависимости от формы внесенного удобрения.

Содержание элементов питания в урожае определяли после мокрого озоления по Кьельдалю: валовое содержание азота — микрометодом Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-93), фосфора — колориметрическим методом (ГОСТ 26657-97), калия — пламенно-фотометрическим методом (ГОСТ 30504-97).

При появлении признаков поражения растений мучнистой росой 22 июня была проведена обработка пропиконазолом. При появлении признаков поражения растений желтой пятнистостью 30 июня проведена обработка пенконазолом.

Опыт по изучению интенсивности нитрификации проводили в лабораторных условиях. В навеску почвы 450 г (естественной влажности) вносили азотные удобрения в дозе 200 мг N/кг сухой почвы, тщательно перемешивали, увлажняли (40 см³ дистиллированной воды на сосуд), помещали в пластиковые контейнеры без уплотнения и без крышки (аэробные условия). Контейнеры помещали в термостат и компостировали при температуре 25–30°C. Через 5 сут (далее через 10, 15, 20, 25 сут) почву из контейнеров высыпали, тщательно перемешивали и отбирали пробы почвы массой 30 г для анализа. Остаток почвы увлажняли (10 см³ дистиллированной воды), перемешивали и помещали обратно в контейнер и термостат для дальнейшего компостирования. В отобранных образцах почвы после высушивания определяли содержание нитратного азота спектрофотометрическим методом [11] при длине волны 220 нм на приборе СФ-26.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожай основной и побочной продукции яровой пшеницы был убран 21 августа, высушен до воздушно-сухого вещества, определена масса зерна и соломы, соотношение основной и побочной продукции, масса одного колоса, масса

Таблица 1. Схема вегетационного опыта

Вариант	Доза элементов питания, мг/кг	Условное обозначение варианта
0 – абсолютный контроль	0	0
NP – фон для определения коэффициента использования калия из удобрений	$N_{150}P_{290}$	NP
NK – фон для определения коэффициента использования фосфора из удобрений	$N_{150}K_{150}$	NK
PK – фон для определения коэффициента использования азота из удобрений	$P_{290}K_{150}$	PK
NPK (12: 23: 12) покрытие МКФ толщиной 100 мкм	$N_{150}P_{290}K_{150}$	NPK (МКФ 100 мкм)
NPK (12: 21: 12) покрытие МКФ + ДКФ толщиной 100 мкм	$N_{150}P_{290}K_{150}$	NPK (МКФ + ДКФ 100 мкм)
NPK (14: 18: 14) покрытие МКФ + ДКФ толщиной 50 мкм	$N_{150}P_{290}K_{150}$	NPK (МКФ + ДКФ 50 мкм)
NPK (15: 15: 15) без покрытия	$N_{150}P_{290}K_{150}$	NPK (без покрытия)

Таблица 2. Агрохимическая характеристика почвы опыта

Гумус по Тюрину, %	рН _{KCl}	<i>H</i> _г	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>V</i> , %	Щелочно гидролизуемый N по Корнфилду, мг/кг	<i>P</i> ₂ O ₅	<i>K</i> ₂ O
		ммоль/100 г					по Кирсанову, мг/кг	
1.3	5.9	1.1	16.6	17.7	93.8	<100	134	146

Таблица 3. Структура урожая яровой пшеницы

Вариант	Масса зерна	Масса побочной продукции	Сотношение зерно : общая биомасса	Масса 1000 зерен	Масса 1-го колоса	Количество зерен в колосе, шт.
	г/сосуд			г		
0	5.2	9.2	1.8	28.9	0.4	10.6
NP	15.4	19.5	1.3	37.7	1.1	23.6
NK	15.0	21.0	1.4	34.5	1.0	23.3
PK	5.5	10.8	2.0	29.5	0.42	11.4
NPK (МКФ 100 мкм)	17.3	25.0	1.5	35.9	1.11	25.5
NPK (МКФ + ДКФ 100 мкм)	15.1	23.1	1.5	36.6	1.0	21.5
NPK (МКФ + ДКФ 50 мкм)	14.9	23.3	1.6	35.9	1.0	23.4
NPK (без покрытия)	15.4	22.7	1.5	36.3	1.0	23.9
НСП ₀₅	0.8	1.8	—	5.2	0.2	4.1

1000 зерен и озерненность колоса. Результаты опыта обработаны методом дисперсионного анализа и приведены в табл. 3.

Результаты показали, что все исследованные удобрения оказали существенное действие на урожай яровой пшеницы по сравнению с контрольным вариантом и фосфорно-калийным фоном. При этом урожай зерна в варианте с внесением NPK-удобрения с покрытием гранул монокальцийфосфатом был достоверно больше по

сравнению с другими исследованными удобрениями — 17.3 г против 14.9–15.4 г/сосуд.

Аналогичные результаты получены и для урожая побочной продукции. Во всех вариантах опыта, с внесением исследованных форм минеральных удобрений урожай соломы был существенно больше по сравнению с контрольным и фоновыми вариантами. Наиболее высокий урожай получен также при внесении NPK-удобрения с по-

Таблица 4. Содержание основных элементов питания в урожае яровой пшеницы, %

Вариант	Зерно			Солома		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0	1.97	1.00	0.46	0.23	0.21	1.72
NP	2.95	1.26	0.55	0.82	0.28	1.44
NK	3.17	1.01	0.49	0.71	0.16	2.52
PK	1.93	1.08	0.48	0.33	0.38	2.51
NPК (МКФ 100 мкм)	2.73	1.20	0.47	0.69	0.27	2.41
NPК (МКФ + ДКФ 100 мкм)	2.92	1.15	0.53	0.67	0.27	2.47
NPК (МКФ + ДКФ 50 мкм)	2.92	1.12	0.56	0.72	0.29	2.50
NPК (без покрытия)	2.80	1.02	0.56	0.64	0.26	2.39

Таблица 5. Вынос основных элементов питания урожаем яровой пшеницы, мг/сосуд

Вариант	Вынос зерном			Вынос соломой			Общий вынос		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0	102	52	24	22	19	158	124	71	182
NP	454	194	84	160	55	281	614	249	365
NK	475	152	74	148	33	529	623	185	603
PK	107	59	27	36	41	271	143	101	297
NPК (МКФ 100 мкм)	471	206	81	172	68	602	643	274	684
NPК (МКФ + ДКФ 100 мкм)	442	174	79	155	62	570	597	236	650
NPК (МКФ + ДКФ 50 мкм)	436	167	84	168	67	582	604	235	666
NPК (без покрытия)	432	157	87	146	60	542	578	217	629

крытием гранул монокальцийфосфатом: 24.0 г против 22.7–23.3 г/сосуд.

Оценка структуры урожая позволила заключить, что применение NPK-удобрения с покрытием гранул монокальцийфосфатом способствовало увеличению массы колоса и его озерненности, а также повышению хозяйственного коэффициента, т.е. доли зерна в общей биомассе растений. Например, в варианте с внесением этого удобрения на единицу урожая зерна было сформировано 1.45 ед. побочной продукции, в то время как в вариантах с внесением других форм NPK-удобрений это соотношение варьировало от 1.47 до 1.56. Количество зерен в колосе увеличивалось до 25.5 шт. по сравнению с 21.5–23.9 шт. в вариантах с остальными удобрениями. Масса одного колоса составила 1.11 г при 0.96–1.07 г в вариантах с внесением других форм NPK-удобрений.

После учета структуры урожая был проведен химический анализ растительных образцов. По результатам химического анализа урожая (табл. 4) был рассчитан вынос элементов питания основной и побочной продукцией (табл. 5) и

определены коэффициенты использования питательных веществ из удобрений (рис. 1).

Из результатов химического анализа следует, что вынос элементов питания тесно коррелировал с величиной полученного урожая, и наибольшее потребление питательных веществ отмечено в варианте с внесением NPK-удобрения с покрытием гранул монокальцийфосфатом, что свидетельствовало о большей доступности этого удобрения. Это подтверждено более высокими коэффициентами использования элементов питания удобрений в этом варианте опыта. Коэффициенты использования азота из удобрений с различным покрытием гранул были больше по сравнению со стандартным NPK-удобрением и варьировали в диапазоне 61–67% против 58%. В варианте с внесением NPK-удобрения с покрытием гранул монокальцийфосфатом коэффициент использования азота был наиболее высоким и достиг 67%, что было на 16% (абсолютных) больше, относительно NPK-удобрения без покрытия.

В целом в опыте коэффициенты использования фосфора были довольно низкими, что объясняется, с одной стороны, повышенным содержа-

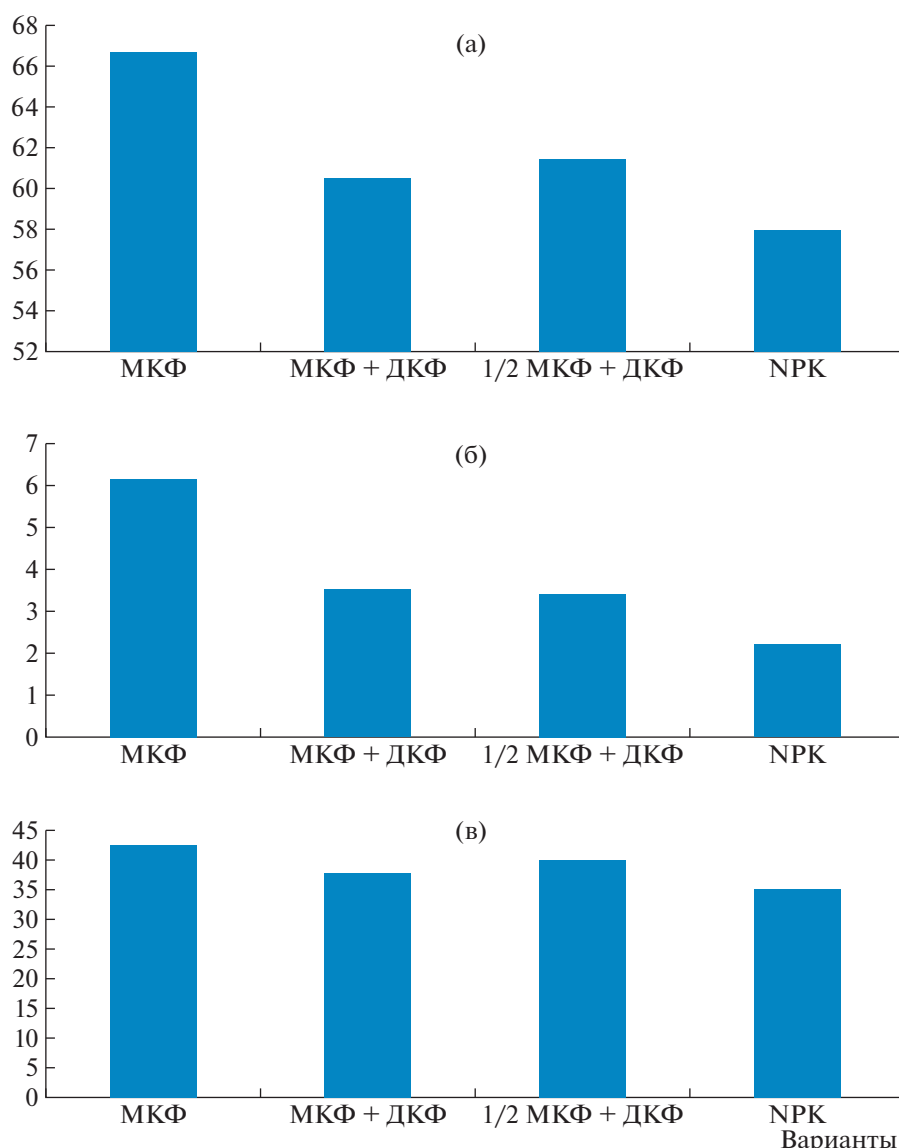


Рис. 1. Коэффициенты использования минеральных элементов из удобрений: (а) — азота, (б) — фосфора, (в) — калия, %.

нием подвижных фосфатов в почве, а с другой, высокой дозой внесенного фосфора, обусловленной соотношением элементов питания в составе комплексных удобрений. Тем не менее, интерес представляет сравнение коэффициентов использования фосфора из разных форм NPK-удобрений, которое показало, что наибольшей доступностью для растений обладали фосфаты удобрения, гранулы которого были покрыты МКФ. При этом все виды покрытий способствовали заметному увеличению коэффициента использования фосфора относительно обычного NPK-удобрения. Коэффициенты использования калия из удобрений варьировали в меньшем диапазоне по сравнению с азотом и фосфором, и составили 38–

42% при внесении удобрений с покрытием гранул и 35% при внесении NPK-удобрения без покрытия. Наибольшая доступность калия растениям также отмечена из состава удобрения с покрытием гранул монокальцийфосфатом.

Результаты лабораторного опыта по изучению нитрификации (табл. 6) показали, что покрытие гранул различными компонентами, особенно монокальцийфосфатом и ингибитором нитрификации существенно снижали интенсивность окисления аммонийного азота особенно к концу опыта. К 25-м сут наибольшая концентрация $N-NO_3$ (170 мг/кг) была обнаружена в вариантах с NPK, минимальная (114 мг/кг) — в абсолютном контроле (в отсутствие азота удобрений).

Таблица 6. Содержание нитратного азота в компостируемой почве, мг/кг

Вариант	Экспозиция, сут				
	5	10	15	20	25
0	73 ± 4.3	90 ± 2.7	94 ± 3.7	99 ± 3.9	114 ± 4
НРК (без покрытия)	74 ± 4.1	90 ± 3.2	100 ± 2	122 ± 1	170 ± 7
НРК (МКФ 100 мкм)	74 ± 4.0	90 ± 1.2	98 ± 3.8	123 ± 2	151 ± 10
НРК (МКФ + ДКФ 100 мкм)	81 ± 1.4	85 ± 4.6	101 ± 2	126 ± 8	165 ± 9
НРК (МКФ + ДКФ 50 мкм)	79 ± 3.0	89 ± 3.8	101 ± 2	126 ± 3	179 ± 5
НРК (без покрытия) + + ингибитор нитрификации*	84 ± 1.7	77 ± 2.8	86 ± 1.2	104 ± 1	129 ± 3

*В качестве ингибитора нитрификации использовали 17.4%-ный раствор 3,4-диметилпиразол фосфата (DMPP).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование действия НРК-удобрений с различным покрытием гранул показало, что к моменту наступления фазы кущения наиболее заметное действие на формирование биомассы яровой пшеницы из исследованных удобрений оказали формы удобрений с покрытием гранул из монокальцийфосфата. Растения, выращенные в вариантах с внесением этого удобрения, превосходили другие растения по темпам роста и накопления сырой и сухой массы.

Во время выхода в трубку наилучший результат также показали формы удобрений с покрытием гранул из монокальцийфосфата. В фазе колошения—цветения ситуация несколько изменилась и на первый план по морфо-биометрическим показателям вышли растения, выращенные в вариантах с внесением удобрений с различными по толщине покрытиями из смеси моно- и дикальцийфосфата.

Учет структуры урожая подтвердил предварительные выводы о большей эффективности удобрения с покрытием гранул монокальцийфосфатом (МКФ). Урожай зерна яровой пшеницы в варианте с внесением этого удобрения был существенно больше по сравнению со всеми остальными формами удобрений. Внесение НРК-удобрения с покрытием МКФ способствовало увеличению массы и озерненности колоса, а также сужало соотношение между основной и побочной продукцией.

Результаты химического анализа урожая, расчет выноса и коэффициентов использования питательных веществ растениями подтвердили вывод о том, что наибольшей эффективностью обладало НРК-удобрение с покрытием гранул монокальцийфосфатом. Коэффициент использования азота из состава этого удобрения был больше стандартного удобрения на 16%, и на 10% больше по сравнению с НРК-удобрениями с по-

крытием гранул смесью моно- и дикальцийфосфата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов П.М.* Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с ^{15}N). М.: ТСХА, 1977. 72 с.
2. *Кореньков Д.А.* Агрохимия азотных удобрений. М.: Наука, 1976. 209 с.
3. *Муравин Э.А.* Ингибиторы нитрификации. М.: Агропромиздат, 1989. 245 с.
4. Агрохимия / Под ред. П.М. Смирнова, А.В. Петербургского. 3-е изд. М.: Колос, 1975. 511 с.
5. *Tisdale S.L., Nelson W.L.* Soil fertility and fertilizers. Macmillan Publishing Co., Inc., 1975. p. 163–171.
6. *Шаповал О.А., Боровик Р.А.* Применение новых пролонгированных форм мочевиноформальдегидных удобрений с включением микроэлементов на яровой пшенице // Агрохим. вестн. 2021. № 6. С. 34–37.
7. *Жевова С.В.* Реакция сортов картофеля на введение в систему минерального питания стабилизированного карбамида УТЕС46 // Плодородие. 2021. № 3. С. 76–80.
8. *Макаров Б.Н., Игнатов В.П.* Потери азота из почвы в газообразной форме // Почвоведение. 1964. № 4. С. 85–92.
9. *Гетманец А.Я.* О потерях азота минеральных удобрений из почвы в газообразной форме // Почвоведение. 1972. № 3. С. 139–143.
10. *Fenn L.B., Kissel D.E.* The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soils // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1976. V. 40. № 3. P. 364–398.
11. *Борисова Н.И.* Спектрофотометрический метод определения нитратов в почве // Агрохимия. 1968. № 8. С. 148–153.

**Efficiency of New Forms of NPK-Fertilizers
with Delayed and Controlled Release
of Nutrients when Growing Spring Wheat on Sod-Podzolic Soil**

**V. M. Lapushkin^a, F. G. Igliev^a, A. A. Lapushkina^a, S. P. Torshin^{a, #},
A. M. Norov^{b, ##}, D. A. Pagaleshkin^b, P. S. Fedotov^b, V. V. Sokolov^b,
I. M. Kochetova^b, and E. A. Rybin^b**

^a*Russian State Agrarian University—Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia*

^b*Scientific Research Institute for Fertilizers and Insectofungicides named after Professor Ya.V. Samoilov
Severnoye shosse 75, Cherepovets 162625, Russia*

[#]*E-mail: sptorshin@rambler.ru*

^{##}*E-mail: ANorov@phosagro.ru*

The effectiveness of new forms of granular NPK fertilizers with a coating of granules with a thin film of mixtures of mono- and dicalcium phosphate on sod-podzolic soil in the cultivation of spring wheat is shown. Mono- and dicalcium phosphate in different ratios were used as films protecting against loss of nutrients. The chemical analysis of the crop, the calculation of the removal and the coefficients of the use of nutrients by plants indicated that the NPK fertilizer with a coating of granules with monocalcium phosphate had the greatest efficiency.

Key words: fertilizers with coating, monocalcium phosphate, dicalcium phosphate, sod-podzolic soil, nitrogen losses, nitrification inhibitors.

УДК 631.86:635

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАВОЗА, БИОКОМПОСТОВ И СИДЕРАТОВ ПОД ОВОЩНЫЕ КУЛЬТУРЫ

© 2023 г. В. А. Борисов¹, О. Н. Успенская^{1,*}, А. А. Коломиец¹, И. Ю. Васючков¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства –
филиал федерального научного центра овощеводства
140153 Московская обл., Раменский район д. Веря, стр. 500, Россия

*E-mail: vniioh@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.10.2022 г.

После доработки 10.11.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Чрезмерное увлечение в овощеводстве минеральными (особенно азотными) удобрениями привело к значительному загрязнению почв и продукции нитратами, тяжелыми металлами, другими токсикантами. В научной литературе накоплен значительный материал по применению различного рода удобрений, особенно минеральных. Четко установленная в мировом масштабе тенденция к развитию органического земледелия требует более углубленного изучения влияния органических удобрений на урожайность овощей и корректировки разработанных ранее систем удобрения овощных культур. Исследования были проведены отделом земледелия и агрохимии ВНИИО – филиалом ФНЦО и тремя опытными станциями института на дерново-подзолистых, аллювиальных луговых почвах, типичных, обыкновенных и выщелоченных черноземах в Нечерноземной зоне, Северном Кавказе и Западной Сибири. Выяснено, что эффективность применения навоза КРС в среднем для 6-ти культур на 6-ти типах почв составила 33% прибавки урожайности. Наиболее высокие прибавки получены на культурах огурца (62%) и свеклы столовой (54%); капуста и морковь повышали урожайность на 27 и 22% соответственно, томат и лук – в среднем на 17%. Эффективность навоза была обратно пропорциональна величине содержания гумуса в почве. Исследования эффективности применения биокomпостов на основе куриного помета выявили, что биокomпост увеличивал урожайность 12-ти овощных культур на аллювиальной луговой почве в среднем на 20, минеральные удобрения – на 28%, совместное внесение этих удобрений позволило поднять урожайность на 35%. Зеленые удобрения (сидераты) в условиях ЦНЗ позволили увеличить урожайность овощей на 8–15%, наиболее эффективными оказались горох, горохоовсяная смесь и фацелия, желтый люпин и подсолнечник были малоэффективными. В орошаемых условиях Ростовской обл. комплексное применение минеральных удобрений, навоза и сидератов увеличивало урожайность овощных культур с 23.6 до 49.6 т/га, т.е. более чем в 2 раза.

Ключевые слова: овощные культуры, навоз, биокomпост, сидераты, минеральные удобрения, почвы, регионы, урожайность, эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188123020059, **EDN:** MRZPGY

ВВЕДЕНИЕ

Овощеводство – одна из наиболее интенсивных отраслей растениеводства. Характерной ее особенностью всегда было размещение овощей на наиболее плодородных орошаемых почвах и применение высоких доз органических удобрений, особенно навоза. В настоящее время в этой отрасли применяют большое число различных видов минеральных удобрений, биокomпостов, регуляторов роста растений, которые не всегда способствуют получению высококачественной овощной продукции. Часто их применение без учета свойств почвы и биологических особенностей культуры приводят к снижению качества

овощей и наносят вред окружающей среде. Чрезмерное увлечение минеральными (особенно азотными) удобрениями, а также пестицидами привело к значительному загрязнению почв и продукции нитратами, тяжелыми металлами, другими токсикантами. В научной литературе накоплен значительный материал о применении различного рода удобрений, особенно минеральных. Четко установленная в мировом масштабе тенденция к развитию органического земледелия требует более углубленного изучения влияния именно органических удобрений на урожайность овощей и корректировки разработанных ранее систем удобрения овощных культур.

Таблица 1. Эффективность применения навоза КРС на различных почвах многолетних стационарных опытов ВНИИ овощеводства и опытных станций

Почва	Гумус, %	Прибавки урожайности от навоза КРС, %						
		капуста поздняя	морковь	свекла столовая	огурец	томат	лук репчатый	среднее
Дерново-подзолистая слабоокультуренная (Ивановская обл.)	1.80	42	56	63	260	—	—	105
Дерново-подзолистая окультуренная (Московская обл.)	2.30	18	27	64	20	12	29	28
Аллювиальная луговая (Московская обл.)	3.65	16	9	46	21	—	12	21
Типичный чернозем (Воронежская обл.)	6.60	20	11	45	16	11	4	18
Выщелоченный чернозем (Алтайский край)	4.39	33	14	—	28	26	—	25
Лугово-черноземная (Краснодарский край)	3.52	31	20	—	21	19	23	23
Среднее	3.71	27	23	55	61	17	17	—

Многолетние исследования отдела земледелия и агрохимии ВНИИО, а также 3-х опытных станций института, расположенных в различных почвенно-климатических условиях Московской, Воронежской, Ростовской обл. и Алтайского края позволили сделать некоторые обобщения об эффективном и экологичном применении удобрений, не только минеральных, но и органических, а также их сочетаний [1–5]. Цель работы – сравнение эффективности применения навоза, биокомпоста и сидератов в овощеводстве в разных почвенно-климатических условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено отделом земледелия и агрохимии ВНИИО и тремя его опытными станциями в многолетних стационарных и краткосрочных опытах на дерново-подзолистых, аллювиальных луговых почвах Нечерноземной зоны (Московская обл.), типичных черноземах Воронежской обл., обыкновенных черноземах Ростовской обл. и выщелоченных черноземах Алтайского края, т.е. в основных почвенно-климатических зонах страны, где выращивают основную массу овощей. Опыты закладывали по единой методике в соответствии с методическими разработками ВНИИО [6] и ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова [7]. Агротехника возделывания общепринятая.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщение данных позволило выяснить, что эффективность навоза КРС, внесенного под различные овощные культуры, сильно зависела от содержания гумуса в почве и биологических особенностей культуры. На слабоокультуренных дерново-подзолистых почвах, с низким содержанием гумуса (1.8%) выявлена наивысшая эффективность навоза, особенно внесенного под огурец (прибавка в 2.6 раза) [8]. Другие культуры также хорошо отзывались на внесение навоза. На дерново-подзолистых окультуренных почвах (содержание гумуса 2.3%) отзывчивость овощных культур при использовании навоза КРС значительно снижалась [3]. На аллювиальных луговых почвах поймы р. Москвы, обладающих более высоким содержанием гумуса (3.65%) и мощным перегнойным горизонтом (до 60–80 см), эффективность применения навоза снижалась еще больше. В целом эффективность применения навоза КРС в среднем (для 6-ти культур на 6-ти типах почв) составила 33% прибавки урожайности (табл. 1).

В условиях дефицита подготовленного навоза, возрастания затрат на его транспортировку и внесение, а также высокой засоренности овощных полей после внесения свежего навоза, более перспективно использование биокомпостов, а также биогумуса. Исследования в этом направлении в 2005–2021 гг. с различными овощными культурами на аллювиальных луговых почвах поймы р. Москвы выявили довольно высокую эффек-

Таблица 2. Эффективность применения биокомпостов под овощные культуры на аллювиальных луговых почвах р. Москвы

Культура	Урожайность овощей								<i>HCP</i> ₀₅
	без удобрений		NPK _{расч}		биокомпост		NPK _{расч} + + биокомпост		
	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	
Капуста белокочанная	35.8	100	50.6	141	52.1	146	61.6	171	4.2
Капуста цветная	21.7	100	27.1	125	25.8	118	28.3	130	2.3
Свекла столовая	32.5	100	41.3	127	39.5	122	53.4	164	4.6
Морковь	43.9	100	56.9	130	54.3	124	55.4	124	3.1
Огурец	12.4	100	15.2	127	14.8	119	14.5	117	1.8
Патиссон	25.4	100	32.1	127	27.5	109	33.9	135	2.9
Кабачок	24.6	100	34.0	158	30.0	122	34.9	142	3.6
Брюква	43.6	100	48.6	112	50.9	117	53.1	122	3.1
Редька	25.9	100	37.4	143	30.7	119	36.4	141	2.4
Репка	20.0	100	24.8	124	24.4	122	24.7	123	2.2
Дайкон	42.9	100	53.1	124	45.5	106	48.9	114	3.3
Среднее	29.9	100	38.3	128	35.9	120	40.5	135	—

Таблица 3. Влияние различных сидератов на урожайность культур овоще-сидерального севооборота на аллювиальной луговой почве поймы р. Москвы

Сидеральная культура	Запахано зеленой массы, т/га	Урожайность культур севооборота, т/га				Среднегодовая урожайность	
		капуста поздняя	капуста средняя	морковь	свекла столовая	т/га	%
Без сидерата	—	67.5	58.5	57.1	38.7	55.5	100
Горох	36.2	86.9	69.0	59.0	41.0	64.0	115
Горох с овсом	44.9	84.8	66.4	60.1	41.2	63.1	114
Люпин желтый	14.8	78.4	63.4	58.0	39.1	59.7	108
Фацелия	50.6	77.6	65.0	59.3	39.5	60.4	109
Подсолнечник	56.4	69.0	56.6	63.5	39.1	57.1	103
В среднем, с сидератами, т/га	—	79.3	64.1	60.0	40.0	60.9	110
Прибавка урожайности, %	—	17.5	9.6	5.1	3.4	—	—
<i>HCP</i> ₀₅	—	3.5	3.1	2.8	2.5	—	—

тивность применения биокомпостов, сравнимую с эффективностью внесения традиционного органического удобрения — навоза КРС (табл. 2).

Выяснено, что в среднем для 11 культур эффективность применения биокомпоста на основе куриного помета на аллювиальной луговой почве составила 20, минеральных удобрений — 28, а их совместное применение повышало продуктивность культур на 35%. Наиболее отзывчивыми были капуста, морковь, свекла, кабачок, репа, огурец и редька.

На аллювиальных луговых почвах в среднем для 4-х культур (капусты белокочанной, свеклы столовой, моркови, огурца) наиболее эффективным оказался биокомпост — 28% прибавки урожайности (табл. 2), навоз обеспечил 23% прибавки для тех же культур (табл. 1). Эффективность применения сидератов для тех же культур (кроме огурца) составила 9% (табл. 3).

Одним из важных резервов органических удобрений в овощеводстве являются зеленые (сидеральные) удобрения, которые не только обогащают почву свежей растительной биомассой, но

Таблица 4. Комплексное действие минеральных удобрений, навоза, сидератов и орошения на урожайность культур овощного севооборота на обыкновенных черноземах Ростовской обл.

Условия орошения	Удобрения	Урожайность овощного севооборота, т/га						Средняя урожайность	
		томат	капуста	огурец	морковь	кабачок	лук	т/га	%
Без орошения	Без удобрений	22.9	26.7	9.5	33.1	31.2	18.2	23.6	100
	$NPK_{расч}$	29.7	29.8	12.1	40.6	34.8	19.9	27.8	118
	$NPK_{расч}$ + навоз	32.8	31.5	12.5	44.1	41.0	18.9	30.1	128
	$NPK_{расч}$ + навоз + сидераты*	32.8	36.5	12.2	43.9	46.5	22.3	32.4	137
Орошение 80-80-80% НВ	Без удобрений	32.2	33.2	11.4	50.4	49.3	30.1	34.4	146
	$NPK_{расч}$	45.2	57.4	16.9	55.9	58.7	30.2	44.1	187
	$NPK_{расч}$ + навоз	50.3	59.4	19.4	57.0	61.5	29.6	46.2	196
	$NPK_{расч}$ + навоз + сидераты*	50.3	63.4	20.0	59.9	73.6	30.2	49.6	200
HCP_{05}		3.6	5.1	2.6	4.3	6.4	2.2	—	—

*Сидерат (вика с овсом) был выращен и запахан после уборки раннего томата.

и способствуют снижению засоренности полей, оказывают благоприятное действие на биоту почвы, улучшают ее агрохимические и агрофизические свойства. Исследования ВНИИО и Западно-Сибирской ООС [2–4] выявили положительное влияние на урожайность овощного севооборота таких сидеральных культур как горох, горохоовсяная смесь, фацелия и низкую эффективность подсолнечника. Желтый кормовой люпин также несколько увеличивал урожайность культур севооборота, но при этом значительно засорял почву. В условиях выщелоченных черноземов Западной Сибири лучшими сидеральными культурами были викоовсяная и горохо-овсяная смеси [2].

В исследованиях в Ростовской обл. на обыкновенных черноземах Бирючукской ОСОС [5] в неорошаемых условиях сидеральные удобрения (горохоовсяная смесь) повысили урожайность овощных культур на 9, а при орошении — на 14% (табл. 4). Комплексное использование минеральных удобрений (ежегодно) с навозом, сидератами (1–2 раза в ротации севооборота) и орошением позволило в 2.1 раза повысить продуктивность 6-польного севооборота. Орошение усиливало эффективность минеральных удобрений.

ВЫВОДЫ

1. Применение органических удобрений в виде навоза КРС под 11 культур на 6-ти типах почв позволило увеличить урожайность овощных культур в среднем на 33%, их эффективность была обратно пропорциональна содержанию гумуса в почве. Наибольшая прибавка урожайности от-

мечена на огурце (62%), свекле столовой (54%) и капусте (27%), минимальная — на томате и луке репчатом (17%).

2. Использование биокомпоста на основе куриного помета вместо навоза КРС увеличивало урожайность 6-ти культур на аллювиальной луговой почве в среднем на 20%, причем наиболее отзывчивыми на его применение были капуста белокочанная (прибавка 46%), морковь (24%), свекла столовая, кабачок и репа (по 22%).

3. Включение в овощной севооборот таких сидеральных культур, как горох и горохоовсяная смесь позволило увеличить продуктивность севооборота на 14–15%, использование фацелии — на 9%.

4. На обыкновенных черноземах Ростовской обл. использование навоза КРС увеличило продуктивность овощного севооборота на 9–10%, а сидерация горохоовсяной смесью — еще на 9–14%. Орошение дополнительно увеличивало эффективность использования навоза и сидератов в овощном севообороте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журбицкий З.И. Физиологические и агрохимические основы применения удобрений. М.: АН СССР, 1963. 293 с.
2. Литвинов С.С. Научные основы современного овощеводства. М.: РАСХН, 2008. 776 с.
3. Борисов В.А. Система удобрения овощных культур. М.: Росинформагротех, 2016. 394 с.

4. *Сирота С.М.* Удобрение овощных культур и картофеля на юге Западной Сибири. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2011. 280 с.
5. *Авдеенко С.С.* Комплексное действие удобрений, орошения и сидератов на урожайность и качество столовой моркови и кабачка в условиях Ростовской обл.: Дис. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИО, 2001. 146 с.
6. Методика опытного дела в овощеводстве и бахчеводстве / Под ред. Белик В.Ф. М.: Агропромиздат, 1992. 319 с.
7. *Иванов А.Л., Сычев В.Г., Чекмарев П.А., Державин Л.М., Борисов В.А.* Методическое руководство по проектированию применения удобрений в интенсивном овощеводстве открытого грунта. М.: Росинформагротех, 2012. 476 с.
8. *Борисов В.А., Сирота С.М., Беляков М.А.* Влияние длительного систематического применения удобрений на урожайность и качество овощных культур на черноземе, выщелоченном в Западной Сибири // *Агрохимия*. 2006. № 3. С. 22–27.
9. *Борисов В.А.* Особенности агрохимических исследований в овощеводстве // *Совершенствование организации и методологии агрохимических исследований в географической сети опытов с удобрениями*. М.: ВНИИА, 2006. С. 123–126.

Effectiveness of the Use of Manure, Biocompost and Siderates for Vegetable Crops

V. A. Borisov^a, O. N. Uspenskaya^{a, #}, A. A. Kolomiets^a, and I. Yu. Vasyuchkov^a

^a*The All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing—Branch
of the Federal Scientific Center of Vegetable Growing
d. Vereya, 500, Moscow region, Ramensky district 140153, Russia*

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

Excessive fascination in vegetable growing with mineral (especially nitrogen) fertilizers has led to significant contamination of soils and products with nitrate, heavy metals, and other toxicants. The scientific literature has accumulated considerable material on the use of various kinds of fertilizers, especially mineral fertilizers. A well-established trend towards the development of organic farming on a global scale requires a more in-depth study of the effect of organic fertilizers on vegetable yields and adjustments to previously developed fertilizer systems for vegetable crops. The research was carried out by the Department of Agriculture and Agrochemistry of the All-Russian scientific research institute of vegetable growing—branch of the Federal scientific center of vegetable growing and three experimental stations of the Institute on sod-podzolic, alluvial meadow soils, typical, ordinary and leached chernozems in the Non-chernozem zone, the North Caucasus and Western Siberia. It was found out that the efficiency of the use of cattle manure on average for 6 crops on 6 types of soils was 33% of the increase in yield. The highest increases were found in cucumber (62%) and table beet (54%) crops; cabbage and carrots increased yields by 27 and 22%, respectively, tomato and onion — by an average of 17%. The efficiency of manure was inversely proportional to the amount of humus content in the soil. Studies of the effectiveness of the use of biocomposts based on chicken manure revealed that the biocompost increased the yield of 12 vegetable crops on alluvial meadow soil by an average of 20, mineral fertilizers — by 28%, the joint application of these fertilizers allowed to increase yields by 35%. Green fertilizers (siderates) in the conditions of the Central Processing Plant allowed to increase the yield of vegetables by 8–15%, peas, pea mixture and phacelia turned out to be the most effective, yellow lupin and sunflower were ineffective. In the irrigated conditions of the Rostov region, the complex application of mineral fertilizers, manure and siders increased the yield of vegetable crops from 23.6 to 49.6 t/ha, i.e. by more than 2 times.

Key words: vegetable crops, manure, biocompost, siderates, mineral fertilizers, soils, regions, productivity, efficiency.

УДК 631.811.98:631.544:635.63

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЦИТОКИНИНОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА КАК АНТИСТРЕССОВЫХ ПРЕПАРАТОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОГУРЦА В ЗАЩИЩЕННОМ ГРУНТЕ

© 2023 г. А. С. Лукаткин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
430005 Саранск, ул. Большевистская, 68, Россия

E-mail: aslukatkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.10.2022 г.

После доработки 29.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Изучили действие синтетических аналогов цитокининов — цитодефа и тидиазулона — на рост, развитие и продуктивность растений огурца, выращенных в защищенном грунте. Растения огурца в стадии 3–4 листьев высаживали из рассадных горшков в грунт и обрабатывали растворами цитодефа в концентрациях 10^{-9} – 10^{-6} М/л или тидиазулона в концентрациях 10^{-11} – 10^{-6} М/л. Во время вегетации отмечали сроки прохождения фенологических фаз, периодически измеряли высоту растений, количество листьев, цветков (мужских и женских), плодов (в начале плодоношения). Продуктивность растений огурца определяли посредством периодических (через 1–2 сут) сборов. Выявлено, что обработка молодых растений различными концентрациями препаратов благоприятно повлияла на рост огурца; лучшие результаты получены при концентрации тидиазулона 10^{-8} М/л и цитодефа — в дозах от 10^{-8} до 10^{-6} М/л. Обработка растений огурца цитодефом и тидиазулоном повысила продуктивность растений и товарность получаемых плодов. В стрессовых температурных условиях препараты способствовали лучшему состоянию растений.

Ключевые слова: огурец, регуляторы роста, тидиазурон, цитодеф, температура, рост, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188123020102, **EDN:** MSYTLK

ВВЕДЕНИЕ

Условия внешней среды претерпевают периодические и случайные изменения, причем отклонения от благоприятных для жизни растений норм часто достигают опасных амплитуд, к которым растения эволюционно не приспособлены; они вызывают повреждения растений и снижение их продуктивности [1]. Использование защищенного грунта для промышленного выращивания овощной продукции приобретает все большие масштабы [2]. В культивационных сооружениях имеется возможность создавать определенный микроклимат, который требуется для той или иной культуры [3]. Однако несмотря на то, что культивационные сооружения защищенного грунта отделены стеклянным или полимерным покрытием от наружной среды, микроклимат внутри в значительной мере зависит от ее воздействия [3]. При выращивании в защищенном грунте по сравнению с овощеводством открытого грунта необходимо более внимательно относиться к созданию в теплице оптимального агрофона; отклонения от него негативно сказываются на

продуктивности растений, возникают стрессы биотической или абиотической природы [3, 4].

Известно, что действие неблагоприятных температур (как пониженных, так и повышенных) в период активной вегетации растений огурца приводит к аномалиям в росте и развитии, снижению продуктивности и качества плодов. Одним из путей решения этих проблемы является использование синтетических регуляторов роста (**РР**) [5, 6]. Также увеличить стрессоустойчивость огурцов к неблагоприятным факторам возможно, применяя **РР** природного происхождения [7].

Применение **РР** в условиях защищенного грунта преследует многие цели: повышение урожайности и качества выращиваемой продукции, ускорение созревания, улучшение завязываемости плодов [8]. Оно воздействует также на устойчивость растений к перепадам температуры, повышение их неспецифического иммунитета (иммунокоррекцию), снижает содержание нитратов и радионуклидов в выращиваемой продукции, влияет на ее сохранность [9]. В настоящее время используют более 40 препаратов, обладающих од-

ним или несколькими из вышеперечисленных свойств [10, 11].

В последнее время синтезирован ряд новых соединений, обладающих цитокининовой активностью. Их преимуществом является низкая концентрация, в которой они оказывают специфическое действие, и высокая эффективность по сравнению с природными цитокининами [12]. Нами было показано снижение холодового повреждения у теплолюбивых растений при использовании ряда таких *РР* [13–15]. Некоторые цитокининовые препараты включены в список разрешенных на территории Российской Федерации агрохимикатов: 4 препарата на основе 6-бензил-аминопурина, 2 – кинетина, 1 – цитодефа [11]. Однако данных по применению цитокининовых *РР* в условиях защищенного грунта практически нет.

Цель работы – изучение действия синтетических аналогов цитокининов – цитодефа и тидиазулона – на рост, развитие и продуктивность растений огурца при выращивании в защищенном грунте. Для выполнения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1 – изучить действие различных концентраций препаратов цитодеф и тидиазурон на рост и развитие растений огурца в условиях защищенного грунта (в том числе в стрессовых температурных условиях);

2 – определить оптимальные концентрации препаратов цитодеф и тидиазурон для обработки растений огурца в условиях защищенного грунта с учетом периода выращивания;

3 – выяснить влияние препаратов цитодеф и тидиазурон на продуктивность и товарность плодов огурца.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования служили растения огурца гибридов Герман (летне-осенний период) и Спартак (зимне-весенний период). Объектами исследования были синтетические регуляторы роста, которые в очень малых концентрациях проявляют высокую цитокининовую активность. Цитодеф – N-(1,2,4-триазол-4-ил)-N'-фенил-мочевина, разработанный во ВНИИ химических средств защиты растений, выпускается ООО “Агросинтез” (Москва). Тидиазурон (дропп) – N-фенил-N'-(1,2,3-тиадиазол-5-ил)-мочевина – используется в качестве дефолианта, выпускается фирмой “Schering” (Германия) в виде 50% с.п.

Опыты проводили в течение 2-х сезонов в тепличном комплексе АПК “Воскресенский” (Московская обл., Одинцовский р-н). Растения огурца в стадии 3–4 листьев высаживали из рассадных горшков в грунт по обычной схеме посадки $1.6 \times$

$\times 0.4$ – 0.45 м, то есть 1.6–1.4 растения/м². Высаженные растения обрабатывали растворами цитодефа в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} и 10^{-6} М/л или тидиазулона в концентрациях 10^{-11} , 10^{-9} , 10^{-8} и 10^{-6} М/л. Общая площадь обработанных участков составила 340 м². Растения огурца выращивали при стандартных условиях тепличного комплекса (обработка пестицидами, удобрениями, полив, подвязка, снятие 5-ти колен (в летне-осенний период)). Температурный режим в летне-осенний период в основном соответствовал 25–30°C. Температуру в тепличном комплексе в зимне-весенний период с начала посадки регулировали и регистрировали каждые 2 ч.

Статистическую обработку полученных результатов проводили стандартными методами с помощью программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка растения огурца гибрида Герман регуляторами роста способствовала более хорошей (по сравнению с контролем) приживаемости растений, высаженных из рассадных горшков в грунт. Данные морфологических показателей в период выращивания показали, что визуальных отклонений от нормы по габитусу у обработанных растений не было. Процесс адаптации в опытных вариантах шел более успешно (табл. 1). Растения огурца, обработанные тидиазуоном в концентрации 10^{-11} М/л, за первые 10 сут показали самый высокий прирост (≈ 28 см). В опыте с цитодефом наибольший начальный прирост был у растений, обработанных препаратом в концентрации 10^{-7} М/л (19.7 см). Растения контрольного варианта (не обработанные *РР*) показали наименьший прирост (11 см).

В последующие 20 сут наибольший прирост имели растения, обработанные тидиазуоном в концентрации 10^{-8} М/л, менее интенсивно росли растения в вариантах обработки тидиазуоном в концентрации 10^{-6} и 10^{-9} М/л. Растения, обработанные тидиазуоном 10^{-11} М/л, показали в этот период прирост на уровне контроля. В варианте с цитодефом наиболее благоприятное влияние на прирост растений огурца оказала обработка препаратом в концентрации 10^{-9} М/л.

В зимне-весенний период растения огурца гибрида Спартак были обработаны тидиазуоном и цитодефом (в тех же концентрациях, как и растения гибрида Герман в летне-осенний период, но в стадии 4–6 листьев). Данные о росте огурца в зимне-весенний период представлены в табл. 2.

В первую неделю после посадки в грунт растения показали примерно одинаковый прирост во всех вариантах опыта. Однако в середине следую-

Таблица 1. Высота растений огурца гибрида Герман, обработанных синтетическими регуляторами роста цитодефом и тидиазуоном, в летне-осенний период вегетации, см

Вариант, концентрация, М/л	Дата измерения			
	9.07	19.07	29.07	5.08
Контроль	16.3 ± 4.2	27.3 ± 2.4	86.4 ± 10.6	165 ± 7
Цитодеф 10 ⁻⁶	15.8 ± 3.3	29.0 ± 4.4	98.6 ± 8.3	170 ± 9
Цитодеф 10 ⁻⁷	18.9 ± 4.1	38.6 ± 2.1	125 ± 2	204 ± 6
Цитодеф 10 ⁻⁸	12.9 ± 3.6	26.4 ± 2.4	119 ± 6	199 ± 9
Цитодеф 10 ⁻⁹	15.6 ± 1.5	28.7 ± 3.5	122 ± 8	209 ± 4
Тидиазуон 10 ⁻⁶	14.5 ± 3.1	25.4 ± 2.4	122 ± 6	233 ± 8
Тидиазуон 10 ⁻⁸	17.3 ± 2.1	27.7 ± 3.5	112 ± 16	257 ± 11
Тидиазуон 10 ⁻⁹	18.5 ± 3.3	35.5 ± 5.3	138 ± 3	221 ± 7
Тидиазуон 10 ⁻¹¹	17.8 ± 4.1	45.9 ± 5.6	103 ± 9	161 ± 9

Таблица 2. Высота растений огурца сорта Спартак, обработанных синтетическими регуляторами роста цитодефом и тидиазуоном в зимне-весенний период вегетации, см

Вариант, концентрация, М/л	Дата измерения				
	10.02	17.02	24.02	03.03	17.03
Контроль	31.0 ± 2.4	42.8 ± 3.9	48.9 ± 5.4	51.0 ± 7.5	75.2 ± 7.8
Цитодеф 10 ⁻⁶	32.2 ± 3.2	44.4 ± 4.1	56.9 ± 6.0	56.6 ± 5.2	81.7 ± 6.2
Цитодеф 10 ⁻⁷	41.0 ± 3.5	53.7 ± 3.6	60.4 ± 6.2	61.8 ± 6.1	78.3 ± 7.5
Цитодеф 10 ⁻⁸	43.9 ± 6.7	55.9 ± 5.5	71.8 ± 6.9	92.4 ± 9.4	115 ± 6
Цитодеф 10 ⁻⁹	41.7 ± 4.8	53.5 ± 5.7	60.8 ± 8.1	68.8 ± 7.7	86.4 ± 8.7
Тидиазуон 10 ⁻⁶	39.2 ± 4.1	49.5 ± 6.7	58.9 ± 5.1	71.5 ± 5.5	94.5 ± 6.3
Тидиазуон 10 ⁻⁸	31.4 ± 6.2	43.8 ± 6.6	50.9 ± 7.9	60.5 ± 7.8	82.1 ± 8.6
Тидиазуон 10 ⁻⁹	24.3 ± 1.6	37.8 ± 3.3	43.6 ± 3.4	49.6 ± 3.6	73.3 ± 5.6
Тидиазуон 10 ⁻¹¹	25.6 ± 3.0	36.4 ± 3.2	48.6 ± 4.2	59.8 ± 4.5	88.3 ± 4.6

шей недели (через 12 сут после обработки регуляторами) растения подверглись стрессовому воздействию пониженной температуры вследствие повреждения кровли. Среднесуточная температура не превышала 16°C, а минимальная зарегистрированная температура составила 11°C. В эпицентре оказались растения, обработанные тидиазуоном в концентрациях 10⁻⁶ и 10⁻⁸ М/л, и цитодефом в концентрациях 10⁻⁷ и 10⁻⁸ М/л. Растения огурца показали неодинаковую реакцию на изменения температуры. Стрессовая ситуация привела к резкому снижению роста контрольных растений, а также растений, обработанных цитодефом в концентрациях 10⁻⁶ и 10⁻⁷ М/л и тидиазуоном 10⁻⁹ М/л. Растения огурца, обработанные цитодефом в концентрации 10⁻⁸ М/л, показали наибольший прирост (в среднем 15 см). Нужно отметить, что растения огурца, обработанные тидиазуоном 10⁻⁶ М/л и попавшие в эпицентр по-

вреждения кровли, по сравнению с другими растениями не потеряли темпов роста.

Измерения, проведенные 3 марта (через 10 сут после стрессовой ситуации), показали, что растения, пережившие температурный стресс, проявляли явное отставание в росте, часто встречались растения угнетенного вида (тонкие стебли с маленькими листочками желто-зеленого цвета). Наименьший прирост показали растения, обработанные цитодефом в концентрациях 10⁻⁶ и 10⁻⁷ М/л, тидиазуоном 10⁻⁹ М/л, а также растения контрольного варианта. Однако следующие измерения, проведенные спустя еще 14 сут, показали значительное выравнивание роста исследованных растений, т.е. наблюдали репарацию повреждений.

В ходе вегетации растений огурца изучали также влияние синтетических *PP* на формирование листового аппарата, как одного из основных фак-

торов урожая. В летне-осенний период количество листьев на растении увеличивалось пропорционально росту стебля. Обработка *PP* привела к увеличению количества листьев на растении: через 7 сут после обработки выявлен прирост 2-го листа у растений, обработанных 10^{-7} М/л цитодефом и 10^{-6} М/л тидиазуоном (остальные варианты опыта дали прирост не выше 1-го листа), и в последующие сроки темпы формирования листьев у растений различных вариантов сохранили такую же тенденцию.

В зимне-весенний период растения огурца развивали листовую пластинку слабее, чем в летне-осенний. Наблюдения, проведенные вскоре после стрессовой ситуации, показали, что растения контрольного варианта вообще не увеличили число листьев, более того, у некоторых растений листья погибли. Растения, обработанные 10^{-7} М/л цитодефом, 10^{-6} , 10^{-7} М/л тидиазуоном, показали в среднем прирост 1 лист. Остальные растения не показали увеличения числа листьев, но и их гибели замечено не было. Измерения, проведенные 17 марта, показали максимальное количество листьев у растений, обработанных 10^{-8} М/л цитодефом, 10^{-7} и 10^{-11} М/л — тидиазуоном (28, 27 и 19 шт./растение соответственно).

Таким образом, проведенные исследования показали, что растения огурца, обработанные цитодефом в концентрации 10^{-8} М/л и тидиазуоном в концентрациях 10^{-6} и 10^{-9} М/л, в летне-осенний и зимне-весенний периоды дали самые высокие показатели роста; растения, обработанные тидиазуоном в концентрации 10^{-11} М/л, в летне-осенний период раньше других прошли акклиматизацию после пересадки из рассадных горшков в грунт, а в зимне-весенний период проявили себя как стрессоустойчивые. Полученные результаты согласуются с данными наших предыдущих исследований [13–15].

При исследовании влияния синтетических *PP* на растения огурца в условиях защищенного грунта проводили наблюдения за прохождением фенологических фаз. Обработка молодых растений некоторыми концентрациями препарата цитодеф ускорила начало бутонизации растений на 2–5 сут (в концентрациях 10^{-9} и 10^{-7} М/л соответственно). Тидиазуон также ускорил наступление этой фазы на 2–3 сут. Аналогично эти же дозы препаратов ускорили начало цветения. Раньше всех (на 2 сут прежде контрольных растений) дали первый урожай растения, обработанные тидиазуоном в концентрации 10^{-11} М/л, хотя в этом варианте процесс бутонизации и начало цветения были отмечены позднее, чем в некоторых других вариантах (10^{-7} М/л цитодеф, 10^{-9} М/л тидиазуон). Спустя 1 сут после варианта тидиазуона

10^{-11} М/л был собран первый урожай с растений, обработанных тидиазуоном в концентрациях 10^{-8} – 10^{-6} М/л и цитодефом в концентрации 10^{-8} – 10^{-6} М/л. Растения контрольного варианта, а также обработанные 10^{-9} М/л тидиазуоном и цитодефом в концентрациях 10^{-9} М/л и 10^{-6} М/л, первый урожай дали позже предыдущих вариантов.

Наблюдения за прохождением фенологических фаз в зимне-весенний период вегетации показали, что растения, обработанные цитодефом и тидиазуоном в концентрациях 10^{-8} и 10^{-6} М/л соответственно, прошли фазы бутонизации и цветения раньше остальных на 1–2 сут. В фазе начала плодоношения наблюдали существенный разрыв в сроках между вариантами опыта. Первыми начали плодоносить растения, обработанные 10^{-8} М/л цитодефом (28 февраля), 10^{-6} М/л тидиазуоном (3 марта). Через 4 сут дали свой первый урожай растения, обработанные 10^{-9} М/л цитодефом. Растения контрольного варианта, а также обработанные цитодефом в концентрациях 10^{-6} М/л и 10^{-7} М/л, начали плодоносить позже всех (14 марта), хотя процессы бутонизации и начала цветения у этих растений проходили практически одновременно с остальными.

В летне-осенний период для растений огурца гибрида Герман (пчелоопыляемого) отмечали дефицит мужских цветков; на это, вероятно, повлияли высокие дневные температуры. В зимне-весенний период растения, наоборот, долго не начинали плодоносить, т.к. из-за пониженных температур в начале цветения преобладали мужские цветки.

В целом было отмечено, что продуктивность огурца была довольно низкой как в летне-осенний, так и в зимне-весенний периоды вегетации (табл. 3). Очевидно, это было связано с отмеченным выше дефицитом мужских или женских цветков, вызванным неблагоприятными температурами. Обработка *PP* существенно повлияла на продуктивность огурца. Максимальная величина урожая была получена после обработки 10^{-7} М/л цитодефом, затем шли варианты обработки цитодефом 10^{-8} М/л, тидиазуоном 10^{-6} и 10^{-8} М/л. Концентрация тидиазуона 10^{-9} М/л показала наименьшую величину урожая среди всех вариантов обработки. Товарность урожая огурца по всем исследованным концентрациям препаратов была существенно выше, чем у контрольных растений; наибольшая величина этого показателя отмечена для тидиазуона в концентрации 10^{-6} М/л и для цитодефа в концентрации 10^{-7} М/л.

Сходные данные продуктивности были получены в зимне-весенний период вегетации (табл. 4).

Таблица 3. Влияние регуляторов роста на продуктивность растений огурца гибрида Герман в летне-осенний период вегетации

Вариант, концентрация, М/л	Суммарный урожай, кг/м ²	% к контролю	Товарность		
			стандарт, кг/м ²	нестандарт, кг/м ²	доля товарных плодов, %
Контроль	4.78	100	4.35	0.43	91.0
Цитодеф 10 ⁻⁶	5.62	118	5.27	0.35	93.8
Цитодеф 10 ⁻⁷	7.04	147	6.68	0.36	94.9
Цитодеф 10 ⁻⁸	6.84	143	6.48	0.36	94.7
Цитодеф 10 ⁻⁹	5.31	111	4.96	0.35	93.4
Тидиазурон 10 ⁻⁶	6.28	131	6.01	0.27	95.7
Тидиазурон 10 ⁻⁸	6.10	128	5.75	0.35	94.3
Тидиазурон 10 ⁻⁹	4.88	102	4.47	0.41	91.6
Тидиазурон 10 ⁻¹¹	5.63	118	5.30	0.33	94.1

Показано, что обработка всеми препаратами повысила суммарный урожай огурца; максимальная продуктивность была у растений, обработанных цитодефом в концентрации 10⁻⁷ М/л. Немного меньшей она была в вариантах с обработкой 10⁻⁶ М/л цитодефом и 10⁻⁸, 10⁻⁹ М/л тидиазуоном. Доля стандартного урожая в зимне-весенний период была значительно меньше, чем в летне-осенний. Самая большая доля стандартного урожая была в варианте с обработкой растений 10⁻⁸ М цитодефом, чуть меньше – 10⁻⁸ М/л тидиазуоном и 10⁻⁶ М/л цитодефом.

Сравнение эффективности действия регуляторов роста в ходе 2-х периодов вегетации показало,

что *РР* во всех изученных концентрациях повышали общую продуктивность огурца, но различно в количественном аспекте (рис. 1). В летне-осенний период максимальное увеличение урожая отмечено в вариантах обработки 10⁻⁷ и 10⁻⁸ М/л цитодефом, а в зимне-весенний период наиболее интенсивное плодообразование отмечено в вариантах обработки 10⁻⁷ и 10⁻⁶ М/л цитодефом и 10⁻⁸ М/л тидиазуоном. Очевидно, что реакция растений на обработку синтетическими регуляторами будет несколько меняться в зависимости от условий выращивания (действия высоких или пониженных температур), хотя ее направленность вполне однозначна.

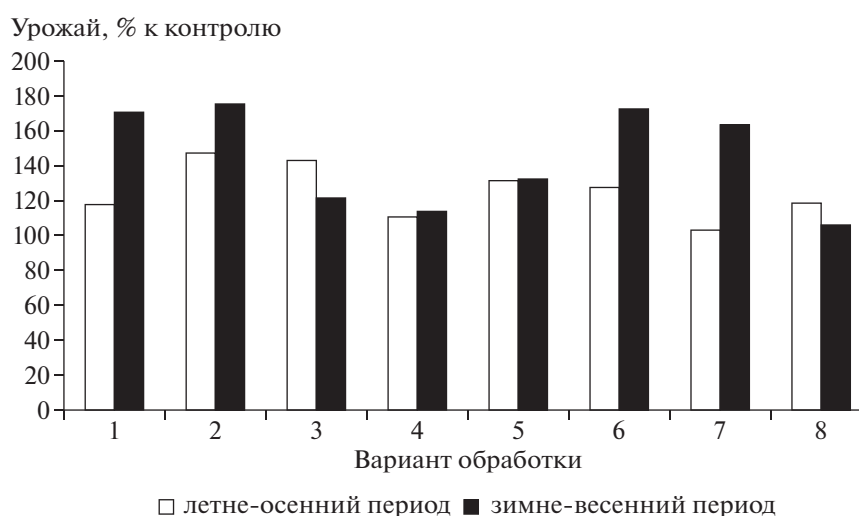


Рис. 1. Сравнительная эффективность (по продуктивности) обработки синтетическими регуляторами растений огурца, выращенных в летне-осенний и зимне-весенний периоды вегетации, в зависимости от варианта обработки (М/л): 1 – цитодеф 10⁻⁶, 2 – цитодеф 10⁻⁷, 3 – цитодеф 10⁻⁸, 4 – цитодеф 10⁻⁹, 5 – тидиазурон 10⁻⁶, 6 – тидиазурон 10⁻⁸, 7 – тидиазурон 10⁻⁹, 8 – тидиазурон 10⁻¹¹. Нумерация вариантов та же на рис. 2.

Таблица 4. Влияние тидиазулона и цитодефа на продуктивность и товарность растений огурца гибрида Спартак в зимне-весенний период вегетации

Вариант, концентрация, М/л	Суммарный урожай, кг/м ²	% к контролю	Товарность		
			стандарт, кг/м ²	нестандарт, кг/м ²	доля товарных плодов, %
Контроль	11.5	100	5.80	5.70	50.4
Цитодеф 10 ⁻⁶	19.6	170	11.5	8.08	58.7
Цитодеф 10 ⁻⁷	20.1	175	11.2	8.90	55.7
Цитодеф 10 ⁻⁸	14.0	122	8.64	5.33	61.8
Цитодеф 10 ⁻⁹	13.0	113	7.59	5.41	58.4
Тидиазурон 10 ⁻⁶	15.2	132	8.66	6.56	56.9
Тидиазурон 10 ⁻⁸	19.8	172	12.0	7.80	60.5
Тидиазурон 10 ⁻⁹	18.9	164	9.57	9.29	50.7
Тидиазурон 10 ⁻¹¹	12.2	106	6.86	5.32	56.3

Аналогичные результаты получены и в отношении сезонности действия *РР* на товарность продукции (рис. 2). Можно видеть, что все варианты обработки повысили долю товарной продукции, но в количественном аспекте в разные сезоны эффективность препаратов была различной. Если в летне-осенний период наивысшая товарность была отмечена в вариантах обработки растений тидиазуоном в концентрации 10⁻⁶ М/л и цитодефом в концентрациях 10⁻⁷ и 10⁻⁸ М/л, то в зимне-весенний период лучше зарекомендовали себя обработки 10⁻⁸ М/л цитодефом и 10⁻⁸ М/л тидиазуоном. Таким образом, в разные сезоны

необходимо применять разные дозы препаратов для получения максимальной продуктивности и товарности выращенной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что синтетические регуляторы роста (*РР*) тидиазурон и цитодеф благоприятно влияли на рост и продуктивность огурца в условиях закрытого грунта. Как в летне-осенний, так и в зимне-весенний периоды оптимальной для роста растений стала обработка тидиазуоном в концентрации 10⁻⁸ М/л. Положительно влияла такая обработка на продуктив-

**Рис. 2.** Товарность плодов огурца в зависимости от периода выращивания и варианта обработки цитодефом и тидиазуоном.

ность и на товарность полученной продукции. В то же время отмечена эффективность тидиазурина в концентрации 10^{-11} М/л при стрессовых условиях и для ускорения акклиматизации растений.

В варианте с цитодефом нельзя было выделить одну высокоэффективную концентрацию. В летне-осенний период оптимальной была концентрация 10^{-7} М/л, которая положительно влияла как на рост, так и на продуктивность и товарность полученной продукции. В зимне-весенний период положительно действовала на рост и продуктивность растений обработка цитодефом в концентрациях 10^{-6} и 10^{-8} М/л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукаткин А.С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. 208 с.
2. Федоренко В.Ф., Колчина Л.М., Горячева И.С. Мировые тенденции технологического развития производства овощей в защищенном грунте. 2-е изд. М.: Юрайт, М.: Росинформагротех, 2022. 199 с.
3. Белхороев Я.К. Овощеводство защищенного грунта. М.: Колос, 2000. 136 с.
4. Смолин Н.В., Савельев А.С., Потапова Н.В., Головин Д.А., Кузнецов А.В. Эффективность применения регуляторов роста на огурце в защищенном грунте // Аграрн. научн. журн. 2019. № 1. С. 21–25.
5. Лукаткин А.С., Зауралов О.А. Экзогенные регуляторы роста как средство повышения холодоустойчивости теплолюбивых растений // Докл. РАСХН. 2009. № 6. С. 20–22.
6. Будыкина Н.П., Алексеева Т.Ф., Хилков Н.И. Действие препарата эпин-экстра на растения огурца в защищенном грунте // Агрохимия. 2011. № 1. С. 28–34.
7. Алексеева К.Л., Сметанина Л.Г., Корнев А.В. Повышение адаптивности тепличного огурца к биотическим и абиотическим стрессам под влиянием регуляторов роста и удобрений // Усп. совр. науки. 2017. Т. 1. № 9. С. 32–35.
8. Алексеева К.Л., Смирнова О.Н. Эффективность регуляторов роста на культуре тепличного огурца // Гавриш. 2014. № 2. С. 20–23.
9. Харченко Г.Л. Новые регуляторы роста растений // Защита и карантин раст. 2003. № 9. С. 20–21.
10. Вакуленко В.В. Регуляторы роста // Защита и карантин раст. 2004. № 1. С. 24–26.
11. Справочник пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации 2022 // АГРО XXI. <https://www.agroxxi.ru/goshandbook>
12. Шаповалов А.А., Зубкова Н.Ф. Отечественные регуляторы роста растений // Агрохимия. 2003. № 11. С. 33–47.
13. Лукаткин А.С., Жамгарян Ю.А., Пугаев С.В. Влияние тидиазурина на продуктивность, холодоустойчивость и качество плодов огурца // Агрохимия. 2003. № 7. С. 52–59.
14. Лукаткин А.С., Кирдянова И.А., Пугаев С.В. Влияние препарата цитодеф на холодоустойчивость, урожайность и качество плодов огурца // Агрохимия. 2005. № 1. С. 44–52.
15. Лукаткин А.С., Старкина М.И. Влияние тидиазурина на устойчивость проростков огурца к стрессовым факторам // Агрохимия. 2011. № 10. С. 31–38.

Use of Synthetic Cytokinin-Like Growth Regulators as Antistress Agents at Cucumber Cultivation in Greenhouses

A. S. Lukatkin^{a, #}

^aN.P. Ogarev National Research Mordovia State University
Bolshevistskaya ul. 68, Saransk 430005, Russia

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

The effect of synthetic analogues of cytokinins – cytoDEF and tidiazuron – on the growth, development and productivity of cucumber plants grown in protected soil was studied. Cucumber plants at the stage of 3–4 leaves were planted from garden pots into the ground and treated with cytoDEF solutions at concentrations of 10^{-9} – 10^{-6} М/л or tidiazuron at concentrations of 10^{-11} – 10^{-6} М/л. During vegetation, the timing of the passage of phenological phases was noted, the height of plants, the number of leaves, flowers (male and female), fruits (at the beginning of fruiting) were periodically changed. The productivity of cucumber plants was determined by means of periodic (after 1–2 days) collections. It was revealed that the treatment of young plants with different concentrations of drugs favorably affected the growth of cucumber; the best results were obtained at a concentration of tidiazuron 10^{-8} М/л and cytoDEF – in doses from 10^{-8} to 10^{-6} М/л. Treatment of cucumber plants with cytoDEF and tidiazuron increased plant productivity and the yield of the fruits obtained. Under stressful temperature conditions, the preparations contributed to the better condition of the plants.

Key words: cucumber, growth regulators, thidiazuron, cytoDEF, temperature, growth, productivity.

УДК 632.951.2:633.491:632.76

НОВЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРЕПАРАТЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КАРТОФЕЛЯ ОТ КОЛОРАДСКОГО ЖУКА

© 2023 г. М. Н. Шорохов^{1,2,*}, О. А. Кривченко^{1,2}, О. В. Долженко¹

¹«Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений»

196608 Санкт-Петербург—Пушкин, ш. Подбельского, 3, Россия

²ООО «Инновационный центр защиты растений»

196607 Санкт-Петербург—Пушкин, Пушкинская ул., 20, лит. А, пом. 7-Н, Россия

*E-mail: shorochov@iczr.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

После доработки 19.07.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Представлены результаты оценки биологической эффективности комбинированного инсектицида Эфория, КС (тиаметоксам 141 г/л + лямбда-цигалотрин 106 г/л) и инсектофунгицида Вайбранс Топ, КС (тиаметоксам 262.5 г/л + флудиоксанил 25 г/л + седаксан 25 г/л) и экотоксикологические показатели этих препаратов. На основании полученных данных сделан вывод о целесообразности использования данных препаратов в системах защиты картофеля от колорадского жука в соответствии с установленными регламентами применения при условии наличия данных препаратов в «Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации».

Ключевые слова: колорадский жук (*Leptinotarsa decemlineata* Say), ассортимент инсектицидов, инсектицид, комбинированный препарат, инсектофунгицид.

DOI: 10.31857/S0002188122120122, **EDN:** SPWZGY

ВВЕДЕНИЕ

Картофель по праву считается вторым хлебом. Его клубни являются незаменимым продуктом питания, а также сырьем для пищевой промышленности [1]. Для получения высокого и качественного урожая необходимо поддерживать потенциальную продуктивность культуры, которая может быть снижена вследствие деятельности вредных организмов.

Среди многоядных вредителей особо опасными являются проволочники — личинки жуков-щелкунов и подгрызающие совки. Семенным посевам вред наносят тли, переносящие вирусную инфекцию. Однако одним из наиболее ярких и общеизвестных примеров вредоносных видов насекомых, ныне отнесенным к числу вредителей-супердоминантов, справедливо считают колорадского жука — *Leptinotarsa decemlineata* Say [2]. Он причиняет вред картофелю в течение всего вегетационного периода. Вредят как имаго, так и личинки. Повреждения выражаются в грубом объедании листьев вплоть до сквозных дыр. Наиболее опасен вредитель в период бутонизации и цветения. Именно в этот период растение начи-

нает формировать клубни и даже небольшое снижение листовой поверхности отрицательно сказывается на процессе их формирования [3].

К защитным мероприятиям с данным вредителем относятся: севооборот и пространственная изоляция посадок от мест прошлогоднего выращивания, другие агротехнические приемы такие как междурядная обработка почвы, удаление ботвы перед уборкой, а также вспашка, выращивание устойчивых сортов картофеля, чередование обработок биологическими и химическими препаратами из разных классов при достижении вредителем экономического порога вредоносности (ЭПВ).

Современный ассортимент химических средств защиты картофеля от колорадского жука разнообразен. В нем представлены препараты на основе 6-ти химических классов, а также комбинаций действующих веществ разных классов причем не только с инсектицидной, но и фунгицидной активностью. Препараты применяют различными способами, и они имеют разные препаративные формы. Это многообразие достигается путем постоянной модернизации и эволюции ассортимента средств защиты растений [4, 5], в том числе

за счет исследований в области установления биологической эффективности комбинированных препаратов и инсектофунгицидов. Цель работы — изучение эффективности применения новых комбинированных препаратов для защиты картофеля от колорадского жука.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2019 и 2020 гг. были проведены полевые исследования биологической эффективности комбинированного инсектицида Эфория, КС (тиаметоксам 141 г/л + лямбда-цигалотрин 106 г/л) и инсектофунгицида Вайбранс Топ, КС (тиаметоксам 262.5 г/л + флудиоксанил 25 г/л + седаксан 25 г/л) в борьбе с колорадским жуком на базе Центра биологической регламентации использования пестицидов Всероссийский НИИ защиты растений и ООО “Инновационный центр защиты растений” в соответствии с Методическими указаниями по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве [6], а также Методическим указаниям по регистрационным испытаниям пестицидов в части биологической эффективности. Общая часть (2018 г.) [7].

Использовали следующие сорта картофеля: Удача (2019 г.) и Колобок (2020 г.) в Нижегородской области на базе Нижегородского научно-исследовательского института сельского хозяйства.

Схема опыта с препаратом Эфория: Эфория, КС (106 + 141 г/л) в нормах применения 0.15, 0.2 и 0.25; Борей, СК (150 + 50 г/л) — эталонный препарат в норме 0.12 л/га; контроль без обработки.

Схема опыта с препаратом Вайбранс Топ: Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) в нормах применения 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 л/т; Престиж, КС (140 + 150 г/л) — эталонный препарат в норме 1.0 л/т; контроль без обработки.

Способ применения: для препарата Эфория, КС — опрыскивание в период вегетации; Вайбранс Топ, КС — обработка клубней.

Биологическую эффективность препарата определяли по снижению численности личинок колорадского жука относительно исходной с поправкой на контроль, рассчитывали по формуле Хендерсона—Тилтона (для способа опрыскивания в период вегетации), а также по снижению численности личинок относительно контроля и рассчитывали по формуле Аббота (для способа обработки клубней).

Статистическую обработку данных проводили по [8] и с помощью программы Statistika 6.0 для Windows.

Ниже приведены механизмы действия веществ с инсектицидной активностью, входящих в состав изученных препаратов. Лямбда-цигалотрин воздействует на обмен кальция в синапсах и натрий-калиевых каналах, тем самым нарушает функцию нервной системы. Это приводит к значительному избыточному выделению ацетилхолина при прохождении нервного импульса. Отравление проявляется в поражении двигательных центров и сильном возбуждении [9].

Тиаметоксам воздействует на нервную систему насекомых, в частности, на никотиново-ацетил-холиновые рецепторы [10, 11].

Имидаклоприд (входит в состав эталонного препарата) связывается с постсинаптическими никотиновыми ацетилхолиновыми рецепторами нервной системы насекомых, в результате чего у них развивается паралич [12].

В рамках проведения экотоксикологической оценки изученных препаратов определяли их токсическую нагрузку. Ее расчет проводили по методике, предложенной в [13], которая предусматривает определение токсической нагрузки как частное от деления рекомендуемой нормы применения препарата (мг д.в./га) на полулетальную дозу (LD_{50}) для теплокровных (мг/кг).

По величине этого показателя все препараты можно разделить на 4 группы: малоопасные — токсическая нагрузка не превышает 100 полулетальных доз на 1 га; умеренно опасные — от 100 до 1000 полулетальных доз на 1 га; опасные — от 1000 до 10000 полулетальных доз на 1 га; особо опасные — >10000 полулетальных доз на 1 га.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прохладная погода в первой половине лета 2019 г. оказала влияние на развитие колорадского жука, его вредоносность была на уровне ЭПВ и проявлялась в очагах. Первые личинки появились в середине июля с 10–12-суточным отставанием от обычных сроков, они заселили в среднем 11.5% растений.

Обработку опытных делянок провели 15 июля при средней численности 16.5–20.6 личинки/растение (ЭПВ = 10–20 личинок/растение при заселении 10% растений).

Учеты, проведенные на 3 и 7 сутки после обработки, показали 100%-ную эффективность инсектицида Эфория, КС (141 + 106 г/л). Во всех вариантах с разными нормами применения вредитель отсутствовал, тогда как в контроле насчитывали 18.5–21.5 личинки/растение.

Таблица 1. Биологическая эффективность инсектицида Эфория, КС (141 + 106 г/л) в борьбе с колорадским жуком на картофеле (Нижегородская обл., 2019–2020 гг.)

Вариант	Норма применения препарата, л/га	Среднее число личинок/растение				Снижение численности личинок относительно исходной с поправкой на контроль, время (сут) учетов после обработки, %		
		до обра- ботки	после обработки, время (сут) учетов					
			3-и	7-е	14-е	3-и	7-е	14-е
2019 г.								
Эфория, КС (141 + 106 г/л)	0.15	17.5	0	0	0.9	100	100	89.8
	0.2	16.5	0	0	0	100	100	100
	0.25	19.5	0	0	0	100	100	100
Борей, СК (150 + 50 г/л)*	0.12	17.7	0	0	0.6	100	100	94.2
Контроль	—	20.6	21.5	18.5	9.7	—	—	—
<i>НСП</i> ₀₅	—	6.6	2.3	1.8	1.5	—	—	—
2020 г.								
Эфория, КС (141 + 106 г/л)	0.15	27.1	0	0	0	100	100	100
	0.2	26.4	0	0	0	100	100	100
	0.25	27.4	0	0	0	100	100	100
Борей, СК (150 + 50 г/л)*	0.12	25.7	0	0	0	100	100	100
Контроль	—	28.6	32.3	27.6	17.3	—	—	—
<i>НСП</i> ₀₅	—	6.7	4.6	4.8	2.0	—	—	—

*Эталон.

На 14-е сут после обработки отмечено появление единичных личинок колорадского жука только в вариантах опыта с инсектицидом Эфория, КС (141 + 106 г/л) в норме применения 0.15 л/га (0.9 личинки/растение) и эталонным препаратом в норме 0.12 л/га (0.6 личинки/растение). В вариантах с изученным инсектицидом в нормах 0.2 л/г и 0.25 л/га вредитель отсутствовал.

На фоне снижения численности вредителя в контроле до 9.7 личинки/растение биологическая эффективность изученного препарата составила 89.8% (0.15 л/га) и 100% (0.2 и 0.25 л/га), эталона — 94.2%. Все варианты опыта с применением препарата достоверно отличались от контроля (табл. 1).

В вегетационном сезоне 2020 г. преобладала очень теплая погода, которая способствовала развитию колорадского жука и проявлению его вредоносности, численность личинок на опытных делянках была выше ЭПВ. Обработку картофеля провели 27 июня при средней численности 25.7–28.6 личинки/растение и заселении более 25% растений (ЭПВ = 10–20 личинок/растение при заселении 10% растений).

Учеты на 3–7–14-е сут после обработки показали 100%-ную эффективность изученного инсектицида Эфория, КС (141 + 106 г/л) во всех нормах его применения, сравнимую с эталонным препаратом Борей, СК (150 + 50 г/л) в норме 0.12 л/га. На контрольных делянках численность вредителя в течение первой недели менялась в пределах 27.6–32.3 личинки/растение, к концу 2-й недели снизилась за счет личинок, ушедших на окукливание. Варианты опыта с препаратами достоверно отличались от контроля (табл. 1).

В 2019 г. на делянках с инсектофунгицидом Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) первые личинки колорадского жука были обнаружены спустя 3 сут после появления их в контроле — заселенными оказались растения в вариантах с нормами применения 0.4 л/т и 0.5 л/т, снижение численности вредителя относительно контроля составило 88.8 и 91.9% соответственно. Биологическая эффективность исследованного инсектофунгицида в нормах применения 0.6 и 0.7 л/т, а также эталона была на уровне 100%.

Таблица 2. Биологическая эффективность инсектофунгицида Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) в борьбе с колорадским жуком на картофеле Нижегородская область, 2019–2020 гг.

Вариант	Норма применения препарата, л/га	Среднее число личинок на растение после появления личинок в контроле, время (сут) учетов			Снижение численности относительно исходной с поправкой на контроль, время (сут) учетов после обработки, %		
		3-и	7-е	14-е	3-и	7-е	14-е
2019 г.							
Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л)	0.4	2.4	3.4	1.9	88.8	81.8	79.9
	0.5	1.7	2.5	1.5	91.9	86.5	84.5
	0.6	0	1.6	1.0	100	91.2	89.7
	0.7	0	1.1	0.5	100	94.3	94.9
Престиж, КС (140 + 150 г/л)*	1.0	0	2.8	2.1	100	84.9	78.4
Контроль	—	21.5	18.5	9.7	—	—	—
<i>HCP</i> ₀₅	—	2.7	2.4	1.7	—	—	—
2020 г.							
Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л)	0.4	0	4.9	6.9	100	82.4	60.3
	0.5	0	3.7	5.8	100	86.5	66.2
	0.6	0	3.2	4.4	100	88.5	74.6
	0.7	0	2.3	4.1	100	91.6	76.3
Престиж, КС (140 + 150 г/л)*	1.0	0	3.1	4.3	100	88.7	75.4
Контроль	—	32.3	27.6	17.3	—	—	—
<i>HCP</i> ₀₅	—	4.1	4.6	2.8	—	—	—

*Эталон.

На 7-е сут обнаружены единичные личинки уже во всех вариантах с препаратами, тогда как в контроле их численность снизилась. Биологическая эффективность инсектофунгицида Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) составила 81.8% (0.4 л/т), 86.5% (0.5 л/т), 91.2% (0.6 л/т) и 94.3% (0.7 л/т). Эталонный препарат наиболее соответствовал вариантам с опытным препаратом в нормах применения 0.4 и 0.5 л/т.

К 14-м сут после появления личинок в контроле, часть личинок старших возрастов переместилась на соседние кусты картофеля, часть личинок, закончивших развитие, обнаружена на поверхности почвы, часть — ушла в почву на окукливание. На контрольных делянках насчитывалось в среднем 9.7 личинки/растение, на опытных — варьировала от 0.5 до 2.1 личинки/растение. Инсектофунгицид Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) снизил численность личинок относительно контроля на 79.9% (0.4 л/т), 84.5% (0.5 л/т), 89.7% (0.6 л/т) и 94.9% (0.7 л/т), эталон — на 78.4%. Варианты опыта достоверно отличались

от контроля. Различий между нормами применения исследуемого препарата, равно как эталона не выявлено (табл. 2).

В 2020 г. на делянках, обработанных инсектицидами, колорадский жук появился на 7 сут позже, чем в контроле. Биологическая эффективность инсектофунгицида Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) во всех нормах применения была равная: 82.4% (0.4 л/т), 86.5% (0.5 л/т), 88.5% (0.6 л/т), 91.6% (0.7 л/т) и мало отличалась от эталона (88.7%).

На 14-е сут численность личинок на опытных делянках изменилась не существенно, на контрольных — снизилась до 17.3 особи/растение. В дальнейшем личинки ушли на окукливание, в контрольных и опытных делянках вредитель отсутствовал. Выявлена достоверная разница между вариантами опыта и контролем. Разницы между нормами применения исследованного препарата и эталоном не выявлено (табл. 2).

Таблица 3. Экотоксикологические показатели препаратов Эфория, КС (141 + 106 г/л) и Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) в максимальных нормах применения

Действующее вещество	Норма применения	ЛД ₅₀ , мг/кг	Токсическая нагрузка (количество ЛД ₅₀ /га)
Тиаметоксам 141 г/л Лямбда-цигалотрин 106 г/л	0.25 л/га	1563 59	471.7
Тиаметоксам 262.5 г/л Флудиоксанил 25 г/л Седаксан 25 г/л	0.7 л/т	1563 5000 5000	122.0

Проведенная экотоксикологическая оценка позволила установить, что препараты Эфория, КС (141 + 106 г/л) и Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) относятся к умеренно опасным по отношению к теплокровным животным и окружающей среде. Наиболее безопасным препаратом для окружающей среды является инсектофунгицид Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л), т.к. у него меньшая токсическая нагрузка (меньше количество полудетальных доз на единицу поверхности). Также следует отметить, что данный препарат применяется более экологичным способом — обработкой клубней в период посадки (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные полевые исследования биологической эффективности инсектицида Эфория, КС (тиаметоксам 141 г/л + лямбда-цигалотрин 106 г/л) в нормах применения 0.15, 0.2 и 0.25 л/га способом опрыскивания в период вегетации растений картофеля показали, что исследованный препарат может обеспечить эффективную защиту картофеля от колорадского жука на уровне эталонного препарата. Снижение численности колорадского жука составило 89.8–100% (0.15 л/га), 100% (0.2 и 0.25 л/га) в 2019 г., в 2020 г. — 100% (0.15, 0.2 и 0.25 л/га).

Исследования по определению биологической эффективности инсектофунгицида Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) способом обработки клубней показали, что препарат в нормах 0.4 и 0.5 л/т по показателю эффективности соответствовал эталону и превосходил его в нормах применения 0.6 и 0.7 л/т. Препарат показал высокую эффективность во всех испытанных нормах применения в борьбе с личинками колорадского жука. Снижение численности вредителя составило в 2019 г. 79.9–88.8% (0.4 л/т), 84.5–91.9% (0.5 л/т), 89.7–100% (0.6 л/т), 94.3–100% (0.7 л/т), в 2020 г. — 60.3–100% (0.4 л/т), 66.2–100% (0.5 л/т), 74.6–100% (0.6 л/т), 76.3–100% (0.7 л/т).

Не отмечено достоверных различий между нормами применения исследованных препаратов по снижению численности колорадского жука. Все варианты существенно отличались только от контроля.

По величине токсической нагрузки препараты относятся к умеренно опасным. Можно рекомендовать использовать инсектофунгицид Вайбранс Топ, КС (262.5 + 25 + 25 г/л) в процессе посадки картофеля, а в случае достижения личинками колорадского жука уровня выше ЭПВ также применять препарат Эфория, КС (141 + 106 г/л) для обработки вегетирующих растений, при условии наличия данных препаратов в Каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Б.В. Картофелеводство России: производство, рынки, проблемы семеноводства. Современные системы защиты и новые направления в повышении устойчивости картофеля к колорадскому жуку. М., 2000. 225 с.
2. Кривченко О.А. Биологическое обоснование применения новых средств для защиты картофеля от вредителей и болезней на северо-западе Российской Федерации: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2021. 21 с.
3. Бречко Е.В. Оптимизация применения инсектицидов в защите картофеля от колорадского жука // Защита и карантин раст. 2012. № 4. С. 33–37.
4. Долженко В.И., Новожилов К.В. Современные аспекты развития химического метода защиты растений // Агрохимия. 2006. № 7. С. 82–85.
5. Долженко В.И., Буркова Л.А., Васильева Т.И., Иванова Г.П., Бельх Е.Б. Современные инсектициды для интегрированных систем защиты картофеля // Информ. бюл. ВПРС МОББ. 2007. № 38. С. 108–110.
6. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве / Под ред. Долженко В.И. СПб.: ВИЗР, 2009. 321 с.
7. Методические указания по регистрационным испытаниям пестицидов в части биологической эф-

- фективности. Общ. часть / Под. ред. Долженко В.И., Ракитского В.Н. М., 2018. 56 с.
8. Доспехов В.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
9. Справочник по пестицидам (токсиколого-гигиеническая характеристика). Вып. 1 / Под ред. В.Н. Ракитского. М.: Изд-во Агрорус, 2011.
10. Белан С.Р., Грапов А.Ф., Мельникова Г.М. Новые пестициды. Справочник. М.: Грааль, 2001. 195 с.
11. Петрова Т.М., Смирнова И.М. Определение инсектицида тиаметоксама в растительном материале и почве // Агрохимия. 2006. № 4. С. 84–89.
12. Еремина О.Ю., Лопатина Ю.В. Перспективы применения неоникотиноидов в сельском хозяйстве России и сопредельных стран // Агрохимия. 2005. № 6. С. 87–93.
13. Фадеев Ю.Н. Оценка санитарной и экологической безопасности пестицидов // Защита растений. 1988. № 7. С. 20–21.

New Combined Preparations to Protect Potatoes from the Colorado Potato Beetle

M. N. Shorokhov^{a,b,#}, O. A. Krivchenko^{a,b}, and O. V. Dolzhenko^{a,b}

^aAll-Russian Scientific Research Institute of Plant Protection
sh. Podbelskogo 3, Saint Petersburg–Pushkin 196608, Russia

^bLLC “Innovative Plant Protection Center”
Pushkinskaya ul. 20, lit. A, room 7–N, St. Petersburg–Pushkin 196607, Russia

[#]E-mail: shorochov@icZR.ru

The results of the evaluation of the biological efficacy of the combined insecticide Eforium, CS (thiamethoxam 141 g/l + lambda-cyhalothrin 106 g/l) and the insectofungicide Vibrans Top, CS (thiamethoxam 262.5 g/l + fludioxanil 25 g/l + sedaxan 25 g/l) and ecotoxicological indicators of these drugs are presented. Based on the data obtained, it is concluded that it is advisable to use these drugs in potato protection systems against the Colorado potato beetle in accordance with the established regulations for use, provided that these drugs are available in the “State Catalog of Pesticides and Agrochemicals approved for use on the territory of the Russian Federation”.

Key words: Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say), insecticide assortment, insecticide, combined preparation, insectofungicide.

УДК 631.61:631.433.3:631.417.1(470.61)

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕЛИОРАНТОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ДЫХАНИЯ И СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ РОСТОВСКОГО ЗООПАРКА[§]

© 2023 г. А. Н. Федоренко¹, А. А. Гобарова¹, К.Ш. Казеев^{1,*}

¹Южный федеральный университет
просп. Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону 344090, Россия

*E-mail: kamil_kazeev@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022 г.

После доработки 10.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Для оптимизации экологического состояния почв вольеров Ростовского-на-Дону зоопарка в качестве мелиорирующих веществ использовали органические вещества (древесные опилки, солому, лиственной опад, хвою, торф, подсолнечную лузгу, древесный уголь), синтетический регулятор влажности (гидрогель “Акватерра”), минеральные адсорбенты и разбавители (глауконитовый песок, диатомит, вермикулит, агроперлит, цеолит), биопрепараты (“Тамир”, гумат калия, “Байкал ЭМ”), а также сочетание гумата калия и древесных опилок). Наилучшие результаты получены при внесении древесных опилок в дозах 5 и 10% от массы почвы. При этом интенсифицировались биологические процессы в почве, что повышало ее способность к самоочищению от продуктов метаболизма животных. Внесенные опилки минерализовались с сильным увеличением эмиссии углекислого газа. Содержание органического углерода в почве при этом к концу опыта (через 6 мес.) практически не изменялось.

Ключевые слова: дыхание почв, биологическая активность, мелиорация, экологическое состояние.

DOI: 10.31857/S0002188123020084, **EDN:** MSUGXU

ВВЕДЕНИЕ

Местообитание играет важную роль в жизни животных. Наличие подходящих условий, способствующих поддержанию здоровья, является важной функцией среды, в которой обитает то или иное животное. Использование зоопарков в качестве места для сохранения и разведения животных позволяет собрать на одной территории различные виды. Однако в естественной среде обитания отходы жизнедеятельности животных быстро разлагаются, чего нельзя сказать о местах, созданных искусственно, в результате деятельности человека. Состояние зоопарка, в первую очередь, характеризует то, в каких условиях содержатся животные. Одно из отличий от естественной среды заключается в том, что территория разделена на участки, ограниченные вольерами. Таким образом, площадь в разы меньше, чем аре-

алы обитания животных в естественных условиях. Второе отличие возникает в связи с ограничением пространства и заключается в соблюдении санитарных норм, от которых зависит безопасность находящихся в замкнутом пространстве животных. Фактором благоприятного прибывания как животных в своих вольерах, так и посетителей на территории зоопарка является удовлетворение потребностей и тех и других. Кроме того, санитарно-эпидемиологическая обстановка играет ключевую роль в функционировании зоопарка, т.к. гарантирует безопасность от патогенных микроорганизмов и гельминтов для всех, кто находится в пределах данной территории [1].

В ходе длительного проживания на ограниченной территории животные, так или иначе, вносят свой вклад в формирование новой среды обитания. Их образ жизни, уровень физической активности, предпочтения в пище сказываются на состоянии почвы участков. Несмотря на то что отходы жизнедеятельности регулярно убирают сотрудники зоопарка, в почве все же происходит накопление биогенных веществ. Совокупность факторов приводит к нарушению равновесия и

[§]Исследование выполнено при поддержке ведущей научной школы РФ (НШ-449.2022.5), гранта Минобрнауки РФ на создание Лаборатории молодых ученых (№ ЛабНОЦ-21-01АБ) и Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета (“Приоритет 2030”, № СП-12-22-9).

развитию патогенной микрофлоры. Опасность данной ситуации заключается в том, что некоторые патогенные микроорганизмы могут сохранять свою вирулентность в течение длительного срока, а иногда десятилетиями [2].

Важным компонентом среды, нуждающимся в диагностике в данных условиях, является почва, выполняющая ряд экологических функций, обеспечивающих условия жизни животных, непосредственно контактирующих с ней. Актуальность исследований заключается в изучении влияния животных на почвенный компонент среды обитания и способности почв к разложению органических веществ животного происхождения [3, 4].

Органический углерод занимает ведущую роль в глобальных изменениях природной среды, которые затрагивают процессы биогеохимического цикла углерода, основанного на постоянном взаимодействии противоположных процессов синтеза и биодеструкции [5, 6]. Кроме того, органический углерод является одним из важнейших показателей почвенного плодородия и устойчивости почв к деградации [7–9]. Участие органического вещества в транспорте гидрофобных органических соединений обеспечивает буферность почв и мобильность микроэлементов, поддерживая экосистемные функции и целостность. Поэтому оценка содержания органического вещества является первостепенным показателем качества почвы [10, 11].

Биологическая активность почв основана на осуществлении процессов разложения и синтеза веществ. В качестве одного из общих показателей биологической активности почв часто используют дыхание почв – выделение углекислого газа и поглощение кислорода почвой [12–16]. Интенсивность эмиссии углекислого газа из почвы характеризует активность происходящих в ней биологических процессов. При этом, чем интенсивнее эмиссия, тем активнее происходят в ней биологические процессы, а значит, лучше условия. Оценка активности почвенного дыхания является одним из первых показателей качества почвы [17, 18].

Территория зоопарка, расположенного в центре города Ростова-на-Дону, достаточно обширна (57 га), что позволяет расположить большое количество вольеров. Результаты ранее проведенных исследований экологического состояния этих почв с использованием методов биодиагностики и биоиндикации представлены в ряде научных работ. Ранее проведенные исследования подтвердили наличие биогенного загрязнения, кото-

рое затрагивает активность биологических циклов – азота, фосфора и углерода [19–23].

В ходе исследований 2019–2022 гг. была проведена серия модельных опытов по мелиорации почв вольеров Ростовского зоопарка. Цель работы – подбор оптимального по составу и действию мелиорирующего вещества, способствующего как улучшению водно-физических свойств почв, так и повышению их биологической активности, влияющей на способность почв к самоочищению.

Проведение модельных исследований было направленно на поддержание способности почв к самоочищению без вреда для животных. Подбор мелиорирующих веществ осуществляли с опорой на предыдущие исследования в данной области. Анализ литературы показал, что длительное применение органических и минеральных удобрений приводило к снижению содержания органического углерода в почвах. Чтобы уменьшить потери, использовали различные методы мелиорации, направленные на стабилизацию органического вещества почв [24, 25]. Применение мелиорантов и биопрепаратов для повышения плодородия и улучшения экологического состояния почв также актуально в условиях деградации почв [26–29]. Внесение в почву нетрадиционных удобрений (древесных отходов и опилок) является эффективным приемом улучшения почвообразовательных процессов, повышающим плодородие грунтов, а также обогащающим почву необходимыми для хорошего роста и развития растений микроэлементами [30, 31]. Использование древесных опилок считается рентабельным и экологичным способом. Деревообрабатывающие предприятия часто отдают опилки бесплатно (на условиях самовывоза с территории предприятия). При сравнительно простых манипуляциях можно за 3–4 мес. получить эффективное органическое удобрение. Внесение компостов на основе опилок в почву позволяет снизить ее плотность. При этом происходит разрыхление почвы, насыщение кислородом, повышается водопроницаемость [32].

Улучшение способности почв к биодеструкции отходов животного происхождения исключает возможность развития патогенной микрофлоры, а также способствует устранению неприятных запахов на территории, что повышает качество среды для животных и посетителей зоопарка.

Таблица 1. Схема модельного опыта 1

Вариант	Почва	Доза
Контроль	Парковая зона зоопарка	Без добавок
Фон	Вольер с благородными оленями	Без добавок
Глауконитовый песок		5% от массы почвы
Древесные опилки		
Биопрепарат “Тамир”		
Гидрогель “Акваттера”		
Древесные опилки + биопрепарат “Тамир”		

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были почвы территории Ростовского-на-Дону зоопарка, представленные черноземом обыкновенным карбонатным. Почва для модельных экспериментов взята из вольеров, в которых содержатся благородные олени (*Cervus canadensis sibiricus*) и буйволы Арни (*Bubalus bubalis arnee*). Площадь вольера с благородными оленями — 1190 м², вольера с буйволами Арни — 280 м². Продолжительное пребывание животных на участке, а также количество особей на 1 м² сильно сказывается на видоизменении территории. Исследованные вольеры отличались выраженной пастбищной дигрессией, а также были загрязнены отходами жизнедеятельности животных. В обоих вольерах полностью отсутствовали травянистые растения. По шкале пастбищной дигрессии (степень от 1 до 10) участок с оленями оценен как 9-балльный сбой (интенсивность сбоя травяного покрова травоядными животными). Доля территории, покрытая растительностью, составляла 5%. Участок с буйволами по шкале пастбищной дигрессии оценен как 10-балльный абсолютный сбой. Нагрузка в вольере с оленями составляла 0.36 кг/м², в вольере с буйволами — 5.5 кг/м². Значительное внесение органических веществ приходилось на вольер с буйволами (≈97.8 кг/м²/год).

Исследование проходило в несколько этапов. Целью первого этапа была оценка экологического состояния почвы разных участков зоопарка и подбор оптимального по составу и действию мелиорирующего вещества. Для этого в контейнеры объемом 1 л помещали почвы из вольера с благородными оленями, а в качестве агентов, влияющих на разложение отходов животных и улучшающих эколого-биологическое состояние почвы, использовали гидрогель “Акваттера”, биопрепарат “Тамир”, древесные опилки и глауконитовый песок (табл. 1). Опыт проводили в трехкратной

повторности (21 контейнер). Сроки инкубации — 20 сут с момента закладки опыта.

Второй модельный опыт проводили с целью установки концентрации мелиорирующего вещества, необходимой для внесения в почву. В контейнеры объемом 1 л, помещали почву из вольера буйволов, а в качестве агентов, влияющих на разложение отходов животных и улучшение эколого-биологического состояния почвы, использовали древесные опилки (липа) и глауконитовый песок (табл. 2). Опыт проводили в девятикратной повторности (63 контейнера). Сроки инкубации — 6 мес. с момента закладки опыта.

Проведение модельного опыта 3 было необходимо для оценки и сравнения между собой действия органических, синтетических и минеральных добавок. В контейнеры объемом 1.5 л помещали почвы из вольера буйволов, а в качестве агентов, влияющих на разложение отходов животных и улучшающих эколого-биологическое состояние почвы, использовали органические и минеральные вещества, биопрепараты, биоуголь и синтетический регулятор влажности (табл. 3). Опыт проводили в трехкратной повторности (21 контейнер). Сроки инкубации — 3 мес. с момента закладки опыта.

Различие сроков инкубации в модельных опытах было обусловлено в опыте 1 (20 сут) — выбором нескольких добавок и изучением их влияния; в опыте 2 (6 мес.) — изучением влияния древесных

Таблица 2. Схема модельного опыта 2

Вариант	Почва	Доза
Фон	Вольер с буйволами	Без добавок
Глауконитовый песок		10%
Древесные опилки		1%
Древесные опилки		2.5%
Древесные опилки		5%
Древесные опилки		10%

Таблица 3. Схема модельного опыта 3

Вариант	Почва	Доза
Фон	Вольер с буйволами	Без добавок
Органические вещества (древесные опилки, солома, лиственный опад, хвоя, торф, подсолнечная лузга)		10%
Неорганические вещества (глауконитовый песок, диатомит, вермикулит, агроперлит, цеолит)		
Биопрепараты (“Тамир”, “Байкал ЭМ”, гумат калия)		
Биоуголь		
Гидрогель “Акватерра”		5%

опилок в динамике, что позволило отметить время от внесения и начала действия добавки до полного разложения и снижения эффекта; в опыте 3 (3 мес.) – ранее полученной информацией о снижении действия добавок после 3-х мес. инкубации.

Одним из самых чувствительных показателей биологической активности почв является интенсивность выделения углекислого газа. Интенсивность эмиссии углекислого газа почвами ($\text{мг/м}^2/\text{сут}$) измеряли при помощи газоанализатора ПГА-7 каждую неделю. Срок инкубации замкнутого контейнера с почвой перед анализом составлял 1–2 ч. Содержание органического углерода оценивали по окислению органического вещества почвы хромовой смесью при температуре 150°C по методу Тюрина в модификации Никитина с колориметрическим окончанием на спектрофотометре UNICO 1201 [33].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам первого модельного опыта было установлено, что оптимальным по составу и действию мелиорирующим веществом были древесные опилки в количестве 5% от массы почвы (рис. 1). Почвенная эмиссия углекислого газа при внесении древесных опилок достоверно отличалась от контроля. Внесение глауконитового песка и гидрогеля “Акватерра” сопровождалось снижением эмиссии углекислого газа. Совместное применение опилок и препарата “Тамир” оказало большее действие на эмиссию углекислого газа, чем влияние одного лишь биопрепарата. Это подтвердили достоверно различающиеся показатели.

Анализ фоновых величин эмиссии углекислого газа парковой зоны зоопарка и вольерного участка показал достоверные различия, которые были связаны с накоплением биогенных веществ в почвах вольерного участка. Было отмечено, что интенсивность эмиссии углекислого газа зависела

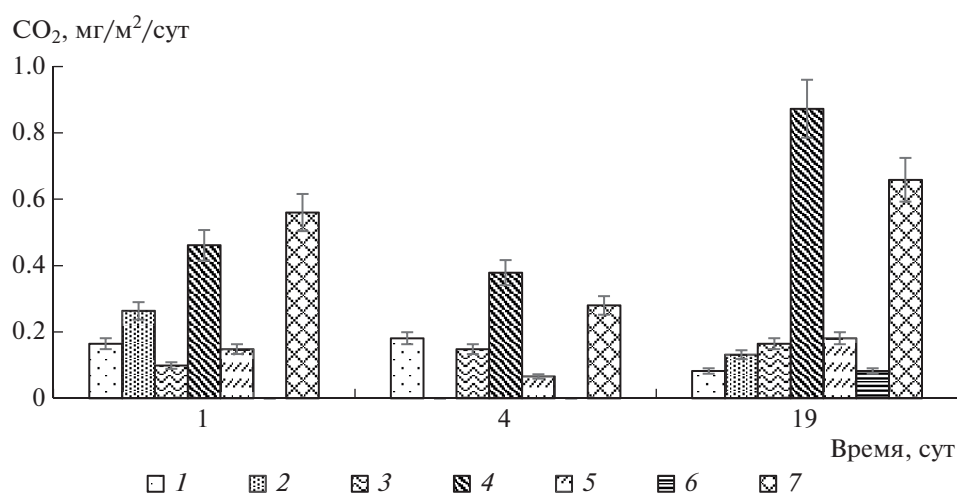


Рис. 1. Эмиссия CO_2 , мг/м^2 : 1 – парковая зона зоопарка, 2 – контроль, вольер с благородными оленями (*Cervus canadensis sibiricus*), 3 – глауконитовый песок, 4 – древесные опилки, 5 – биопрепарат “Тамир”, 6 – гидрогель “Акватерра”, 7 – древесные опилки + биопрепарат “Тамир”.

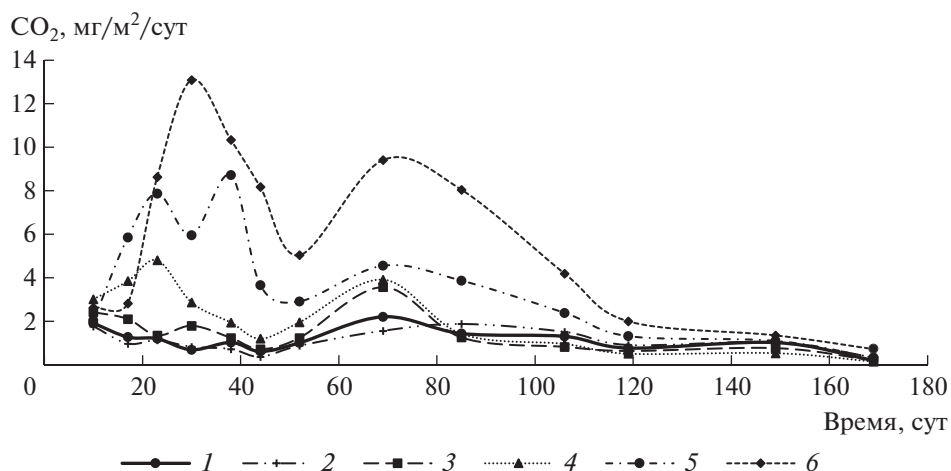


Рис. 2. Эмиссия CO₂, мг/м²: 1 – контроль, вольер с буйволами Арни (*Bubalus bubalis arnee*), 2 – песок 10%, 3 – опилки 1%, 4 – опилки 2.5%, 5 – опилки 5%, 6 – опилки 10%.

ла от природы внесенного вещества. Глауконитовый песок оказал разбавляющий эффект, который положительно влиял на физические свойства почвы, однако снижал ее биологическую активность. Поглощение воды гидрогелем негативно повлияло на влажность почвы, что неминуемо сказалось и на эмиссии углекислого газа, которая тесно коррелировала с данным показателем.

Во втором модельном опыте было выявлено, что древесные опилки в количестве 5 и 10% от массы почв были эффективными (рис. 2). В варианте с 5%-ным внесением опилок максимальная эмиссия углекислого газа отмечена на 30-е сут, а с 10%-ным – на 38-е сут. Внесение песка в количестве 10% отрицательно сказалось на эмиссии углекислого газа. Внесение опилок в дозах 1.0 и 2.5% не существенно повысило эмиссию углекислого газа. Выделение углекислого газа зависело от количества органического углерода почвы и древесных опилок. Об этом свидетельствовала динамика интенсивности эмиссии углекислого газа, которую фиксировали в течение полугода. По завершении модельного опыта почвенное дыхание вернулось к начальному уровню во всех экспериментальных вариантах, что показало прекращение стимулирования биологической активности почвы внесенными опилками, которые к этому времени полностью минерализовались.

Через 3 мес. после начала второго модельного опыта содержание органического углерода в варианте с внесением песка уменьшилось на 10% относительно контроля, что было связано с разбавляющим фактором внесения балластного мелиоранта без органического углерода (рис. 3). Среди исследованных вариантов древесные

опилки, внесенные в дозе 10% от массы почвы, имели наибольшую эффективность. Полугодовой срок их действия подтвердил, что внесение в почву песка снижало содержание органического углерода. Внесение песка производили в вольерах с крупными животными. Данную процедуру проводили с целью улучшения водно-физических свойств почв. С точки зрения биологической активности внесение песка приводило к отрицательному влиянию – снижению эмиссии углекислого газа и биохимических показателей, что свидетельствовало об ухудшении способности почвы к самоочищению. Использование песка также не рекомендовали по причине высокой теплопроводности. В летнее время под открытым небом это может доставлять дискомфорт животным из-за высокой температуры так же, как и в холодное время года из-за низкой. В качестве альтернативы рекомендовали древесные опилки. Их способность медленнее проводить тепло позволило поддерживать комфортную для животных температуру почвенного покрова в любое время года.

В третьем модельном опыте органические вещества (древесные опилки, солома, лиственный опад, хвоя, торф, лузга, уголь) больше стимулировали эмиссию углекислого газа по сравнению с минеральными адсорбентами (глауконитовым песком, диатомитом, вермикулитом, агроперлитом, цеолитом), которые способствовали снижению содержания органического углерода в почве (рис. 4). По завершении эксперимента органические мелиоранты не были обнаружены в почве. Причиной была их полная трансформация: часть углерода минерализовалась до углекислого газа.

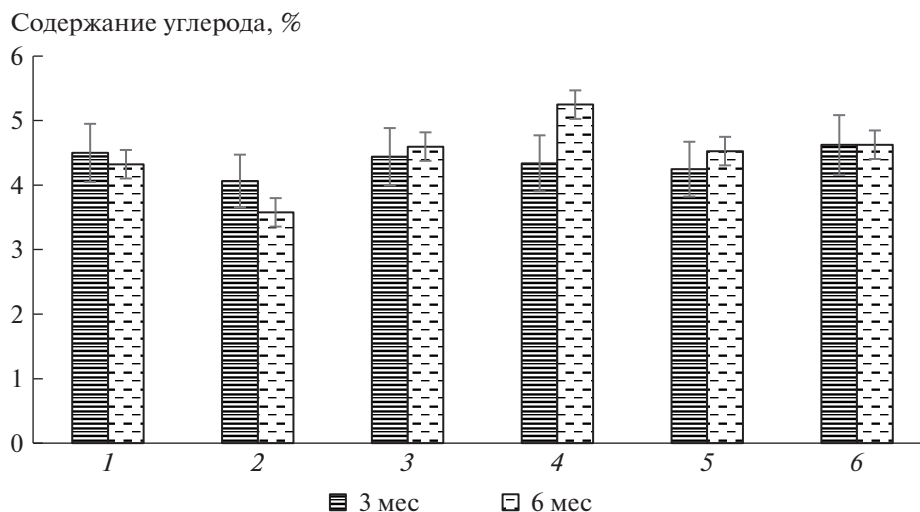


Рис. 3. Содержание органического углерода в почве, %: 1 – контроль, вольтер с буйволами Арни (*Bubalus bubalis arnee*), 2 – песок 10%, 3 – опилки 1%, 4 – опилки 2.5%, 5 – опилки 5%, 6 – опилки 10%.

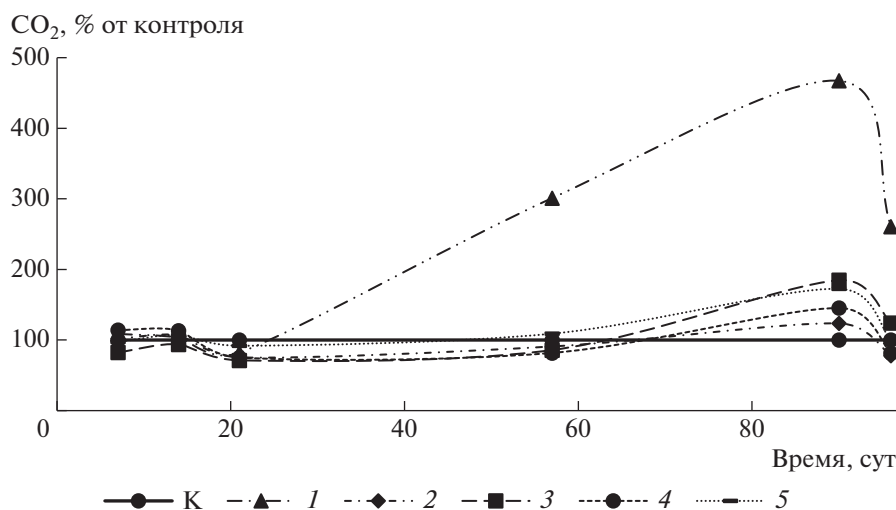


Рис. 4. Динамика эмиссии углекислого газа почвой при внесении различных групп веществ, %: 1 – органические вещества, 2 – неорганические вещества, 3 – биопрепараты, 4 – биоуголь, 5 – гидрогель.

Оценка действия различных групп веществ на способность почвы к биодеструкции и, в дальнейшем, как следствие, регуляции самоочищения позволяет из множества вариантов выбрать тот, который будет удовлетворять критериям доступности и качества. Применение веществ органической природы целесообразно в условиях зоопарка, т.к. в первую очередь является безопасным и для животных, и для посетителей. Кроме того, внесение углеродсодержащих веществ повышает микробиологическую активность, которая отвечает за биохимические процессы, связанные с дыханием почвы и балансом органического углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение серии модельных экспериментов позволило подобрать оптимальное по составу и действию мелиорирующее вещество, которое способствовало повышению биологической активности почв. В 2-х модельных экспериментах внесение древесных опилок в количестве 5 и 10% от массы почвы достоверно повлияло как на почвенное дыхание, так и на способность почв к самоочищению. В ходе 3-го модельного эксперимента было обнаружено, что органические вещества оказывали положительное влияние на эмиссию углекислого газа. Микробиологические препараты не повлияли на содержание общего уг-

лерода. Исключением было совместное действие биопрепаратов и органических веществ (опилок, соломы). Установлено, что внесение песка снижало содержание органического углерода. Результаты эмиссии углекислого газа показали, что мелиоранты органического происхождения обеспечивали почву дополнительным источником углерода, который повышал микробиологическую активность, улучшая тем самым самоочищение почв вольеров от загрязняющих их продуктов метаболизма животных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скуратова Л.С. Принципы архитектурно-пространственной организации зоологических парков в условиях Сибири // Архитектура и совр. информ. технол. 2011. № 3 (16). С. 14.
2. Кузнецов А.Ф., Демчук М.В., Карелин А.И. Гигиена сельскохозяйственных животных. М.: Агропромиздат, 1991. Кн. 1. Общая зоогигиена. 399 с.
3. Юркова Н.Е., Юрков А.М., Смагин А.В. Оценка функционального состояния почв Московского зоопарка по микробиологическим показателям // Вестн. МГУ. Сер. 17: Почвоведение. 2008. № 3. С. 39–44.
4. Юркова Н.Е., Юрков А.М., Смагин А.В. Экологическое состояние почвенных объектов Московского зоопарка // Почвоведение. 2009. № 3. С. 373–380.
5. Куприянова Ю.В., Любимов И.С., Копчик Г.Н. Биодеструкция органического вещества почв как важнейшее звено биогеохимического цикла углерода в лесных экосистемах Кольской Субарктики // Тр. Ферсмановской научн. сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 429–432.
6. Кудяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658.
7. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. М.: Высш. шк., 2005. 558 с.
8. Вальков В.Ф., Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Кузнецов Р.В. Плодородие почв и сельскохозяйственные растения: экологические аспекты. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 416 с.
9. Макаров О.А., Красильникова В.С., Кубарев Е.Н., Строков А.С., Абдулханова Д.Р. Опыт оценки деградации дерново-подзолистых почв при помощи микробиологических показателей (на примере агрохозяйства Калининградской области) // Агрохим. вестн. 2021. № 1. С. 13–18.
10. Наумова Н.Б. К вопросу об определении содержания органического углерода в почве // Почвы и окружающая среда. 2018. Т. 1. № 2. С. 98–103.
11. Белоусова Е.Н., Белоусов А.А. Влияние почвозащитных технологий на содержание подвижного органического вещества и ферментативную активность почвы // Агрохимия. 2022. № 5. С. 30–37.
12. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
13. Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Мясникова М.А., Колесников С.И. Влияние технологии No-Till на эколого-биологическое состояние почв. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2017. 174 с.
14. Иванов А.В., Браун М., Замолотчиков Д.Г., Лошаков С.Ю., Потоцкий О.В. Эмиссия углерода с поверхности валежа в кедровых лесах южного Приморья // Экология. 2018. № 4. С. 275–281.
15. Казеев К.Ш., Жадобин А.В., Колесников С.И. Экологическое состояние почв Ростовского зоопарка. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2021. 148 с.
16. Bukombe B., Fiene P., Hoyt A.M., Kidinda L.K., Doetterl S. Heterotrophic soil respiration and carbon cycling in geochemically distinct African tropical forest soils // Soil. 2021. V. 7. P. 639–659.
17. Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukke W.L., Groenigen J.W., Brussaard L. Soil quality – A critical review // Soil Biol. Biochem. 2018. V. 120. P. 105–125.
18. Raiesi F., Pejman M. Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index // Catena. 2021. V. 201. 105202.
19. Казеев К.Ш., Жадобин А.В., Лесина А.Л., Александров А.А., Бакаева Ю.С., Кравцова Н.Е., Колесников С.И. Экологическое состояние почв вольеров с животными и птицами Ростовского зоопарка // АгроЭкоИнфо. 2018. № 3 (33). С. 32.
20. Федоренко А.Н., Жадобин А.В., Казеев К.Ш., Гобарова А.А., Колесников С.И. Оценка содержания биогенных элементов в почвах зоопарка (Ростов-на-Дону) // Агрохим. вестн. 2020. № 5. С. 80–84.
21. Zhadobin A.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Influence of ameliorants on soil respiration of volleys of the Rostov Zoo // Ind. J. Ecol. 2020. V. 47 (4). P. 979–983.
22. Kazeev K., Zhadobin A., Gobarova A., Fedorenko A., Kolesnikov S. Assessment of ecological state of Rostov zoo soil // Euras. J. Soil Sci. 2021. V. 10 (2). P. 87–95.
23. Казеев К.Ш., Жадобин А.В., Колесников С.И. Экологическое состояние почв Ростовского зоопарка. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2021. 150 с.
24. Васбиева М.Т. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на динамику содержания органического углерода и азотный режим дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1365–1372.
25. Бабенко М.В., Васильев А.С., Дроздов И.А. Влияние различных фракций и доз свиного навоза на изменение содержания гумуса и его фракционно-групповой состав в дерново-подзолистой почве // Агрохим. вестн. 2020. № 1. С. 25–31.
26. Bezuglova O.S., Gorovtsov A.V., Demidov A., Polienko E.A., Zinchenko V.E., Grinko A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N. Effect of humic preparation on winter wheat productivity and rhizosphere microbial community under herbicide-induced stress // J. Soils Sediment. 2019. T. 19. № 6. С. 2665–2675.

27. Нестерова О.В., Семаль В.А., Бовсун М.А., Васнев И.И., Брикманс А.В., Карпенко Т.Ю., Сакара Н.А. Изменение свойств агропочв юга Дальнего Востока России при внесении биоугля // *Агрохим. вестн.* 2021. № 5. С. 18–23.
28. Нижелский М.Н., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние биологических препаратов на ферментативную активность чернозема обыкновенного после фумигации дымом от опилок // *Агрохим. вестн.* 2021. № 5. С. 28–33.
29. Jatav H.S., Rajput V.D., Minkina T., Gorovtsov A., Barakhov A., Sushkova S., Mandzieva S., Burachevskaya M., Singh S.K., Chejara S., Bauer T., Kalinitchenko V.P. Sustainable approach and safe use of biochar and its possible consequences // *Sustainability.* 2021. Т. 13. № 18. 10362.
30. Корсунова Ц.Д.-Ц., Чимитдоржиева Г.Д. Биологическая активность дефлированных каштановых почв байкальского региона при внесении компостов на основе древесной коры, опилок, соломы // *Агрохимия.* 2008. № 4. С. 15–19.
31. Галдина Т.Е., Самошин С.Е. Влияние нетрадиционных удобрений на выращивание посадочного материала в лесных питомниках // *Усп. совр. естествозн.* 2018. № 11. С. 24–29.
32. Долматов С.Н. Перспективы применения компоста из древесных опилок // *Аграрн. научн. журнал* 2016. № 3. С. 49–51.
33. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.

Effect of Various Meliorants on Respiration Intensity and Organic Carbon Content in the Soils of the Rostov Zoo

A. N. Fedorenko^a, A. A. Gobarova^a, and K.Sh. Kazeev^{a, #}

^aSouth Federal University

prosp. Stachek 194/1, Rostov-on-Don 344090, Russia

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

Organic substances (sawdust, straw, leaf litter, needles, peat, sunflower husk, charcoal), synthetic moisture regulator (Aquaterra hydrogel), mineral adsorbents and diluents (glauconite sand, diatomite, vermiculite) were used as reclamation agents to optimize the ecological state of the soils of the enclosures of the Rostov-on-Don Zoo, agropelrite, zeolite), biological products (Tamir, potassium humate, Baikal EM), as well as a combination of potassium humate and sawdust). The best results were obtained when applying sawdust in doses of 5 and 10% of the soil weight. At the same time, biological processes in the soil intensified, which increased its ability to self-purify from animal metabolic products. The introduced sawdust mineralized with a strong increase in carbon dioxide emissions. The content of organic carbon in the soil at the same time by the end of the experiment (after 6 months) practically did not change.

Key words: soil respiration, biological activity, land reclamation, ecological condition.

УДК 631.878.2

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ДЕСТРУКЦИЮ ПИЩЕВЫХ ОТХОДОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ[§]

© 2023 г. А. С. Баикин^{1,*}, Е. П. Севостьянова², Е. В. Гришина²,
М. А. Каплан¹, Е. О. Насакина¹, К. В. Сергиенко¹, С. В. Конушкин¹,
С. М. Севостьянов³, С. Е. Нефедова^{2,3}, Д. В. Демин^{2,3},
А. П. Глинушкин², М. А. Севостьянов^{1,2}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
119332 Москва, Ленинский просп., 49, Россия

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

³Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, комн. 325, Россия

*E-mail: baikinas@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2022 г.

После доработки 10.11.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Процесс деструкции твердых бытовых отходов происходит в основном под действием микрофлоры и приводит к потере массы за счет минерализации органического вещества, с отделением фильтрата и газов. Учитывая основные принципы действия ферментных препаратов, перспективным является создание условий для ферментации питательного раствора консорциумом микроорганизмов, например, существующих в почве. Другим перспективным направлением может быть стимуляция роста и развития аборигенной микрофлоры (микроорганизмов и грибов) за счет воздействия ПАВ и/или обеспечения предварительного гидролиза субстрата. Оценили влияние стимулирующих добавок-катализаторов на потерю массы образцов пищевых отходов и провели их сравнение. Эффект фиксировали в виде потери массы субстрата и уменьшения его объема. Были исследованы варианты катализаторов (медовая патока, белковый гидролизат, гидрофосфат калия), их сочетания, а также в качестве сравнения коммерческий препарат и вода. В анаэробных условиях показано, что потери за счет выделения газов были небольшими, при этом наибольшую эффективность показал вариант с коммерческим катализатором. В аэробных условиях при использовании в качестве катализатора сочетания патоки и щелочной среды показана более быстрая потеря массы, которая замедлялась к концу эксперимента. При этом дополнительное количество щелочи (2.8% от массы субстрата) оказало значительное влияние на субстрат за счет щелочного гидролиза компонентов, что сделало их более доступными для дальнейшей микробиологической деструкции.

Ключевые слова: деструкция пищевых отходов, ферментация, катализатор, гидролиз.

DOI: 10.31857/S0002188123020035, **EDN:** MRRZGK

ВВЕДЕНИЕ

Твердофазная ферментация — процесс, протекающий не в водной среде, а в массе измельченного влажного сырья [1, 2]. К настоящему времени твердофазная ферментация нашла применение в следующих процессах переработки отходов растительного сырья:

— получении ферментов,

— обогащении лигноцеллюлозного сырья белком одноклеточных организмов,

— силосовании,

— компостировании [3].

К достоинствам таких процессов следует отнести невысокие энергетические затраты, а также то, что твердофазная ферментация может функционировать как технология малого масштаба, ориентированная на местное сырье [4]. Но изготовление ферментных препаратов достаточно сложно, т.к. большинство из них катализирует какие-либо конкретные реакции в субстрате [5]. Ферменты образуются в любых живых клетках

[§]Работа выполнена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренного постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 №218 по теме “Высокотехнологичное производство грунтов методами инновационной переработки отходов” (Контракт № 075-11-2021-059 от «24» июня 2021 г., идентификатор государственного контракта 000000S407521QL90002).

организмов. В каждой клетке имеется набор различных ферментов, а их общее количество велико.

В мировой практике ферменты нашли широкое применение, особенно в фармацевтике, пищевой промышленности. Одним из перспективных направлений является применение ферментных препаратов для ликвидации нефтяных загрязнений и их использование для обработки органических отходов.

Большинство ферментов микроорганизмов индуцибельны, т.е. требуют для своего синтеза присутствия в среде индукторов. Часто индуктором является субстрат, на который действует данный фермент. Для синтеза ферментов, расщепляющих крахмал, в качестве питательной среды используют пшеничные отруби, соевую муку, для синтеза пектиназ — свекловичный жом, целлюлаз — солому, опилки, отруби, протеиназ — биошроты масляного сырья [6–20].

Для переработки отходов в России чаще используют биопрепараты с консорциумом микроорганизмов — продуцентов спектра ферментов. Такие препараты ускоряют созревание компоста в несколько раз по сравнению с любой технологией компостирования без микробиологической обработки органического вещества. При этом процесс ферментации управляем и сбалансирован. Существенно повышается теплоотдача компоста, в результате чего происходит его термическое обезвреживание — снижается жизнестойкость отдельных видов потенциально опасных микроорганизмов, семян сорняков, уничтожаются патогенные и потенциально опасные микроорганизмы человека и домашних животных, а также гельминты, многократно ускоряется их естественное отмирание. Обеззараживающие свойства биопрепаратов особенно важны для быстрого обезвреживания биологически опасных отходов, таких как навоз, помет.

Однако применение консорциумов микроорганизмов не всегда эффективно, что связано с разницей оптимумов для различных микроорганизмов, участвующих в деструкции различных компонентов органических отходов [21, 22].

Ферментные препараты американского производства класса оксидаз (Perma-zyme, AG-zyme и HC-zyme (Оксизин)) выпускает единственный в мире завод, находящийся в Лас-Вегасе, штат Невада. Биопрепарат Оксизин — это комплексная органическая композиция, полученная путем ферментации патоки сахарной свеклы, не содержит бактерий, алкоголя, вредных или генетически модифицированных веществ.

Оксизин имеет в составе специальные добавки для улучшения роста бактерий в субстрате, в который его вносят. Препарат разлагает органические соединения и нарушает процесс притяжения загрязнений к поверхностям путем нейтрализации внутренних электростатических сил. Будучи произведенным из натурального сырья, препарат совершенно безопасен для человека и окружающей среды.

Препарат EcoCatalyst™ — биоорганический катализатор (**БОК**) специально разработан для устранения жиров, масел и смазок (**ЖМС**), которые закупоривают трубы, канализацию, коллекторы и септические системы. Регулярное использование этой композиции позволяет содержать канализацию, жиросъемники, мусородробилки, сборные колодцы, насосные станции и септические системы без засоров и без запаха. Препарат не может быть классифицирован как бактерии, ферменты, полимеры, или в качестве традиционной химии, скорее автор изобретения создал свою собственную уникальную категорию продукта для промышленности по очистке сточных вод. БОК состоит из ферментационной надосадочной жидкости, полученной из растений и минералов, которые были смешаны синергически в комбинации с неионогенным поверхностно-активным веществом, чтобы создать биоорганический катализатор широкого спектра. В отличие от обычных ПАВ, которые могут ограничить перенос кислорода, БОК самоорганизовывается и создает свободные микропузырьки, имеющие очень высокий уровень передачи кислорода. Таким образом, есть примеры успешных ферментных препаратов для переработки органических отходов, однако их спектр невелик, и их состав и схема производства являются коммерческой тайной.

Учитывая основные принципы действия ферментных препаратов, перспективным является создание условий для ферментации питательного раствора консорциумом микроорганизмов, например, существующих в почве. Другим перспективным направлением может быть стимуляция роста и развития аборигенной микрофлоры (микроорганизмов и грибов) за счет воздействия ПАВ и/или обеспечения предварительного гидролиза субстрата.

Цель работы — оценка влияния стимулирующих добавок-катализаторов на потерю массы образцов пищевых отходов и их сравнение. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: 1 — разработать состав субстрата пищевых отходов для объективного сравнения в опыте, 2 — подготовить катализаторы для внесения, 3 — оценить действие катализаторов в анаэ-

Таблица 1. Состав субстрата для исследования

Масса компонентов, г										
масса тары	картофель	яблоки	опилки	кефир	хлеб черный	яйца	картон	скорлупа яиц	масло подсолнечное	творог
37	400	70	10	80	40	35	8	20	10	30

робных условиях по количеству выделенного CO_2 , 4 — по величине потери массы образца оценить действие катализаторов за процессы отделения фильтрата и минерализации субстрата.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс деструкции твердых бытовых отходов происходит в основном под действием микрофлоры и приводит к потере массы за счет минерализации органического вещества, с отделением фильтрата и газов. Эффект может быть зафиксирован в виде потери массы субстрата и уменьшении его объема. Можно оценивать качественный и количественный состав газов, объем фильтрата, наличие (многообразие и количество) микроорганизмов.

Для проведения опытов были предложены пробные варианты биокатализаторов: медовая патока (3 ложки меда + 3 ложки сахара + 1 ложка воды, кипятить 5–7 мин); белковый гидролизат (50 г отмытых червей + 500 мл 0.1%-ного раствора NaOH pH 6.6; соль ($\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$, 10 г в 100 мл H_2O , pH 9.4). С их использованием в работе изучены варианты катализаторов под номерами 2–5, а также 2 варианта контроля (вода — вариант 1 и уже применяемый коммерческий биокатализатор — вариант 6):

1 — контроль — вода, использованная для приготовления растворов;

2 — раствор патоки + раствор $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ (1:1) (pH 9.15);

3 — раствор патоки 50 мл + гидролизат 3.0 мл + 1.5 мл раствора соли (pH 6.4);

4 — раствор гидролизата (pH 6.6);

5 — раствор патоки;

6 — биокатализатор Bio-organic catalyst (Eccomate) 0.03 мл + 10 мл воды.

Катализаторы вносили в количестве 10 мл на 1 сосуд субстрата. Состав субстрата и его исходная масса представлены в табл. 1. Влажность картофеля — 72, яблок — 52.2%.

Компоненты субстрата измельчали с использованием ломтерезки WestMark для получения равномерных фракций компонентов (картофель, яблоки, хлеб, вареные яйца). Полученные компоненты засыпали в сосуды — пластиковые бутылки объемом 1.5 дм³. Вносили растворы катализаторов и перемешивали встряхиванием.

Опыт состоял из 2-х фаз: 1 — анаэробные условия, 2 — аэробные условия. В 1-й фазе сосуды с обработанными субстратами закрывали пробками с закрепленными резиновыми трубками, которые присоединили к дефлегматору, заполненному 15 мл 1 н. NaOH для фиксации CO_2 . С дефлегматора трубкой присоединяли к колбозатвору с 1 н. NaOH для предотвращения контакта раствора в дефлегматоре с атмосферным воздухом. Таким образом, газы, выделявшиеся из субстратов, проходили через раствор в дефлегматоре и через затвор в атмосферу. Повторность в опыте пятикратная.

Для оценки эффекта стимуляции катализаторами процессов разложения в анаэробных условиях фиксировали выход CO_2 : 1 раз в сутки проводили отбор растворов щелочи из дефлегматоров для последующей оценки содержания CO_2 титрованием 1 н. HCl в присутствии индикатора фенолфталеина. Взвешивание сосудов для оценки потери веса проводили на весах Ohaus серии Scout Pro, 6000 г, точность ± 1 г.

Во 2-й фазе после взвешивания сосудов, через 13 сут от начала опыта в сосудах были сделаны дренажные отверстия для слива фильтрата. Вместо пробок горлышки были закрыты парафиновой лентой и проделаны отверстия размером 3 мм для воздухообмена. Фиксировали изменение веса сосудов и внешний вид образца.

В процессе эксперимента фиксировали температуру внешней среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первая анаэробная фаза опыта. С самого начала эксперимента наблюдали интенсивное выделение газов, которое зафиксировали через актив-

Таблица 2. Потери массы субстрата в 1-й анаэробной фазе опыта

Вариант	Масса образцов (вместе с сосудами), г				Потери массы от исходной, г
	исходная	8 сут	14 сут	контрольное измерение	
1	736	735	729	728	8
2	730	725	724	723	7
3	733	730	728	728	5
4	736	732	729	728	8
5	738	750*	742	741	—*
6	736	729	727	727	9

*В данный образец щелочь из дефлегматора (20 мл за 2-е сут) была затянута в сосуд, что изменило массу субстрата в варианте 5 и не позволило объективно сравнить его с другими вариантами.

Таблица 3. Потери массы образцов во 2-й аэробной фазе опыта

Вариант	Масса образцов, г					Потери массы от исходной	
	исходная	13 сут (окончание анаэробной фазы)	14 сут	19 сут	21 сут	г	%
1	699	691 (–1.1%)	640	578	573	126	18.0
2	693	686 (–1.0%)	636	557	553	140	20.2
3	696	691 (–0.7%)	657	559	554	142	20.4
4	698	690 (1.1%)	676	646	640	58	8.3
5	701	712	607	532	520	181	25.8
6	699	690 (–1.3%)	668	569	553	146	20.9

Примечание. В скобках – потери массы от исходной в течение анаэробной фазы, %.

ное прохождение газов через раствор щелочи в дефлегматорах и затворах. Результаты потери массы субстратом в анаэробных условиях представлены в табл. 2.

Таким образом, потеря массы за счет выделения газов при разложении органического вещества субстрата в вариантах выстроена в ряд по мере убывания: $6 > 1 = 4 > 2 > 3$. Коммерческий препарат в анаэробных условиях показал максимальное уменьшение массы субстрата за счет дыхания. Далее с минимальным отставанием следовали контроль (без добавок) и вариант с раствором гидролизата. Замыкал ряд вариант 3 (раствор патоки 50 мл + гидролизат 3 мл + 1.5 мл раствора соли). При этом произошло обильное отделение фильтрата в нижнюю часть сосудов.

Вторая аэробная фаза опыта. Через 13 сут в сосудах были сделаны дренажные отверстия для слива фильтрата. Вместо пробок горлышки были закрыты парафиновой лентой и проделаны отверстия размером 3 мм для воздухообмена. Произошло интенсивное отделение фильтрата

(табл. 3). Исключение составил вариант 4 (с гидролизатом), который продолжал удерживать воду.

Таким образом, за первые 2 недели в анаэробных условиях потери массы субстрата за счет выделения газов были небольшими, при этом первую тройку составили варианты с коммерческим катализатором, контроль и гидролизатом червей. Во всех вариантах образовался фильтрат, скопившийся в нижней части сосудов.

Перевод в режим слива фильтрата и слабого доступа воздуха сверху показал, что в течение 1 сут масса субстрата заметно уменьшилась. Учитывая, что выделение газов было незначительным, потеря массы субстрата произошла за счет потерь с фильтратом, но скорость его отделения была разной из-за различной вязкости, часть фильтратов выглядела как слизь, в первую очередь в варианте с гидролизатом.

Наибольший интерес представляли результаты, полученные после 21 сут опыта. В варианте с коммерческим катализатором уменьшение массы

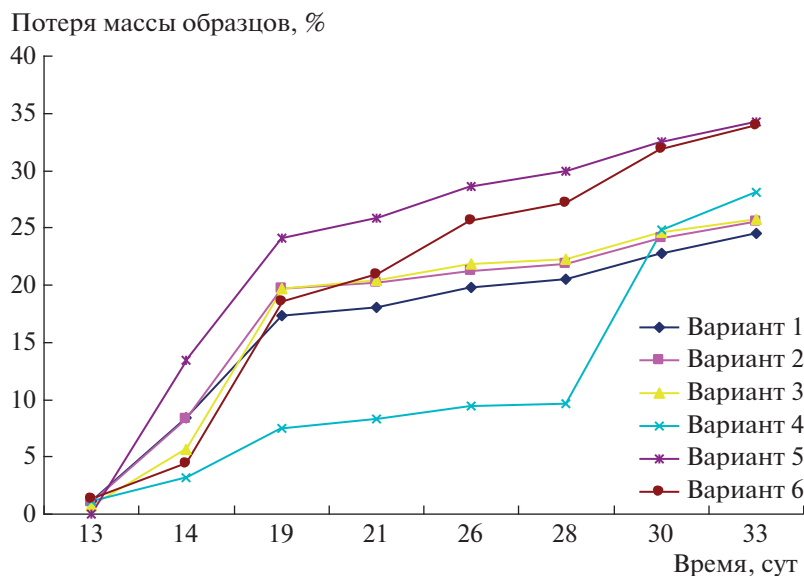


Рис. 1. Потеря массы образцов во 2-й аэробной фазе опыта, %.

субстрата было близким с вариантами 2 и 3. Отличие вариантов составило $\approx 0.5\%$.

Максимальное уменьшение массы тестируемого субстрата (на 25%) было отмечено в варианте с патокой, в котором в сосуд с субстратом затыкнуло щелочь из дефлегматора. В этом случае явно оказал влияние щелочной гидролиз массы субстрата.

Дополнительным эффектом было зарастание верхней части субстрата плесенью в течение 5-ти сут. В зависимости от количества появившейся плесени построили следующий ряд вариантов: $6 > 3 > 5 > 2 > 4 = 1$, где в вариантах 6 и 3 — обильно, 5 и 2 — местами росла плесень, а в вариантах 4 и 1 плесени практически не было.

Сходство зарастания в варианте 6 с катализатором и в варианте 3 с раствором патоки с добавками, а также схожие результаты потери массы субстрата в этих вариантах позволили предположить, что в дальнейшем необходимо провести опыты с подбором оптимальной концентрации патоки в растворах и в условиях изначального отведения фильтратов и доступом воздуха. Вариант катализатора на основе гидролизата червей для дальнейшего исследования следует оптимизировать. Также необходимо провести проверку действия ферментированной патоки.

Спустя 28 сут образцы в сосудах встряхнули и насколько возможно перемешали. После этого возобновилось отделение фильтрата и потеря массы субстрата.

Потеря массы в образцах после встряхивания увеличилась, при этом в варианте 5 осталась

прежней, в варианте с биокатализатором возросла почти в 2 раза, в варианте 4 произошло отделение фильтрата от массы субстрата, и он сравнялся с вариантами 2 и 3. Контроль замыкал этот ряд (рис. 1, табл. 3). Получился ряд вариантов в зависимости от величины потери массы субстрата: $5 = 6 > 4 > 3 = 2 > 1$. Таким образом, скорость потери массы субстрата снова замедлилась, за исключением варианта 4.

ВЫВОДЫ

1. В первые 2 недели опыта в анаэробных условиях потери биомассы субстрата за счет выделения газов были небольшими, при этом первую тройку составляли варианты с катализаторами на основе коммерческого препарата, контроль и гидролизата червей. Во всех вариантах образовался фильтрат, скопившийся в нижней части сосудов.

2. Перевод сосудов в режим слива фильтрата и слабого доступа воздуха сверху показал, что в течение 1 сут масса субстратов заметно уменьшилась. Учитывая, что выделение газов было незначительным, потеря массы произошла за счет потерь с фильтратом, но скорость отделения была разной из-за различной вязкости, часть фильтрата выглядела как слизь, в первую очередь в варианте с гидролизатом.

3. Отмечено зарастание верхней части субстратов плесенью (грибами) в течение 5-ти сут после перевода сосудов в условно аэробный режим (отток фильтрата, слабая вентиляция сверху). В зависимости от количества появившейся плесени

построили следующий ряд вариантов: $6 > 3 > 5 > 2 > 4 = 1$, где в вариантах 6 и 3 – обильно, 5 и 2 – местами росла плесень, а в вариантах 4 и 1 плесени практически не было.

4. В варианте 5 (раствор патоки + щелочь) и варианте 6 (коммерческий препарат) на 28-е сут (через 4 нед) отмечены максимальные потери массы субстрата за счет образования фильтрата и минерализации (29.9 и 27.2% соответственно). При этом заметно уменьшился объем субстрата, компоненты приобрели выраженный бурый цвет, т.е. фиксировали начало процесса гумификации. Скорость потери массы уменьшилась, что было связано, по-видимому, с уменьшением влажности субстрата.

5. Показано, что в варианте 5 дополнительное количество щелочи (2.8% от массы субстрата) оказало значительное влияние на субстрат за счет щелочного гидролиза компонентов, что сделало их более доступными для дальнейшей микробиологической деструкции.

6. Коммерческий катализатор – Bio-organic catalyst (Ессомате), внесенный в расчетной концентрации, оказывал стабильное и постоянное действие на субстрат за счет заявленных, но не раскрытых компонентов (ферментов и ПАВ).

7. После 28 сут образцы встряхнули (перемешали), после чего процесс деструкции субстрата интенсифицировался, особенно в варианте 4 с гидролизатом, где началось отделение фильтрата. В этом варианте был использован раствор с неполным гидролизом, что, видимо, привело к удержанию жидкости в субстрате (повысилась вязкость раствора), а также некоторому бактерицидному эффекту по отношению к грибам. Процесс деструкции субстрата за счет этого замедлился. На 33-и сут вариант 5 (раствор патоки + щелочь) и вариант 6 (коммерческий препарат) по потере массы субстрата сравнялись.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Couto S.R., Sanromán M.Á. Application of solid-state fermentation to food industry: A review // J. Food Eng. 2006. V. 76 (3). P. 291–302.
2. Manan M.A., Webb C. Modern microbial solid state fermentation technology for future biorefineries for the production of added-value products // Biofuel Res. J. 2017. V. 16. P. 730–740.
3. Ghosh J.S. Solid state fermentation and food processing: a short review // J. Nutr. Food Sci. 2016. V. 6 (1). P. 1–7.
4. Al-Wahaibi, Osman A.I., Al-Muhtaseb A.H., Alqaisi O., Baawain M., Fawzy S., Rooney D.W. Techno-economic evaluation of biogas production from food waste via anaerobic digestion // Sci. Rep. 2020. V. 10 (1). P. 15719.
5. Mitchell D.A., Berovic M., Krieger N. Biochemical engineering aspects of solid state bioprocessing new products and new areas of bioprocess engineering. Advances in biochemical // Engineering/Biotechnology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. V. 68.
6. Lizardi-Jimenez M.A., Hernandez-Martinez R. Solid state fermentation (SSF): diversity of applications to valorize waste and biomass // 3 Biotech. 2017. V. 7 (1). P. 44.
7. Yazid N.A., Barrena R., Komilis, Sánchez A. Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: a review // Sustainability. 2017. V. 9 (2). P. 1–28.
8. Balkan B., Ertan F. Production of α -amylase from *Penicillium chrysogenum* under solid-state fermentation by using some agricultural by-products // Food Technol. Biotechnol. 2007. V. 45 (4). P. 439–442.
9. Awan M.S., Jalal F., Ayub N., Akhtar M.W., Rajoka M.I. Production and characterization of α -galactosidase by a multiple mutant of *Aspergillus niger* in solid-state fermentation // Food Technol. Biotechnol. 2009. V. 47 (4). P. 370–380.
10. de Oliveira R.L., da Silva M.F., Converti A., Porto T.S. Production of β -fructofuranosidase with transfructosylating activity by *Aspergillus tamarii* URM4634 solid-state fermentation on agroindustrial by-products // Inter. J. Biol. Macromol. 2020. V. 144. P. 343–350.
11. Liu J., Yang J. Cellulase production by *Trichoderma koningii* AS3.4262 in solid-state fermentation using lignocellulosic waste from the vinegar industry // Food Technol. Biotechnol. 2007. V. 45 (4). P. 420–425.
12. Bhatti H.N., Rashid M.H., Nawaz R., Asgher M., Perveen R., Jabbar A. Optimization of media for enhanced glucoamylase production in solid-state fermentation by *Fusarium solani* // Food Technol. Biotechnol. 2007. V. 45 (1). P. 5156.
13. Singh R.S., Chauhan K., Singh J., Pandey A., Larroche C. Solid-state fermentation of carrot pomace for the production of inulinase by *Penicillium oxalicum* BGPUP-4 // Food Technol. Biotechnol. 2018. V. 56 (1). P. 31–39.
14. Falony G., Armas J.C., Mendoza J.C.D., Hernández J.L.M. Production of extracellular lipase from *Aspergillus niger* by solid-state fermentation // Food Technol. Biotechnol. 2006. V. 44 (2). P. 235–240.
15. Silva D., da Silva Martins E., da Silva R., Gomes E. Pectinase production by *Penicillium viridicatum* RFC3 by solid state fermentation using agricultural wastes and agro-industrial by-products // Braz. J. Microbiol. 2002. V. 33 (4). P. 318–324.
16. Joshi V.K., Parmar M., Rana N.S. Pectin esterase production from apple pomace in solid-state and submerged fermentations // Food Technol. Biotechnol. 2006. V. 44 (2). P. 253–256.
17. Mussatto S., Ballesteros L.F., Martins S., Teixeira J.A. Use of agro-industrial wastes in solid-state fermentation processes / Eds. Show K.-Y., Guo X. Industrial Waste, IntechOpen, 2012. 274 p.
18. Vijayaraghavan P., Vincent S.G.P., Arasu M.V., Al-Dhabi N.A. Bioconversion of agro-industrial wastes for the production of fibrinolytic enzyme from *Bacillus hal-*

- odurans* IND18: purification and biochemical characterization // Electron. J. Biotechnol. 2016. V. 20. P. 1–8.
19. Sharma G., Gupta V., Khan M., Balda S., Gupta N., Capalash N., Sharma P. Flavonoid-rich agro-industrial residues for enhanced bacterial laccase production by submerged and solid-state fermentation // 3 Biotech. 2017. V. 7 (3). P. 200.
 20. Namasivayam E., Ravindar J.D., Mariappan K., Jiji A., Kumar M., Jayaraj R.L. Production of extracellular pectinase by *Bacillus cereus* isolated from market solid waste // J. Bioanal. Biomed. 2011. V. 3 (3). P. 7075.
 21. Pandey A. Solid-state fermentation // Biochem. Engin. J. 2003. V. 13. Iss. 2–3. P. 81–84.
[https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00121-3)
 22. Singhanian R.R., Patel A.K., Soccol C.R., Pandey A. Recent advances in solid-state fermentation // Biochem. Engin. J. 2009. V. 44 (1). P. 13–18.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.019>

Assessment of the Effect of Various Catalysts on the Destruction of Food Waste during Their Processing

**A. S. Baikin^{a, #}, E. P. Sevostyanova^b, E. V. Grishina^b, M. A. Kaplan^a,
E. O. Nasakina^a, K. V. Sergienko^a, S. V. Konushkin^a, C. M. Sevostyanov^c,
S. E. Nefedova^{b, c}, D. V. Demin^{b, c}, A. P. Glinushkin^b, and M. A. Sevostyanov^{a, b}**

^a*A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS
Leninskiy prosp. 49, Moscow 119334, Russia*

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

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

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

The process of destruction of solid household waste occurs mainly under the action of microflora and leads to mass loss due to mineralization of organic matter, with separation of filtrate and gases. Considering the basic principles of the action of enzyme preparations, it is promising to create conditions for fermentation of the nutrient solution by a consortium of microorganisms, for example, existing in the soil. Another promising direction may be to stimulate the growth and development of native microflora (microorganisms and fungi) due to the effects of surfactants and/or providing preliminary hydrolysis of the substrate. The effect of stimulating catalyst additives on the weight loss of food waste samples was evaluated and compared. The effect was recorded in the form of a loss of substrate mass and a decrease in its volume. Variants of catalysts (honey syrup, protein hydrolysate, potassium hydrophosphate), their combinations, as well as a commercial drug and water as a comparison were investigated. Under anaerobic conditions, it was shown that the losses due to the release of gases were small, while the option with a commercial catalyst showed the greatest efficiency. Under aerobic conditions, when using a combination of molasses and an alkaline medium as a catalyst, a faster mass loss was shown, which slowed down by the end of the experiment. At the same time, an additional amount of alkali (2.8% of the substrate weight) had a significant effect on the substrate due to the alkaline hydrolysis of the components, which made them more accessible for further microbiological destruction.

Key words: destruction of food waste, fermentation, catalyst, hydrolysis.

УДК 635.21:632.935.49

РАДИАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СЕМЕННОГО КАРТОФЕЛЯ КАК МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ РИЗОКТОНИОЗА НА КЛУБНЯХ НОВОГО УРОЖАЯ[§]

© 2023 г. Н. С. Чуликова^{1,*}, А. А. Малюга¹, У. А. Близняк^{2,3,**},
П. Ю. Борщеговская^{2,3}, С. А. Золотов², Я. В. Зубрицкая², В. С. Ипатова³,
А. П. Черняев^{2,3}, И. А. Родин^{4,5}

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН
630501 Краснообск, Новосибирский р-н, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 3, Россия

⁵Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет),
кафедра эпидемиологии и доказательной медицины
119435 Москва, ул. Б. Пироговская, 2, стр. 2, Россия

*E-mail: natalya-chulikova@yandex.ru

**E-mail: uabliznyuk@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.

После доработки 06.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Изучили влияние предпосадочной обработки ионизирующим излучением семенного картофеля, клубни которого были заражены грибом *Rhizoctonia solani* Kühn, на развитие и урожайность культуры. Двухлетний мониторинг показал, что обработка семенного материала в дозах 20–25 Гр эффективно снижала распространенность форм ризоктониоза на клубнях нового урожая. Поверхностный характер облучения низкоэнергетичными ускоренными электронами, использованными в эксперименте, позволил воздействовать исключительно на пораженные грибом верхние слои клубней картофеля, что делало этот способ обработки наиболее предпочтительным.

Ключевые слова: радиационная обработка, ускоренные электроны, склеротии *Rhizoctonia solani* Kühn, фенология картофеля, фракционный состав, урожайность культуры.

DOI: 10.31857/S0002188123020072, **EDN:** MSHQZY

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается снижение качества и количества производимой сельхозпродукции, в первую очередь связанное с поражением культур инфекционными заболеваниями: грибковыми, вирусными и бактериальными [1]. Одними из наиболее распространенных видов грибковых болезней сельскохозяйственных культур являются фомоз, фузариоз и ризоктониоз [2–6].

Ризоктониоз поражает картофель в широком диапазоне температур и влажности почвы, при этом источником инфекции служат больные рас-

тения картофеля и некоторые сорные растения. Главными факторами передачи возбудителя являются почва и больные клубни картофеля. Например, численность возбудителя в пахотных почвах Сибири меняется от 0 до 20 пропагул/100 г воздушно-сухой почвы, при этом более инфицированы почвы после посадок картофеля. Частота передачи возбудителя через зараженные клубни составляет от 29 до 70%, при этом вероятность передачи возбудителя воздушно-капельным путем возрастает при влажности воздуха >86% [7]. Ежегодные мировые потери картофеля от этого заболевания изменяются в диапазоне от 7 до 36%, а в Западной Сибири ежегодно теряется >50% продукции [8–10].

[§]Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-63-00075.

Таблица 1. Параметры облучения клубней (время облучения, ток пучка, величина заряда, поглощенного пластиной, и величины доз, поглощенных образцами)

Сеанс, №	Суммарное время облучения с 2-х сторон, с	Ток пучка, мкА	Заряд на пластине, нКл	Поглощенная доза, Гр
1	32 ± 1	0.10 ± 0.01	2070 ± 40/2070 ± 40	20.0 ± 0.4
2	50 ± 1	0.10 ± 0.01	4120 ± 70/4080 ± 70	40 ± 1
3	100 ± 1	0.10 ± 0.01	10200 ± 200/10200 ± 200	100 ± 2
4	150 ± 1	0.10 ± 0.01	15400 ± 300/15200 ± 300	150 ± 3
5	200 ± 1	0.10 ± 0.01	20300 ± 400/20400 ± 400	200 ± 4
6	230 ± 1	1.90 ± 0.01	50900 ± 1000/50900 ± 1000	500 ± 10
7	210 ± 1	4.80 ± 0.01	101800 ± 2000/101800 ± 2000	1000 ± 20
8	422 ± 1	4.80 ± 0.01	203300 ± 4000/203300 ± 4000	2000 ± 40
9	632 ± 1	4.80 ± 0.01	305300 ± 6000/305300 ± 6000	3000 ± 60

С целью повышения качества и обеспечения безопасности продукции в мире наблюдается растущий интерес к использованию ядерных технологий. Данный метод позволяет решать следующий ряд актуальных задач: сокращение использования химических удобрений с целью контроля безопасности почвы и пищевой продукции, борьба с насекомыми-вредителями, различными грибковыми и вирусными возбудителями, опасными для жизни человека и животных, продление сроков хранения продукции, задержка или стимуляция прорастания и многое другое [11–15].

В качестве источников ионизирующего излучения для радиационной обработки сельскохозяйственных культур разрешено применение тормозного излучения с энергией до 5 МэВ, генерируемого с помощью ускорителей электронов, и гамма-излучения от радиоактивных изотопов ^{137}Cs и ^{60}Co , а также ускоренных электронов с энергией до 10 МэВ, генерируемое ускорителями. Выбор источника излучения зависит от категории обрабатываемой продукции и цели обработки [16]. Вследствие небольшой проникающей способности низкоэнергетичных электронов в литературе обсуждается возможность применения данного типа излучения для проведения поверхностной обработки биоматериалов без воздействия на их внутренние структуры [17].

Цель работы — исследование влияния ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на продуктивность и фенологию картофеля, зараженного *Rhizoctonia solani*.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Двухгодичное исследование влияния ускоренных электронов на продуктивность и фитосани-

тарное состояние урожая проводили на клубнях семенного картофеля сорта Лина с естественным заражением грибом *Rhizoctonia solani* Kühn (*R. solani*). Средний диаметр клубней составлял (4 ± 1) см, глубина залегания склероциев гриба — ≈ 2 мм.

В первый год исследования клубни в количестве 80 шт. подвергали воздействию излучения в дозах 20, 40, 100, 150, 200, 500, 1000, 2000 и 3000 Гр. Во 2-й год 192 клубня облучали в 5-ти дозах: 20, 40, 100, 150 и 200 Гр. Облучение образцов проводили на линейном ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 (ЦКП УНО, НИИЯФ МГУ, Россия) с максимальной энергией 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт.

При облучении образцы в количестве 8 шт. выкладывали на дюралюминиевую пластину с размерами 35×5 см на расстоянии 12 см от выхода пучка электронов. Проводили двухстороннее облучение картофеля с целью равномерного распределения дозы по поверхности клубней. Контрольные образцы находились в тех же условиях, что и подвергшиеся обработке. В табл. 1 представлены данные облучения, которые фиксировали в каждом сеансе облучения.

Распределение дозы, поглощенной клубнями, рассчитывали с помощью компьютерного моделирования с использованием инструментария GEANT 4 (ЦЕРН, Швейцария), основанного на методе Монте-Карло [18].

Клубни моделировали водным шаром диаметром 4 см, облучаемым с 2-х противоположных сторон электронами с энергией 1 МэВ. Для расчета распределения дозы по объему водного шара пространство вокруг шара, представляющее собой куб с ребром 4 см, разбивали на $40 \times 40 \times 40$ кубических ячеек с ребром 1 мм, для каждой из которых подсчитывали суммарную полученную во взаи-

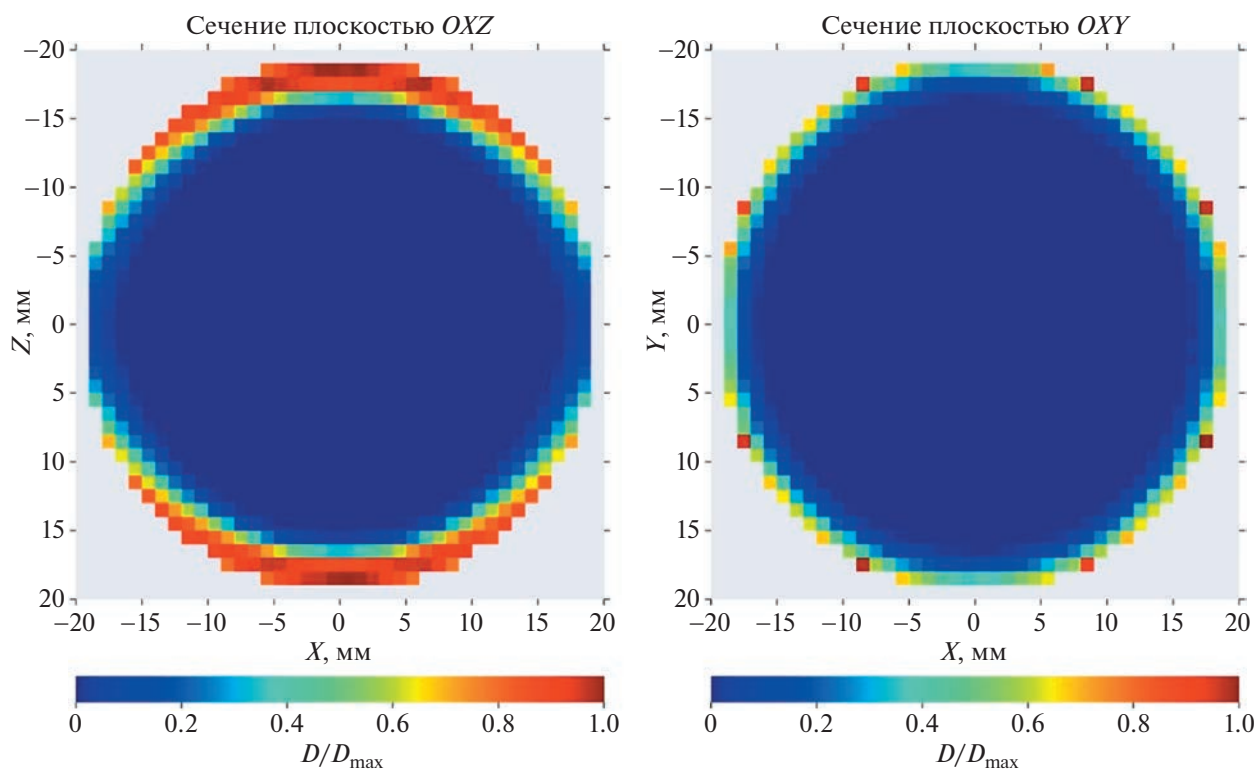


Рис. 1. Карта распределения относительной поглощенной дозы в центральных параллельном (OXZ) и перпендикулярном (OXY) первоначальному направлению электронов срезах шара из воды диаметром 4 см при двустороннем облучении пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ.

модействиях энергию ΔE_i . Дозу, поглощенную каждой ячейкой, определяли по формуле:

$$D_i = \frac{E_i}{m_i}, \text{ где } \Delta m_i - \text{масса ячейки.}$$

По результатам расчетов проводили картирование дозы, отнесенной к максимальной величине дозы в срезе шара толщиной 1 мм в плоскостях, перпендикулярной и параллельнойначальному направлению электронов в пучке. Как видно на рис. 1, вся доза поглотилась в поверхностных слоях водного шара, залегающих на глубине, не более чем 3 мм от поверхности шара. Таким образом, при облучении были затронуты только поверхностные слои картофеля, зараженные фитопатогеном, при этом внутренние слои облучены не были.

В ходе исследования проводили фенологические наблюдения за растениями картофеля, распространенностью форм ризоктониоза и продуктивностью культуры после предпосадочной обработки клубней низкоэнергетичными электронами.

Полевые исследования проводили в почвенно-климатических условиях, типичных для лесостепной зоны Западной Сибири. Почвенный покров опытного поля был представлен типичным для зоны выщелоченным среднесуглинистым

черноземом с агрохимической характеристикой пахотного слоя почвы (0–30 см): гумус (по Тюрину) – $\approx 5\%$, содержание общего азота (по Кьельдалю) – 0.34 мг/100 г почвы, фосфора и калия (по Чирикову) – 29.0 и 13.0 мг/100 г почвы соответственно, рН 6.7–6.8.

Посадку картофеля осуществляли 05.06.2020 г. и 24.05.2021 г. Опытные исследования проводили на одном и том же участке с естественным фоном заселения почвы ризоктониозом, количество ризоктониоза в почве перед посадкой составляло 20 пропагул/100 г воздушно-сухой почвы. Распространенность ризоктониоза на посадочных клубнях составляла 100%. При посадке культуры повторность опыта была двукратной, густота посадки клубней – 35.7 тыс. клубней/га, площадь питания картофеля – 0.35×0.7 м. Удобрения в исследовании не применяли.

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью пакета прикладных программ SNEDECOR (Сорокин, Россия), основанного на использовании стандартных методов математической обработки [19].

Период вегетации в 2020 и в 2021 гг. по температурному режиму был близок к среднегодовым показателям (табл. 2). Осадки в данных веге-

Таблица 2. Метеорологические показатели вегетационных периодов 2020 г. и 2021 г. (ГМС “Огурцово” Новосибирского р-н, Новосибирская обл.)

Месяц	Декада	Температура воздуха, °С			Осадки, сумма, мм		
		2020 г.	2021 г.	Средне многолетняя норма	2020 г.	2021 г.	Средне многолетняя норма
Май	1-я	11.7	16.6	7.7	21.0	10	11.0
	2-я	19.7	14.8	10.0	1.4	13.3	12.0
	3-я	15.2	16.4	13.2	32.0	8.5	13.0
	Средние	16.5	15.9	10.3	54.0	31.8	36.0
Июнь	1-я	13.9	16.6	15.4	16.0	21.9	13.0
	2-я	16.2	17.3	16.7	7.8	2.3	20.0
	3-я	19.7	14.6	18.1	0.0	48.9	25.0
	Средние	16.6	16.2	16.7	24.0	73.1	58.0
Июль	1-я	21.2	20.4	19.1	32.0	18.0	19.0
	2-я	21.2	18.8	18.9	8.9	4.1	26.0
	3-я	17.0	20.0	18.9	44.0	0.3	27.0
	Средние	19.6	19.7	19.0	85.0	22.4	72.0
Август	1-я	21.5	19.7	17.9	14.0	25.1	24.0
	2-я	18.9	16.8	16.0	43	36.8	20.0
	3-я	16.0	17.6	13.5	25	5.4	22.0
	Средние	18.6	18.0	15.8	82	67.3	66.0

тационных сезонах распределялись крайне неравномерно.

Май 2020 г. особенно выделялся по температуре и режиму увлажнения. Температура воздуха в этом месяце превышала средние показатели, тогда как количество осадков в начале месяца было больше, в конце — существенно меньше средне многолетней нормы. Тем не менее, количество выпавших осадков превысило норму для данного региона в 1.5 раза. В 2021 г. температура воздуха также была выше средне многолетней. В 3-й декаде мая увлажнение было недостаточным, осадков выпало в 2 раза меньше в сравнении со средне многолетними показателями.

В июне 2020 г. и 2021 г. температура не показывала существенных отклонений от средне многолетних показателей. В 2020 г. приход атмосферной влаги был ниже нормы более чем в 2 раза, в 2021 г. был выше нормы в 1.2 раза. Но при этом в 2021 г. в 1-ю декаду июня увлажнение было избыточным, т.к. количество выпавших осадков было больше в 1.7 раза по сравнению со средне многолетней нормой. Во 2-й декаде месяца количество выпавших осадков также было меньше нормы в 8.7 раза. В 3-й декаде июня увлажнение превысило средне многолетние показатели в 2 раза.

В июле 2020 г. и 2021 г. температурные показатели отклонялись от нормы не более чем на 2.5°C. Количество выпавших осадков по годам и декадам сильно варьировалось. В 2020 г. в 1-й и 3-й декадах превышение средне многолетней нормы составило 1.7 и 1.6 раза соответственно, а во 2-й декаде осадков выпало в 2.9 раза меньше нормы. В целом, за месяц осадков выпало в 1.2 раза больше нормы. В 2021 г. 2-я и 3-я декады июля были засушливыми, осадков выпало меньше средне многолетних показателей в 6.3 и 90.0 раза соответственно.

В 2020 г. и в 2021 г. август был достаточно теплым: температура воздуха превысила средне многолетнюю норму. В 2020 г. приход атмосферной влаги в 1-й декаде месяца был в 1.7 раза ниже нормы, во 2-й декаде осадков выпало в 2.2 раза больше средне многолетней нормы. При этом в конце 2-й декады выпало 26 мм (из 43 мм) в виде сильного дождя и града. В 2021 г. в 1-й декаде августа увлажнение было близко к средне многолетним показателям. Во 2-й декаде данного месяца осадков выпало с избытком — в 1.8 раза больше нормы. Третья декада августа была засушливой, осадков выпало меньше средне многолетних показателей в 4.1 раза.

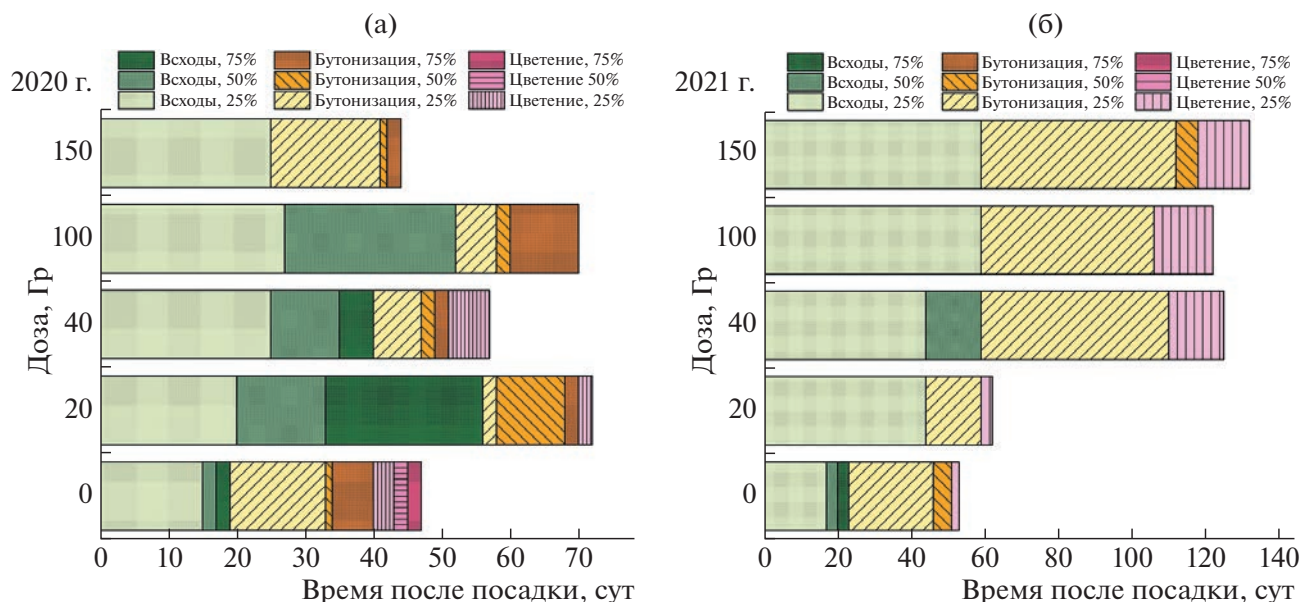


Рис. 2. Зависимость наступления фаз роста растений от дозы, полученной посадочным материалом: (а) – 2020 г., (б) – 2021 г.

Погодные условия вегетационного периода, а именно холодная погода в период посадки и до появления всходов, а также сильное переувлажнение почвы благоприятствовали развитию заболевания и заселению клубней картофеля склероциями *R. solani*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость фенологии растений от дозы, полученной посадочным материалом, носила нелинейный характер для 2-х годов исследования. Контрольные образцы и образцы, обработанные в дозе 20 Гр, в фазах всходов и бутонизации имели показатели 25, 50 и 75% от общего количества растений. В фазе цветения только 25% растений соответствовали фенологической норме. Цветение 50 и 75% от общего количества растений происходило только в контроле (рис. 2). Для остальных образцов отмечено отсутствие некоторых фенофаз.

В первый год исследования начало фазы всходов растений (25%), выросших из необработанного картофеля, зафиксировали на 15-е сут после посадки, во 2-й год исследования – на 18-е сут после посадки. Для обоих годов исследования всходы картофеля, выросшие из облученных клубней, появились позже по сравнению с контрольными необлученными образцами.

Для первого года исследования при облучении посадочного материала в дозе 20 Гр начало фазы всходов было на 5 сут позже контроля, в дозах 40 Гр и 150 Гр – на 10 сут, в дозе 100 Гр – на 12 сут.

В дальнейшем, в течение периода вегетации также наблюдали значительную задержку развития растений картофеля, выросшего из клубней, прошедших обработку. После обработки посадочного материала в дозах 20 и 40 Гр массовые всходы растений (50%) были зафиксированы на 33-и и 35-е сут, а полные (75%) – на 56-е и 40-е сут после посадки соответственно. При этом для растений, выросших из контрольных образцов, данные фенофазы наступали на 17-е и 19-е сут соответственно после посадки. Массовые всходы картофеля, выращенного из посадочных клубней, обработанных в дозе 100 Гр, были отмечены на 52-е сут, при этом фаза полных всходов отсутствовала. Воздействие электронов в дозе 150 Гр на посадочный материал не позволило растениям достичь фаз массовых и полных всходов. Воздействие на семенные клубни в дозе 200 Гр и более привело к полному ингибированию их прорастания.

Тенденция отставания в развитии облученных растений картофеля сохранилась и в фазе бутонизации картофеля. Всходы и бутонизация контрольных образцов имели более короткий период, чем те же стадии облученных растений. Для контрольных образцов фенофаза начала цветения была зафиксирована на 43-и сут после посадки, что было на 29 и 14 сут раньше, чем для образцов, обработанных в дозах 20 и 40 Гр соответственно. Обработка клубней в дозах 100 и 150 Гр не позволила растениям зацвести.

На 2-й год исследования при облучении посадочного материала в дозах 20 и 40 Гр начало всхо-

Таблица 3. Параметры урожайности картофеля и его фракционный состав

Доза, Гр	Фракции картофеля						Урожайность, т/га	
	крупная, %		средняя, %		мелкая, %			
	1	2	1	2	1	2	1	2
0 (контроль)	68.1	67.0	31.2	31.1	0.7	1.9	16.9	26.5
20	56.3	47.2	36.6	49.7	7.1	3.1	15.4	13.8
40	43.1	49.4	52.7	48.8	4.2	1.8	7.8	13.0
100	41.3	41.4	47.7	54.1	11.0	4.5	3.2	10.7
150	89.0	59.6	11.0	35.7	0	4.7	5.4	11.6
200	0	27.8	0	72.2	0	0	0	11.3
<i>HCP</i> ₀₅							0.5	

Примечание. В графе 1 — 2020 г., 2 — 2021 г. То же в табл. 4.

дов было отмечено на 27 сут позже контроля, в дозах 100 и 150 Гр — на 42 сут позже. При облучении посадочного материала в дозе 200 Гр количество взошедших растений на 59-е сут от посадки составило всего 9%, при этом количество растений, так и не достигнувших фазы начала всходов, составило 25% от общего количества взошедших. В течение периода вегетации наблюдали большую по сравнению с первым годом исследования задержку развития растений картофеля, выросшего из клубней, прошедших обработку, по сравнению с контролем. При этом массовые всходы были зафиксированы только для контрольных образцов и для образцов, обработанных в дозе 40 Гр. В контрольных клубнях данная фенофаза наступала на 20-е сут после посадки, что было на 39 сут раньше, чем при обработке семенных клубней в дозе 40 Гр. В фазе бутонизации сохранялась та же тенденция к отставанию фенофаз у растений, выращенных из облученного картофеля, по сравнению с контрольными образцами. Начало бутонизации у контрольных растений наступило на 23-и сут после посадки, что было раньше на 24 сут, чем при обработке в дозах 100 и 200 Гр, и на 28 сут и на 36 сут позже при обработке клубней в дозах 40 и 20 Гр соответственно. Массовая бутонизация была зафиксирована у растений, посадочный материал которых был обработан в дозах 20 и 150 Гр, что было на 40 и 37 сут позже соответственно, чем для контрольных растений. Полная бутонизация была учтена только у контрольных образцов и наступила на 32-е сут после посадки. Фаза начала цветения была зафиксирована для всех образцов. Для контрольных образцов данная фенофаза была определена на 32-е сут. после посадки, что было раньше от 27-ми до 35-ти сут, чем для образцов, обработанных в дозах от 20 до 200 Гр соответственно. У растений с облучением посадочного материала отсутствовали фазы массового и полного цветения.

Количество взошедших и полноценно вегетирующих в дальнейшем растений уменьшалось с увеличением дозы обработки посадочного материала. В первый год при облучении семенного материала в дозах 20 и 40 Гр количество взошедших растений было на уровне контроля, воздействие в дозе 100 Гр снизило количество взошедших растений на 27.5%, а максимальное снижение густоты стояния растений уменьшилось на 77.5% по сравнению с контролем при обработке посадочного материала в дозе 150 Гр. Дозы свыше 200 Гр привели к полному ингибированию прорастания клубней. Во 2-й год исследования количество полноценно вегетирующих растений в контроле составляло 93.8%. Облучение посадочного материала в дозах от 20 до 200 Гр снижало данный показатель от 47 до 84.4%.

В среднем, за 2 года исследования количество взошедших растений было максимальным в контроле и составило 90.6% от общего количества посадочного материала, что было больше на 23 и 34%, чем при обработке семенного картофеля в дозах 40 и 20 Гр соответственно, на 53% больше, чем при обработке в дозе 100 Гр, и на 71 и 81% больше, чем у растений, посадочный материал которых был обработан в дозах 150 и 200 Гр соответственно.

При фитомониторинге посадок было установлено, что не взошедшие клубни картофеля погибли от воздействия комплекса грибов рода *Fusarium*, вызывающих сухую гниль.

Наблюдаемые процессы всхожести, бутонизации и вегетации повлияли на урожай культуры и его фракционный состав клубней в оба года исследования: чем выше была доза облучения, тем меньший сформировался урожай (табл. 3). При определении фракционного состава выделили такие фракции как мелкая — масса клубней <40 г, средняя — от 40 г до 80 г и крупная — >80 г.

Таблица 4. Данные распространенности форм ризоктониоза на клубнях картофеля, %

Форма ризоктониоза	Доза облучения, Гр											
	0 (контроль)		20		40		100		150		200	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Несклероциальные формы												
Сетчатый некроз	97.8	78.9	100.0	71.4	87.5	57.4	70.0	58.3	66.6	54.8	Нет клубней	41.7
Углубленная пятнистость	91.3	12.2	17.6	20.4	18.7	22.5	0	21.2	0	16.3		75.0
Трещины	13.0	2.0	11.8	3.4	6.2	1.8	10.0	0	0	2.8		0
Уродливость	2.2	2.3	11.8	6.8	0	3.6	0	12.9	0	2.8		0
Склероциальные формы												
Всего	100.0	23.5	100.0	3.4	56.2	26.1	10.0	33.3	0	0	Нет клубней	33.3
Склероции на 1/10 поверхности клубня	32.6	21.2	52.9	3.4	25.0	26.1	10.0	33.3	0	0		33.3
Склероции на 1/4 поверхности клубня	32.6	0.6	41.2	0	25.0	0	0	0	0	0		0
Склероции на 1/2 поверхности клубня	34.8	1.7	5.9	0	6.2	0	0	0	0	0		0

В первый год исследования определение фракционного состава показало, что по сравнению с контрольными образцами при обработке клубней в диапазоне доз от 20 до 100 Гр сформировалось больше мелких и средних клубней — на 3.5–10.3% и на 5.4–21.5% соответственно, крупных — меньше на 11.8–26.8%. Во 2-й год исследования, при воздействии на клубни излучением в дозах от 20 до 200 Гр доля средних клубней также увеличивалась на 4.6–41.1%, крупных — уменьшалась на 7.4–39.2% по сравнению с контролем. Доля мелкой фракции в урожае 2021 г. увеличивалась при облучении во всех дозах, за исключением 40 и 200 Гр. При облучении в дозе 150 Гр в первый год исследования и дозе 200 Гр во 2-й год мелкая фракция картофеля отсутствовала совсем. В первый год исследования при этом преобладала крупная фракция, в то время как во 2-й год — средняя. За 2 года исследования максимальный урожай картофеля был у контрольных образцов, достоверно превышая данный показатель у облученных образцов в зависимости от дозы от 8.8 до 100% в 2021 г. и от 48 до 60% в 2022 г. При этом картофель, выросший из клубней, облученных в дозе 20 Гр, оказался наиболее продуктивным из всех изученных доз.

При фитоэкспертизе клубней картофеля нового урожая было установлено их поражение как несклероциальными, так и склероциальными формами ризоктониоза (табл. 4). Из несклероциальных форм преобладал сетчатый некроз. Углубленную пятнистость наблюдали у всех опытных

образцов, максимальное количество данной формы присутствовало у картофеля, выращенного из контрольных образцов в 2021 г., и составило 91.3%. При облучении посадочного материала в дозах 20 и 40 Гр данный показатель в среднем был на уровне 17–22.5% от контроля. При обработке в дозах 100 и 150 Гр углубленная пятнистость или отсутствовала совсем, как в 2020 г., или в 2021 г. была на уровне 16–21%. Однако максимальная распространенность данной формы в 2021 г. была при облучении семенных клубней в дозе 200 Гр и составила 75%. Высокая доля распространенности трещин на клубнях была зафиксирована в 2020 г. как в контрольных образцах, так и при облучении посадочного материала в дозах 20 и 100 Гр и составила 10% и 13% соответственно. В 2021 г. данный показатель был меньше в 3.5–10 раз по сравнению с контролем. После облучения посадочного материала в дозе 20 Гр в первый год исследования и в дозе 100 Гр во 2-й год присутствовала уродливость клубней нового урожая и ее распространенность превышала этот же показатель у контрольных образцов на 9.6% и 8.3% соответственно.

В проведенном ранее исследовании [20] было установлено, что облучение ускоренными электронами с энергией 1 МэВ отделенных от культуры склероциев гриба *R. solani* в дозах от 20 до 900 Гр существенно не влияло на их рост. Облучение в дозах свыше 4500 Гр позволило полностью ингибировать развитие гриба в течение всего периода наблюдений.

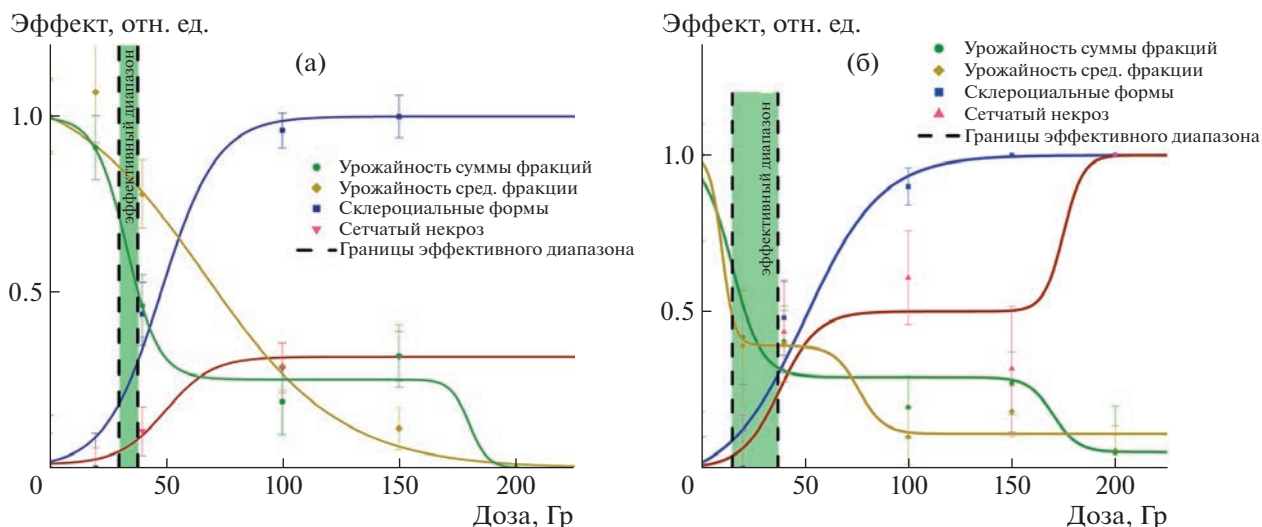


Рис. 3. Зависимости общего урожая картофеля, урожая средней фракции и распространенности склероциальных и несклероциальных форм ризиктониоза на клубнях нового урожая от дозы облучения посадочного материала: (а) – 2020 г., (б) – 2021 г.

В данном исследовании склероциальные формы ризиктониоза присутствовали практически на всех образцах обработанного картофеля, исключение составили клубни, посадочный материал которых был облучен в дозе 150 Гр как в первый, так и во второй год исследования. Для двух годов исследования распространенность склероциальных форм на клубнях нового урожая различалась. В 2021 г. в большей степени эти формы поражения наблюдали у клубней, посадочный материал которых был обработан в дозе 20 Гр, где распространенность склероциев на поверхности клубней составила 100%, в меньшей степени при обработке в дозе 40 Гр – 56.2%, и менее всего они встречались на клубнях, обработанных в дозе облучения 100 Гр – 10.0%.

В 2021 г. распространенность склероциальных форм на клубнях нового урожая была меньше по сравнению с 2020 г. Даже у контрольных образцов она составляла 23.5% от общего количества клубней. У образцов, обработанных в дозах 100 и 200 Гр, данный показатель был максимальным и составил 33.3%, превышая контроль на 10.5 и на 30% для клубней, посадочный материал которых обработан в дозе 20 Гр. В целом на клубнях преобладали склероции, занимающие 1/10 поверхности клубня.

В 2020 г. преобладала распространенность склероциев на 1/4 и 1/2 поверхности клубня, в 2021 г. данные показатели были значительно ниже или вообще отсутствовали. Меньшая распространенность склероциев на поверхности клубней нового урожая при обработке посадочного материала в диапазоне доз от 40 до 150 Гр в сравнении с контролем (1/10, 1/4 и 1/2 поверхности

клубней соответственно) объясняется более длительным процессом формирования растений, более коротким периодом клубненакопления и соответственно меньшим периодом времени, когда клубни могли быть заселены грибом *R. solani*.

Более высокая эффективность обработки ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ для подавления склероциальных форм ризиктониоза, локализованных на поверхности картофеля, по сравнению с несклероциальными формами связана проникновением низкоэнергетичных электронов в поверхностные слои клубня, расположенные на глубине не более 3 мм от поверхности клубня, без оказания воздействия на внутренние структуры картофеля.

Доля непригодных клубней нового урожая варьировалась в зависимости от дозы обработки посадочного материала. При облучении семенного картофеля в дозе 20 Гр данный показатель составил 100%, так же как и для контроля, при облучении в дозах 40 и 100 Гр – на уровне 74.4 и 55.0% соответственно. При обработке семенного картофеля в дозе 150 Гр непригодные клубни полностью отсутствовали.

На рис. 3 представлены зависимости общего урожая, урожая средней фракции, как наиболее востребованной на рынке, а также зависимости распространенности склероциальных и несклероциальных форм ризиктониоза клубней нового урожая от дозы облучения семенного картофеля, полученные в 2020 г. и в 2021 г. Полученные экспериментальные данные могут быть аппроксимированы сигмоидальными зависимостями вида:

$$U(D) = \frac{u_1}{1 + e^{u_2(D-u_3)}} + u_4, \quad (1)$$

где u_1 — максимальная величина функции; u_2 — параметр, характеризующий ширину распределения функции по устойчивости биологических объектов к дозе облучения, u_3 — доза облучения, при которой количество устойчивых к облучению биообъектов уменьшается в 2 раза по сравнению с контрольным показателем, u_4 — уровень, показывающий количество биообъектов, устойчивых к максимальной полученной дозе облучения. Некоторые зависимости имеют более сложный вид и представимы в виде суммы из двух сигмоидальных функций. Сигмоидальный характер зависимостей говорит о различной восприимчивости образцов клубней картофеля и пораженного культуру фитопатогена к воздействию ионизирующего излучения. Влияние на полученный биологический эффект оказывает количество актов ионизации на единицу поверхности клубня, а также распределение глазков и склероциев по поверхности клубней.

Исходя из полученных эффектов подавления распространенности ризоктинииоза на клубнях нового урожая и снижения урожайности картофеля от дозы облучения семенного материала, были выбраны критерии оптимального диапазона доз предпосадочной радиационной обработки клубней картофеля. Нижняя граница диапазона соответствовала подавлению распространенности склероциальных форм ризоктинииоза на клубнях нового урожая от 10% и больше по сравнению с контрольными показателями, а верхняя граница диапазона определялась снижением урожая клубней не более, чем на 50% по сравнению с необработанным семенным картофелем. Таким образом, с учетом погрешностей аппроксимации зависимостей, представленных на рис. 3, для первого года исследования эффективный диапазон доз составил от (19 ± 2) до (36 ± 3) Гр, для второго года — от (15 ± 2) до (25 ± 3) Гр.

Таким образом, по результатам 2-летнего исследования было показано, что поверхностная обработка семенного картофеля ускоренными электронами в диапазоне от 20 до 25 Гр является эффективной для улучшения качества урожая культуры за счет подавления заболеваемости ризоктониозом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что предпосадочное облучение семенных клубней картофеля в диапазоне доз от 20 до 200 Гр приводило к задержке развития возросших растений, свыше 200 Гр — к полному ингибированию прорастания клубней. Чем выше была доза облучения посадочного материала, тем позже наступали фазы всхожести, бутонизации и вегетации растений. При этом все

дозы показали нелинейный отклик развития различных фаз вегетации растений от дозы облучения.

Было отмечено снижение урожая клубней, прошедших предпосевную радиационную обработку, с увеличением дозы облучения семенного картофеля, однако доля непригодных клубней в урожае также снижалась с увеличением дозы. Обработка посадочного материала также повлияла на фракционный состав клубней нового урожая.

Распространенность различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая снижалась с увеличением дозы предпосадочной обработки семенного картофеля ускоренными электронами с энергией 1 МэВ, что могло быть связано не только с прямым воздействием излучения на фитопатоген, но и с более коротким периодом клубнекопления и, соответственно, меньшим периодом времени, когда клубни могли быть заселены грибом *R. solani* из почвы.

При этом низкоэнергетичные электроны воздействовали только на верхние, пораженные грибом участки клубней, что делает такой способ обработки наиболее предпочтительным для корнеплодов.

На основании проведенного исследования рекомендуемый диапазон доз предпосадочного облучения семенного картофеля, улучшающий фитосанитарное состояние урожая, составляет от 20 до 25 Гр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nazarov P.A., Baleev D.N., Ivanova M.I.* Infectious plant diseases: Etiology, current status, problems and prospects in plant protection // *Acta Natur.* 2020. V. 12. № 3. P. 46–59.
2. *Антонова Т.С., Маслиенко Л.В., Мурадосилова Н.В., Саукова С.Л.* Виды грибов из рода *Фузариум*, встречающиеся на подсолнечнике в Краснодарском крае, и их патогенность // *Современная микология в России.* М.: НАМ РФ, 2002. С. 171.
3. *Бердыш Ю.И.* Распространение основных вредителей и болезней сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае в 2003 году и прогноз их появления в 2004 году // *Краснодар: Пограничная госинспекция по карантину растений по Краснодарскому краю*, 2004. 35 с.
4. *Вянгеляускайте А.П., Жуклене Р.М., Жуклис Л.П.* Вредители и болезни овощных культур. М: Агропромиздат, 1989. 462 с.
5. *Жуковская С.А., Овчинникова А.М.* Возбудители грибных болезней сои // *Возбудители болезней сельскохозяйственных растений Дальнего Востока* / Под. ред. Азбукина З.М. М.: Наука, 1980. С. 5–50.
6. *Котова В.В.* Корневые гнили гороха и вики и меры борьбы с ними. СПб.: ВИЗР, 2004. 144 с.
7. *Малюга А.А., Енина Н.Н., Щеглова О.В.* Агротехнические и химические меры борьбы с ризоктониозом

- картофеля. Новосибирск: РАСХН, СибНИИЗиХ, 2010. 24 с.
8. Евстратова Л.П., Николаева Е.В., Кузнецова Л.А., Харин В.Н. Уровень поражения картофеля почвообитающими патогенами в условиях Карелии // Агро XXI. 2006. № 4–6. С. 10–12.
 9. Малюга А.А., Маринкина Г.А., Баранов Д.С., Васильев В.Г. Роль предшественников в борьбе с ризоктониозом картофеля // Защита и карантин раст. 2011. № 1. С. 28–30.
 10. Халиков С.С., Малюга А.А., Чуликова Н.С. Экологически безопасные препараты на основе механохимической модификации тебуконазола для комплексной защиты картофеля // Агрохимия. 2018. № 10. С. 46–53.
 11. Toms B. Ethical concerns in plant biotechnological research // Inter. J. Biotechnol. Bioengin. Res. 2013. V. 4. № 3. P. 167–174.
 12. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Бондаренко В.С. Радиационные технологии в сельском хозяйстве: стратегия научно-технического развития // Инноватика и экспертиза. 2016. Т. 1. № 16. С. 197–206.
 13. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
 14. Филипас А.С., Лой Н.Н., Ульяненко Л.Н., Степанчикова Н.С. Поражение сортов мягкой пшеницы стеблевой ржавчиной при раздельном и совместном облучении компонентов ценоза // Докл. РАСХН. 2008. № 6. С. 18–20.
 15. Лой Н.Н., Санжарова Н.И., Гулина С.Н., Сулова О.В. Влияние предпосевного гамма-облучения семян подсолнечника на развитие проростков и пораженность их болезнями // Сб. мат-лов III Международ. научн.-практ. конф. ВНИИТТИ. Краснодар, 2019. Ч. 1. С. 434–439.
 16. ГОСТ 33339-2015 “Межгосударственный стандарт. Радиационная обработка пищевых продуктов. Основные технические требования” (введен в действие Приказом Росстандарта от 31.08.2015 г. № 1220-ст). М.: Стандартинформ, 2016.
 17. Чередниченко Д.В., Савилов В.А., Федосенко Р.В., Вишнева Н.В. Основные тренды на международном рынке радиационных технологий / Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы. Сб. докл. Международ. научн.-практ. конф. Обнинск: ВНИИРиА, 2018. С. 28–31.
 18. Agostinelli S. Geant4 – a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. V. 506. Iss. 3. P. 250–303.
 19. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Краснообск: РПО СО РАСХН, 2004. 162 с.
 20. Близнюк У.А., Леонтьев В.А., Малюга А.А. Влияние ионизирующего излучения на рост фитопатогена *R. solani* // Вестн. МГУ. Сер. 3: Физика. Астрономия. М.: Изд-во МГУ, 2021. № 1. С. 45–49.

Radiation Processing of Seed Potatoes as a Method for Suppressing Various Forms of Rhizoctonia in New Harvest Tubers

N. S. Chulikova^{a, #}, A. A. Malyuga^a, U. A. Bliznyuk^{b, c, ##}, P. Yu. Borshchegovskaya^{b, c}, S. A. Zolotov^b, Ya. V. Zubritskaya^b, V. S. Ipatova^c, A. P. Chernyaev^{b, c}, and I. A. Rodin^{d, e}

^aSiberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS
Novosibirsk region, Krasnoobsk 630501, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Physics Department
Leninskiye gory 1, bld. 2, Moscow, GSP-1, 119991, Russia

^cSkobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Leninskiye gory 1, bld. 2, Moscow, GSP-1, 119991, Russia

^dLomonosov Moscow State University, Chemistry Department
Leninskiye gory 1, bld. 3, Moscow, GSP-1, 119991, Russia

^eFirst Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov of the Ministry of Health of Russia (Sechenov University),
Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine
ul. B. Pirogovskaya 2, bld. 2, Moscow 119435, Russia

[#]E-mail: natalya-chulikova@yandex.ru

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

This study focuses on the impact of pre-planting irradiation of seed potatoes on the phenophases of the root crop and proliferation of fungus *Rhizoctonia solani* on the new crop tubers. A two-year monitoring of seed potatoes after irradiation shows that treatment of tubers with 30–40 Gy decreases the spread of fungal infection on the surface of the tubers. It was found that low-energy electrons, used in the experiment, are the most effective irradiation treatment, since they penetrate in the upper layers of potato tubers affected by the fungus.

Key words: radiation processing, accelerated electrons, sclerotia of *Rhizoctonia solani* Kühn, potato phenology, fractional composition, crop yield.

ПРОБОПОДГОТОВКА QuEChERS ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕСТИЦИДОВ В ЯБЛОКАХ ХРОМАТО-МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2023 г. А. З. Мухарлямова^{1,*}, М. В. Балымова¹, А. Г. Мухамметшина¹,
К. Е. Буркин¹, Ф. А. Бекмуратова¹

¹Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности
420075 Казань, ул. Научный городок-2, Республика Татарстан, Россия

*E-mail: muharlyamova82@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Подобраны оптимальные условия газохроматографического анализа с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ–МС), которые позволили получить удовлетворительное разделение и идентификацию некоторых хлорорганических (ХОП) и фосфорорганических (ФОП) пестицидов. Исследовано несколько сорбентов на этапе очистки экстракта с целью уменьшения матричного эффекта для достижения более высокой точности анализа. Проведена оценка полноты извлечения ХОП и ФОП из матрицы яблок на примере следующих пестицидов: гексахлорциклопексана (ГХЦГ, α -, β - и γ -изомеры), диметоата, фозалона, хлорпирифоса. Установлено, что наиболее эффективным оказалось применение сорбента Florisil в сочетании с $MgSO_4$, которое позволило максимально снизить матричные эффекты и получить лучшие показатели степени извлечения исследованных аналитов. С помощью данного метода проведен мониторинг содержания остаточных количеств пестицидов в плодах яблонь разных сортов.

Ключевые слова: газовая хроматография, масс-спектрометрия, пробоподготовка QuEChERS, хлорорганические пестициды, фосфорорганические пестициды, яблоки.

DOI: 10.31857/S0002188123020114, **EDN:** MSZNTS

ВВЕДЕНИЕ

Яблоки — одни из наиболее распространенных фруктов, присутствующих в нашем рационе круглый год. Они содержат минимальный уровень сахара и богаты питательными веществами, включая пектин, витамины, минералы, антиоксиданты, флавоноиды, танины, дубильные вещества, каждый из которых необходим для нормального функционирования организма. Например, пектин помогает улучшить работу желудочно-кишечного тракта, а минералы нужны для метаболизма избытка соли в организме [1]. Известно, что флавоноиды способны предотвращать развитие раковых клеток. Благодаря наличию антиоксидантов, которые сдерживают процессы окисления, и танинов, обладающих противовоспалительным действием, данный фрукт помогает предотвратить различные хронические заболевания, такие как астма и ишемическая болезнь сердца [2, 3]. Однако даже столь полезный фрукт может нанести вред здоровью человека при наличии в нем остаточных количеств ядохимикатов (инсектицидов, гербицидов, пиретроидов), которые при-

меняют в сельском хозяйстве для защиты большинства культур от вредителей [4].

Пестициды — это вещества или смеси соединений, которые используют для борьбы с вредителями, включая насекомых, сорняки и микроорганизмы [5, 6]. Ежегодно во всем мире для борьбы с вредителями и болезнями многих фруктовых и овощных культур используется огромное количество пестицидов. По этой причине, помимо присутствия в окружающей среде, данные ядохимикаты часто оказываются и в пищевых продуктах [7, 8].

На сегодняшний день выращивание яблок в большинстве случаев не обходится без применения пестицидов, необходимых для обеспечения роста и сохранности урожая. Чрезмерное применение этих соединений может привести к наличию их остаточных количеств в плодах после сбора урожая [9]. Следует учитывать, что в сухих условиях и при низких температурах период полураспада пестицидов увеличивается. Их остаточные количества могут нанести значительный ущерб здоровью потребителей [10].

Таблица 1. Режим работы газового хроматографа при анализе проб

Параметр	Величина, условия
Температура испарителя и порта ввода	280°C
Температура переходной линии	270°C
Температура источника ионов	230°C
Термостат колонок	начальная температура – 80°C, выдержка при данной температуре – 2 мин, скорость подъема температуры – 10°C/мин, конечная температура – 280°C
Ввод пробы	с делением потока 1:10
Объем вводимой пробы	1 мкл
Длительность анализа	47 мин
Расход газа-носителя (He, 99.999%)	1 мл/мин, постоянный поток

В связи с этим необходимо проводить контроль содержания остаточных количеств ядохимикатов в окружающей среде и пищевых продуктах. Для идентификации и количественной оценки применяемых пестицидов требуются быстрые и удобные методы определения, среди которых основными на сегодняшний день являются газовая (ГХ) и высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) в сочетании с масс-спектрометрией (МС) [11, 12]. Одним из часто применяемых способов пробоподготовки проб при анализе остатков пестицидов является QuEChERS и его модификации, к преимуществам которых относятся высокие пропускная способность образца и степень извлечения целевых аналитов, низкое потребление растворителя и короткое время анализа [13, 14]. При этом, несмотря на значительные преимущества, метод требует адаптации для каждого вида матриц, необходимо улучшать условия хроматографического разделения и пробоподготовки целевых аналитов для анализа остаточных количеств пестицидов различных классов.

Исходя из вышеизложенного, цель работы – адаптация способа QuEChERS при определении остаточных количеств пестицидов (в первую очередь хлорорганических (ХОП) и фосфорорганических (ФОП)) в образцах яблок с применением ГХ–МС.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Инструментальная часть. Работу проводили на газовом хроматографе “Хроматэк Кристалл

5000”, снабженном масс-спектрометрическим детектором, кварцевой капиллярной колонкой “Chromatec CR-5ms” 30 м × 0.25 мм × 0.25 мкм, и автоматическим дозатором пробы ДАЖ-2М 3D производства фирмы “Хроматэк” (Россия), с регистрацией масс-спектров электронной ионизации (энергия электронов 70 эВ) в диапазоне соотношений $m/z = 35–600$, при оптимальных условиях газохроматографического разделения (табл. 1). Обработку данных хромато-масс-спектрометрических анализов осуществляли с помощью программного обеспечения “Хроматэк Аналитик” и электронной библиотеки масс-спектров “NIST 2020” (США).

Реагенты и объекты исследования. Использовали следующие аналитические стандарты: α -ГХЦГ, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ производства “Хром-Лаб” (Россия), диметоат, фозалон, хлорпирифос производства НПК “БЛОК-1” (Россия), сульфат магния безводный, ацетат натрия, ацетонитрил марки “х.ч.”, PSA (сорбент, содержащий в качестве привитой группы алкиламин с двумя различными NH_2 -группами), Florisil (сорбент, являющийся силикатом магния).

Пробоподготовка. В качестве объектов исследования были отобраны образцы яблок различных сортов и стран происхождения урожая осени 2021 г. Подготовку проб к анализу осуществляли по классической методике QuEChERS (рис. 1). Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием пакета анализа данных Microsoft Excel.

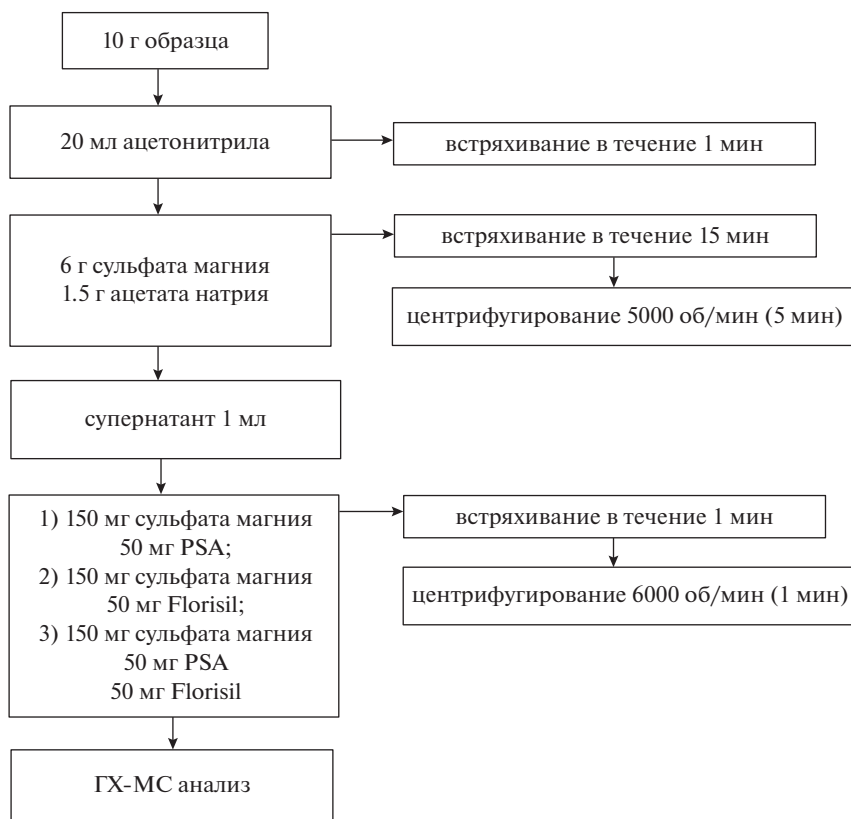


Рис. 1. Схема пробоподготовки способом QuEChERS для определения пестицидов методом ГХ–МС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод ГХ–МС был выбран для качественного и количественного определения содержания ХОП и ФОП в связи с его высокой чувствительностью, точностью и способностью детектировать низкие концентрации исследуемых пестицидов. При этом были проработаны различные вариации настройки масс-спектрометрического детектора и газового хроматографа с целью подбора оптимальных условий анализа. Предел количественного определения (ПКО) ХОП (ГХЦГ, α -, β - и γ - изомеры) составил 0.5 мкг/кг, ФОП (диметоат, фозалон, хлорпирифос) — 7.5 мкг/кг.

Для достижения поставленной цели исследования рассматривали влияние матричного эффекта на полноту извлечения пестицидов из экстракта яблок. В качестве эталонной матрицы были выбраны экстракты, предварительное исследование которых показало отсутствие остаточных количеств пестицидов класса ХОП и ФОП.

Способ пробоподготовки QuEChERS включает экстракцию ацетонитрилом с добавлением солей и следующую за ней стадию отчистки экстракта. При проведении последней были апробированы различные сочетания сорбентов PSA и

Florisil с целью оптимизации процессов удаления сопутствующих веществ из конечного экстракта, оказывающих негативное влияние на уровень фонового шума и способных перекрывать сигналы хроматографических пиков целевых аналитов. В результате проведенных исследований наблюдали значительные матричные помехи при использовании картриджа с PSA + MgSO_4 . Добавление сорбента Florisil на стадии очистки привело к снижению фонового шума и уменьшению аналитических помех от матрицы.

Ацетонитрильный экстракт матрицы, согласно полученным масс-спектрам, содержал небольшие количества соединений различных классов, включая производные многоатомных спиртов и жирных кислот (рис. 2).

Исследования полноты извлечения проводили методом “введено–найдено” с использованием широко применяемых для защиты плодовых и плодово-ягодных культур хлорорганических (α -ГХЦГ, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ) и фосфорорганических пестицидов (диметоат, фозалон, хлорпирифос) (рис. 3). Образцы для проведения хроматографического исследования готовили в четырехкратной повторности. Идентификацию компонентов

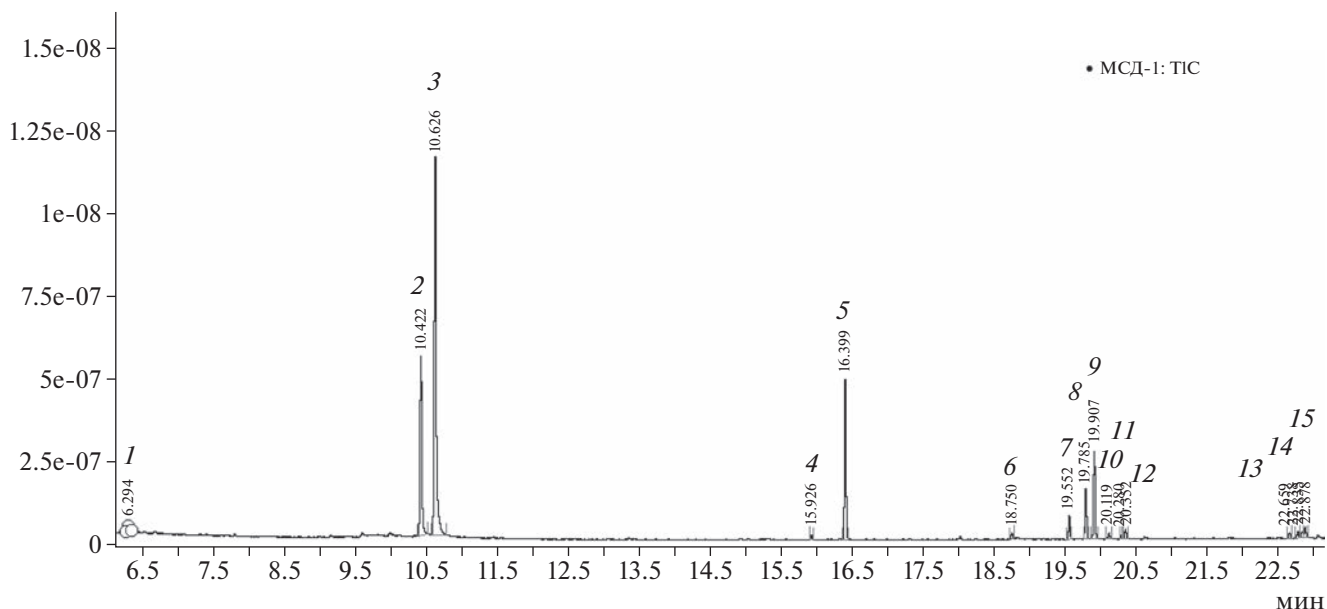


Рис. 2. Хроматограмма полного ионного тока ацетонитрильного экстракта из яблок, полученная способом QuEChERS и с применением картриджа Florisil + MgSO_4 (1 – диоксим этандиола, 2, 3 – изомеры октандиола, 4, 5, 9, 11 – фаза капиллярной колонки, 6 – пальмитиновая кислота и ее производные, 7 – стеариновая кислота и ее производные, 8 – олеиновая кислота и ее производные, 10 – бензойной кислоты, 4-[7-(4-гептилфенил)-1,2,3,4-тетрагидро-1,3-диметил-2,4-диоксо-8Н-имидазо [2,1-f]пурин-8-ил]-, 12, 13, 14 – неидентифицированные соединения, 15 – фенол, 2,2'-метилен, бис[6-(1,1-диметилэтил)-4-метил-]).

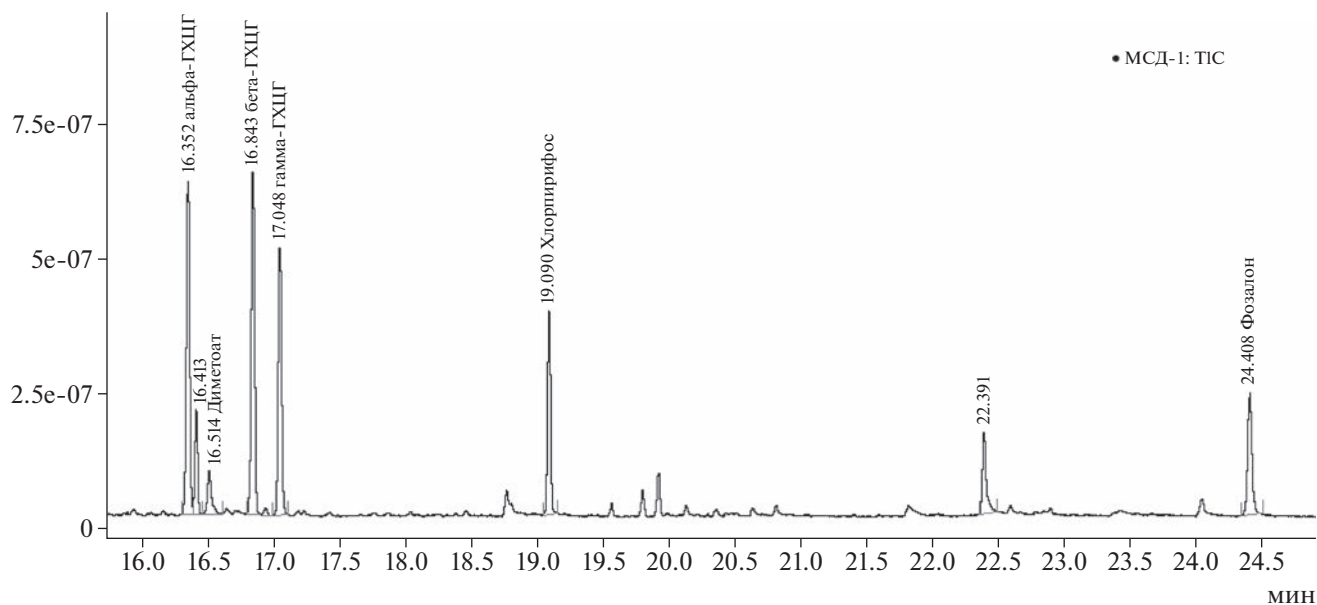


Рис. 3. Хроматограмма полного ионного тока ацетонитрильного экстракта из яблок, полученная способом QuEChERS и с применением картриджа Florisil + MgSO_4 , предварительно загрязненного 6-ю пестицидами (0.1 мкг/мл).

проводили по временам удерживания и характеристическим ионам в базе электронной библиотеки масс-спектров “NIST 2020” (рис. 4), количественное определение – методом абсолютной калибровки.

Установили, что при использовании на стадии очистки экстракта картриджа с $\text{PSA} + \text{MgSO}_4$ полнота извлечения каждого из загрязнителей была не высокой (табл. 2). Комбинирование сорбентов $\text{PSA} + \text{Florisil} + \text{MgSO}_4$ позволило полу-

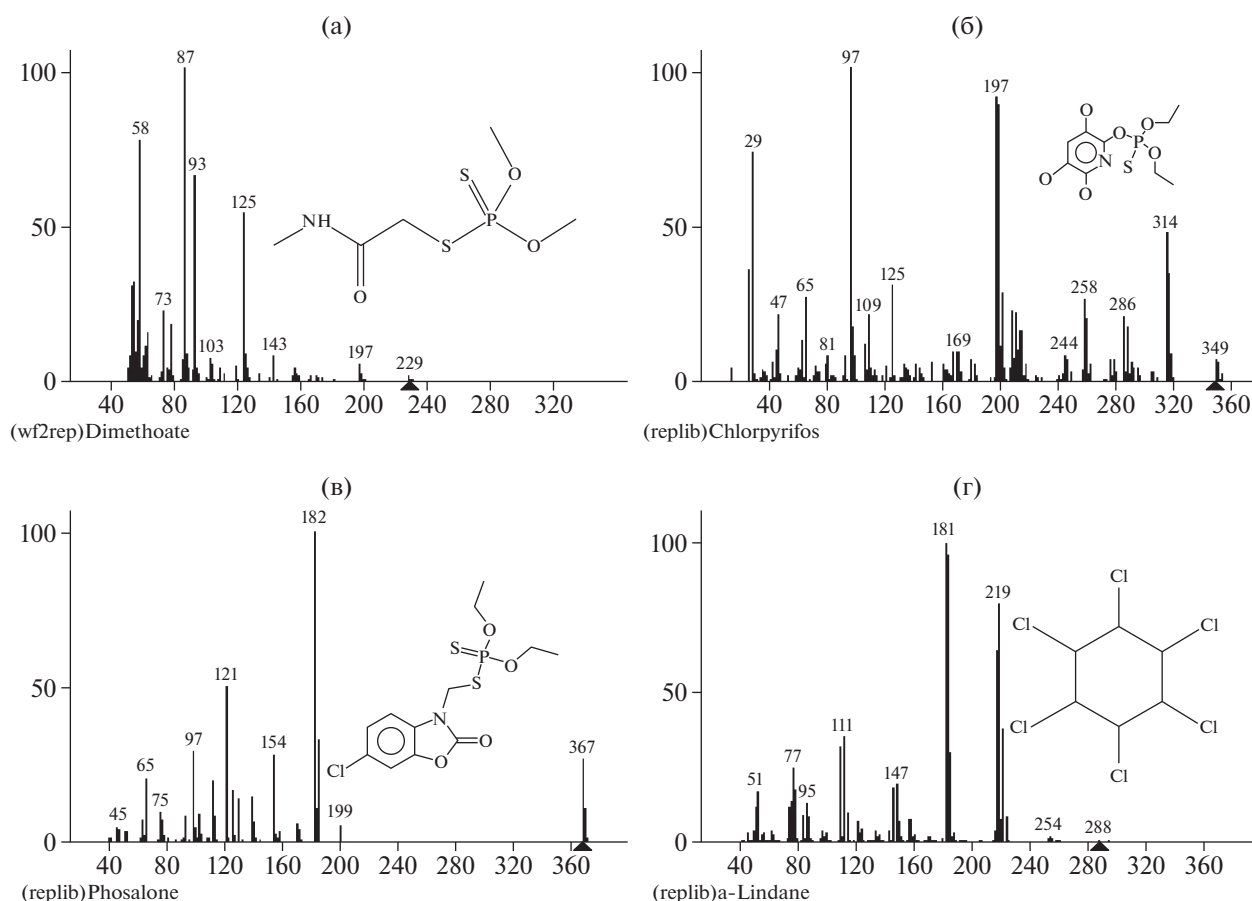


Рис. 4. Масс-спектры определяемых пестицидов: (а) – диметоат, (б) – хлорпирифос, (в) – фозалон, (г) – α -ГХЦГ, β -ГХЦГ и γ -ГХЦГ.

чить извлечение искоемых аналитов $>72\%$. Наиболее эффективным для фруктовых матриц оказалось применение Florisil + $MgSO_4$, с помощью которого удалось получить высокие величины исследованного показателя ($>81\%$). Таким образом, полученные результаты показали, что данный метод применим для анализа и количественного определения ХОП и ФОП в семечковых плодах.

В торгово-розничных сетях г. Казани были отобраны образцы яблок разных сортов и стран происхождения для определения содержания в них остаточных количеств ХОП и ФОП с применением пробоподготовки QuEChERS и очисткой экстракта с использованием Florisil + $MgSO_4$.

Как правило, импортные яблоки обрабатывают воском, что увеличивает сроки хранения данного продукта и улучшает товарный вид, придавая им глянцевый блеск. В исследованиях многих авторов отмечено, что яблоки, покрытые воском, в большинстве случаев содержат ядохимикаты. Например, в работе [15] представлены результаты исследования растительной продукции, в частно-

сти яблок, на содержание ХОП, в ходе которых были обнаружены остаточные количества α -ГХЦГ (0.08 мг/кг), β -ГХЦГ (0.08 мг/кг), ДДТ (0.007–0.04 мг/кг) и гептахлора (0.008–0.013 мг/кг). Также при исследовании яблочных выжимок [16] было выявлено наличие ГХЦГ (α -, β -, γ -изомеров) в количестве <0.03 мг/кг и ДДТ и его метаболитов в количестве <0.06 мг/кг.

Известно, что кожура яблок способна поглощать пестициды, которые с ее поверхности могут проникнуть внутрь плода. Таким образом, на внешней поверхности яблок, возможно, более высокое содержание пестицидов, что подтверждено исследованиями многих авторов [17–19]. В связи с этим в настоящей работе исследования мякоти и кожуры каждого образца были проведены отдельно. Образцы (мякоть, кожура) для проведения хроматографического анализа готовили в шестикратной повторности для каждого сорта.

В образцах яблок (мякоть и кожура), подвергшихся исследованию, остаточных количеств пестицидов не было выявлено на уровне чувстви-

Таблица 2. Результаты полноты извлечения (стандартное отклонение, доверительный интервал) ХОП и ФОП из модельных образцов яблок ($n = 4, P = 0.95$)

Соединение		Полнота извлечения, %	Стандартное отклонение, %	Доверительный интервал, $\pm$ %
PSA + MgSO ₄				
ХОП	α -ГХЦГ	75.3	0.07	0.16
	β -ГХЦГ	73.6	0.14	0.29
	γ -ГХЦГ	69.5	0.10	0.22
ФОП	диметоат	68.6	0.10	0.22
	фозалон	71.7	0.20	0.43
	хлорпирифос	60.2	0.16	0.35
PSA + Florisil + MgSO ₄				
ХОП	α -ГХЦГ	85.4	0.18	0.38
	β -ГХЦГ	78.2	0.10	0.21
	γ -ГХЦГ	83.7	0.12	0.26
ФОП	диметоат	76.4	0.13	0.28
	фозалон	83.8	0.19	0.41
	хлорпирифос	72.3	0.13	0.27
Florisil + MgSO ₄				
ХОП	α -ГХЦГ	91.3	0.09	0.19
	β -ГХЦГ	86.7	0.07	0.15
	γ -ГХЦГ	88.1	0.04	0.08
ФОП	диметоат	85.3	0.06	0.13
	фозалон	89.4	0.06	0.12
	хлорпирифос	81.7	0.08	0.17

Таблица 3. Результаты ГХ–МС-определения содержания пестицидов в плодах яблонь различных сортов ($n = 6, P = 0.95$)

Объект исследования, сорт	Определяемое соединение	Найдено, мкг/кг	ПКО, мкг/кг
№ 1 Грени Смит (мякоть, кожура)	ХОП	<0.5	0.5
	ФОП	<7.5	7.5
№ 2 Роял Гала (мякоть, кожура)	То же	—	То же
№ 3 Айдаред (мякоть, кожура)			
№ 4 Ред Делишес (мякоть, кожура)			
№ 5 Голден Делишес (мякоть, кожура)			

тельности примененного метода (табл. 3). Исходя из полученных результатов можно заключить, что яблоки, подвергшиеся исследованию, были безопасными для здоровья потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что использование пробоподготовки QuEChERS с последующим ГХ–МС-анализом является эффективным и на-

дежным методом для одновременного определения ряда хлорорганических (ХОП) и фосфорорганических (ФОП) пестицидов в плодах яблони. В результате экспериментальной апробации различных сорбентов при пробоподготовке способом QuEChERS установлено, что использование на стадии очистки экстракта Florisil + MgSO₄ способствовало эффективному удалению матричных помех и получению полноты извлечения в диапазоне от 81 до 91% в зависимости от исследованного аналита. Предлагаемый метод был успешно применен для определения остаточных количеств пестицидов в образцах яблок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторский коллектив выражает признательность за аналитическое оборудование Испытательного центра “Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (ФЦТРБ–ВНИИ”, г. Казань), использованное в настоящей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rai S., Singh A.K., Srivastava A., Yadav S., Siddiqui M.H., Mudiam M.K.R. Comparative evaluation of QuEChERS method coupled to DLLME extraction for the analysis of multiresidue pesticides in vegetables and fruits by gas chromatography-mass spectrometry // *Food Anal. Methods*. 2016. V. 9. P. 2656–2669.
2. Dwivedi B.C., Tiwari H., Gaur V. Assessment of 27 pesticide residues in fruit juices & vegetables paste by gas chromatography with mass spectrometry (GC–MS) // *Inter. J. Chem. Stud.* 2017. V. 5 (1). P. 259–285.
3. Мотылева С.М. Полиэлементный состав плодов некоторых сортов яблони селекции ГНУ “ВНИИСПК” // *Аграрн. вестн. Урала*. 2010. № 9 (75). С. 66–70.
4. Golge O., Kabak B. Determination of 115 pesticide residues in oranges by high-performance liquid chromatography–triple-quadrupole mass spectrometry in combination with QuEChERS method // *J. Food Compos. Anal.* 2015. V. 41. P. 86–97.
5. De Sousa F.A., Guido Costa A.I., De Queiroz M.E.L.R., Teófilo R.F., Neves A.A., De Pinho G.P. Evaluation of matrix effect on the GC response of eleven pesticides by PCA // *Food Chem.* 2012. V. 135. P. 179–185.
6. Полякова Н.Н., Серая Л.Г., Сидоренко О.Д., Белошапкина О.О., Ларина Г.Е. Влияние применения гербицидов в питомнике древесных культур на биологическую активность почвы // *Агрохимия*. 2018. № 12. С. 35–41.
7. Лукаткин А.С., Семенова А.С., Лукаткин А.А. Влияние регуляторов роста на проявления токсического действия гербицидов на растения // *Агрохимия*. 2016. № 1. С. 73–95.
8. Norli H.R., Christiansen A.L., Stuveseth K. Analysis of non-cleaned QuEChERS extracts for the determination of pesticide residues in fruit, vegetables and cereals by gas chromatography-tandem mass spectrometry // *Food Addit. Contam.* 2015. V. 33. P. 1–13.
9. Мухарлямова А.З., Мухамметшина А.Г., Рахметова Э.Р. Мониторинг остаточных количеств пестицидов и микотоксинов в зерновых культурах / Сб. мат-лов Международ. научн.-практ. конф. “Наука, технологии, кадры – основы достижений прорывных результатов в АПК”. Казань, 2021. С. 77–85.
10. Сидоренко О.Д. Интегрированная защита сельскохозяйственных растений (VII Конгресс по защите растений, Сербия, 2014 г.) // *Агрохимия*. 2015. № 10. С. 90–93.
11. García-Reyes J.F., Hernando M.D., Ferrer C., Molina-Díaz A., Fernández-Alba A.R. Large scale pesticide multiresidue methods in food combining liquid chromatography–time-of-flight mass spectrometry and tandem mass spectrometry // *Anal. Chem.* 2007. V. 79 (19). P. 7308–7323.
12. Pitoti M., Harmoko H., Tresnawati A., Pardede H.F., Ariyani M., Ridwan Y.S., Yusiasih R. Pesticide residues in fruits and vegetables in Indonesia: findings of five-year proficiency testing // *Accred. Qual. Assur.* 2022. V. 27. P. 181–193.
13. Bruzzoniti M.C., Checchini L., De Carlo R.M., Orlandini S., Rivoira L., Del Bubba M. QuEChERS sample preparation for the determination of pesticides and other organic residues in environmental matrices: a critical review // *Analyt. Bioanal. Chem.* 2014. V. 406 (17). P. 4089–5116.
14. Lehotay S.J., Son K.A., Kwon H., Koesukwiwat U., Fu W.S., Mastovska K., Hoh E., Leepipatiboon N. Comparison of QuEChERS sample preparation methods for the analysis of pesticide residues in fruits and vegetables // *J. Chromatogr. A*. 2010. V. 1217 (16). P. 2548–2560.
15. Мырзапаязова С.Б., Полотов И.Ж., Сапаров К.К. Исследование содержания хлорорганических пестицидов в растительных продуктах // *Вестн. Ошск. гос. ун-та*. 2019. № 2. С. 13–16.
16. Перфилова О.В. Яблочные выжимки как источник биологически активных веществ в технологии продуктов питания // *Новые технол.* 2017. № 4. С. 65–71.
17. Климова Е.В. Определение содержания остатков пестицидов (в том числе из классов хлор-, фосфорорганических соединений, карбаматов, пиретроидов, триазолов, дикарбоксимидов, стробилуринов) в яблоках, выращенных в условиях традиционной (химической) и интегрированной систем защиты растений (Болгария) // *Пищ. и перерабат. пром-ть. Реферат. журн.* 2012. № 1. С. 179.
18. Dasika R., Tangirala S., Naishadham P. Pesticide residue analysis of fruits and vegetables // *J. Environ. Chem. Ecotoxicol.* 2012. V. 4 (2). P. 19–28.
19. El Hawari K., Mokh S., Al Iskandarani M., Halloum W., Jaber F. Pesticide residues in Lebanese apples and health risk assessment // *Food Additiv. Contamin. Part B*. 2019. V. 12 (2). P. 81–89.

Sample Preparation of QuEChERS in the Determination of Pesticides in Apples by Chromatography-Mass Spectrometry

A. Z. Mukharlyamova^{a,#}, M. V. Balymova^a, A. G. Mukhammetshina^a,
K. Ye. Burkin^a, and F. A. Bekmuratova^a

^a*Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (FSBSI "FCTRBS-ARRVI")
Nauchny Gorodok-2, Kazan 420075, Republic of Tatarstan, Russia*

[#]*E-mail: muharlyamova82@mail.ru*

Optimal conditions of gas chromatographic analysis with mass spectrometric detection (GC-MS) were selected, which allowed to obtain satisfactory separation and identification of some organochlorine (OCP) and organophosphorus (OPP) pesticides. Several sorbents were studied at the stage of extract purification in order to reduce the matrix effect in order to achieve higher analysis accuracy. The completeness of the extraction of OCP and OPP from the apple matrix was evaluated using the example of the following pesticides: hexachlorocyclohexane (HCH, α -, β - and γ -isomers), dimethoate, phosalone, chlorpyrifos. It was found that the most effective was the use of Florisil sorbent in combination with MgSO₄, which allowed to minimize matrix effects and obtain the best indicators of the extraction degree of the investigated analytes. This method was used to monitor the content of residual amounts of pesticides in apples of different varieties.

Key words: gas chromatography, mass spectrometry, QuEChERS sample preparation, organochlorine pesticides, organophosphorus pesticides, apples.

УДК 632.954

НЕГАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕРБИЦИДОВ ГРУППЫ ИМИДАЗОЛИНОВ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ[§]

© 2023 г. В. В. Бычкова^{1,2,*}, И. А. Сазонова^{1,2}, П. С. Пиденко²,
С. А. Пиденко², Н. А. Бурмистрова²

¹Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы
410050, Саратов, 1-й Институтский пр., 4, Россия

²Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410012 Саратов, ул. Астраханская, 83, Россия

*E-mail: bychkova_vv@list.ru

Поступила в редакцию 28.10.2022 г.

После доработки 02.11.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

В настоящее время при использовании агрохимических способов борьбы с сорными растениями наилучшие результаты демонстрируют схемы на основе использования в севооборотах гербицидов сплошного действия в сочетании с селективными гербицидами, не оказывающими заметного угнетающего действия на возделываемые сельскохозяйственные культуры. Гербициды группы имидазолинов являются хорошо известными представителями селективных гербицидов, коммерческие препараты на их основе широко представлены на рынке. В то же время известны негативные последствия использования гербицидов группы имидазолинов, приводящие к нарушению естественного почвенного биоразнообразия, угнетению развития и снижению урожайности последующих культур в севооборотах и возникновению резистентных сорняков. В работе рассмотрены механизмы действия гербицидов группы имидазолинов, современное состояние методов их анализа в почве, а также подходы к снижению негативных эффектов при их использовании.

Ключевые слова: гербициды, имидазолины, имазапир, имазамокс, имазапик, методы анализа в почве, резистентность, негативное действие.

DOI: 10.31857/S0002188123020060, **EDN:** MSAXSU

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы высокой засоренности посевов сельскохозяйственных культур является крайне важным для развития устойчивого аграрного производства [1, 2]. Использование гербицидов в севооборотах в значительной степени позволяет решить данный вопрос. Однако при постоянном использовании гербицидов в севооборотах наблюдается комплекс негативных эффектов, связанных с их воздействием на окружающую среду и здоровье человека [3–5]. Данные эффекты критически важны для устойчивых гербицидов, к которым относятся имидазолины, которые широко применяют в сельском и лесном хозяйстве с 1984 г. [6, 7].

В настоящей работе рассмотрены механизмы действия гербицидов группы имидазолинов и современное состояние методов анализа имида-

золинов в почве. Особое внимание уделено обсуждению негативных эффектов при использовании имидазолинов, а также подходов и способов их минимизации.

ГЕРБИЦИДЫ ИМИДАЗОЛИНОВОГО РЯДА, КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Гербициды группы имидазолинов относятся к селективным гербицидам, избирательное действие которых может быть обусловлено различными причинами [8]. К гербицидам группы имидазолинов принадлежат соединения, имеющие в составе замещенное имидазольное кольцо, а также гетероциклические или ароматические фрагменты с различными функциональными группами (рис. 1).

Препараты, полученные на основе гербицидов группы имидазолинов, активны в отношении злаковых и двудольных сорняков (имазамокс, метазахлор, имазетапир), однолетних и многолет-

[§]Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 22-16-00102.

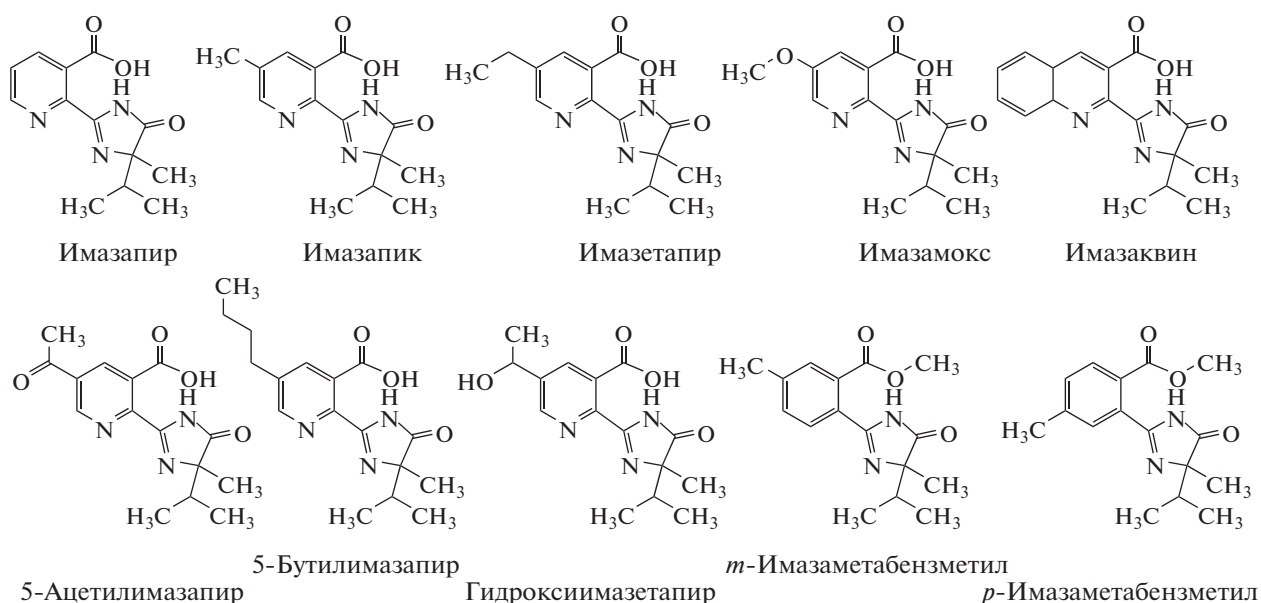


Рис. 1. Представители гербицидов группы имидазолинонов.

них трав, широколиственных растений и древесно-кустарниковой растительности (имзапир). Важным фактором, обуславливающим широкое применение данной группы гербицидов, является их высокая эффективность при сравнительно низких дозах и относительно низкая токсичность для животных [7, 9].

Механизм действия имидазолинонов обусловлен их способностью ингибировать фермент ацетогидроксикислотную синтазу (АНАС, ацетолактат-синтаза), которая отвечает за синтез разветвленных аминокислот, таких как лейцин, изолейцин и валин растений и микроорганизмов [10]. Поглощение имидазолинонов листьями и корнями растений и проникновение в меристему приводит к нарушению процесса синтеза белка и нуклеиновых кислот и, как следствие, препятствует прорастанию семян, росту и развитию восприимчивых к имидазолинонам растений, в том числе многих видов сорняков. Фитотоксические эффекты и генетические изменения при использовании имидазолинонов отмечают как в неустойчивых, так и в устойчивых к ним видах растений [11, 12]. Гербициды группы имидазолинонов могут достаточно долго сохраняться в поверхностном слое почвы, препятствуя прорастанию семян [13].

Активность гербицидов группы имидазолинонов на растения зависит от многих факторов, в том числе почвенно-климатических, а также доз и сроков применения препаратов [14–16]. Имидазолиноны способны накапливаться в почве, увеличивая ее фитотоксичность. При этом уста-

новлены корреляции между содержанием остаточных количеств имидазолинонов в почве и ее составом [17, 18]. Вследствие высокой устойчивости имидазолинонов фитотоксические свойства почвы могут сохраняться различное время от нескольких месяцев (имазетапир) до 2-х лет (имзапир) [19]. Основным способом деструкции имидазолинонов является биodeградация [20], которая происходит в стерильной почве в 2.3–4.4 раза медленнее по сравнению с таковой в естественных условиях [21].

УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ К ДЕЙСТВИЮ ГЕРБИЦИДОВ ГРУППЫ ИМИДАЗОЛИНОНОВ

Устойчивость к действию гербицидов у растений приобретает с помощью традиционных методов биотехнологии, а также в результате генетических модификаций. Гены устойчивости к действию гербицидов могут возникать спонтанно или в результате потери чувствительности пораженного участка после многократного воздействия гербицида [22, 23]. Таким способом в 1993 г. выделен устойчивый к имидазолинонам рис (*Oryza sativa* L), из единственного выжившего растения, полученного путем химического мутагенеза [24]. Эффективность применения имазетапира составляет до 93% при борьбе с красным рисом (*Oryza sativa* var *slyvatica* L.) при внесении 70–140 г/га после появления всходов. Препараты имазетапира успешно используют для борьбы с сорным красным рисом [25].

Для других культур, в частности подсолнечника (*Helianthus annuus* L.), применяют технологии, не предполагающие введения чужеродного генетического материала и вызывающие толерантность к гербицидам группы имидазолинонов в результате природной мутации гена *ALS* (*Amyotrophic Lateral Sclerosis*) [26, 27].

Другими примерами устойчивых к имидазолинонам культурных растений, полученных нетрансгенным путем, являются соя (*Glycine max* L.) [28, 29] и нут (*Cicer arietinum*) [30–32].

Использование различных генетических методов позволило получить широкий ряд устойчивых к имидазолинонам трансгенных растений, таких как кукуруза (*Zea mays* L.), пшеница (*Triticum aestivum* L.), рис (*Oryza sativa* L. *Indica*), рапс (*B. napus* L.) и подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) [33–35].

Значительное распространение устойчивых к гербицидам трансгенных сельскохозяйственных растений приводит к быстрому увеличению числа резистентных, в том числе к имидазолинонам, сорных растений [34]. На конец 2021 г. в мире зарегистрирован 191 случай устойчивости сорняков к имидазолинонам [36].

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИМИДАЗОЛИНОНОВ

Разработка современных и доступных методов определения имидазолинонов в почве и сельскохозяйственной продукции на уровнях 1 мкг/кг является необходимым для успешного развития интенсивных сельскохозяйственных технологий. Контроль за содержанием гербицидов группы имидазолинонов включает методы определения отдельных аналитов [37], энантиомеров [15, 38] и при их совместном присутствии с другими гербицидами [39–41]. Наиболее распространенными методами для определения имидазолинонов являются хроматографические методы в сочетании со спектрофотометрическими (УФ) и масс-спектрометрическими (МС) детекторами — газовая хроматография (ГХ) [18], высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) [15, 42, 43], мицеллярная электрокинетическая хроматография [43].

Значительное внимание при разработке методов определения гербицидов уделяется совершенствованию отдельных стадий анализа, которые включают этапы пробоподготовки и предварительной подготовки проб. Стадии предварительного извлечения и концентрирования аналитов, которые позволяют снизить пределы обнаружения ($c_{\min}$) аналитов и устранить мешающее влияние компонентов матрицы, должны быть экономически вы-

годными и соответствовать принципам “зеленой” химии [45]. Разделение и предварительное концентрирование имидазолинонов, как и других гербицидов, проводится методами жидкостной (ЖЖЭ) и твердофазной (ТФЭ) экстракции. Определенные трудности связаны с полярностью молекул имидазолинонов, что не позволяет проводить ЖЖЭ-ацетонитрилом или метанолом, которые широко используют при одновременном определении различных групп гербицидов.

Подход к оптимизации условий ВЭЖХ-УФ для одновременного определения имазапика и имазапира в щелочных экстрактах (0.5 М NaOH) предложен в работе [46]. Разработанный метод позволяет определить имазапик и имазапир в образцах воды и почвы при их одновременном присутствии с пределом обнаружения 0.45 и 0.25 мг/л соответственно. ЖЖЭ 0.5 М NaOH и ВЭЖХ-УФ-определение использовали для оценки уровня загрязнения имазапиком и имазапиром почв рисовых полей [47]. Смесь ацетонитрил—вода (80 : 20% об.) в сочетании с ВЭЖХ-МС использовали для простого и экспрессного метода одновременной идентификации и определения 111 пестицидов различных классов, в том числе имазапира и имазетапира, в пищевых продуктах и природных объектах ($c_{\min}$ — 0.05 (0.1) мкг/(л) кг) [39].

Аналитические схемы, включающие извлечение, очистку экстрактов, получение летучего производного имазамокса и условия ГХ-разделения на насадочных колонках различной химической природы, рассмотрены в работе [48]. Показано, что после ЖЖЭ-раствором NaOH предел обнаружения имазамокса в почве составил 0.02 мг/кг, полнота извлечения — 76.8%.

Возможность одновременного определения остаточных количеств пестицидов различной природы в почве методом ВЭЖХ-МС/МС с использованием различных элюентов изучена в [40]. Показано, что наиболее эффективным методом является последовательная экстракция метанолом и водой. Степень извлечения имидазолинонов при их определении одновременно с другими пестицидами на уровнях 1/10 мкг/кг составила 43/56 и 73/58% для имазетапира и имазапира соответственно.

Процедура чувствительного (5 мг/кг) экспресс-анализа (20 мин) ряда имидазолинонов (имазамокс, имазапик, имазапир, имазахин и имазетапир) в почве основана на ВЭЖХ-МС/МС-определении при использовании комбинации ЖЖЭ-аналитов водным раствором ацетата аммония (0.5 М) и дисперсионной ТФЭ [41].

Сравнение 3-х методов пробоподготовки (ультразвуковая экстракция, матричное твердофазное диспергирование, ТФЭ) проводили при изучении устойчивости премиксов имазетапира и имазамокса в глинистых и супесчаных почвах методом ГХ-МС/МС [18]. Показатели извлечения гербицидов уменьшались в ряду матричное твердофазное диспергирование > ТФЭ > ультразвуковая экстракция.

Двумерная ЖХ (2D-ЖХ) с многоволновым УФ-детектором позволила провести одновременное прямое определение энантиомеров имазапира, имазетапира и имазаметабенза [49]. В работе использовали последовательное разделение гербицидов на ахиральной колонке C18 и их энантиомеров с использованием хирального белка AGPTM. Полученные параметры энантиомеров (энантиомерное разрешение >1.12, энантиомерное отношение ~1, энантиомерная доля ~0.5) показали, что гербициды присутствуют в почве в виде рацематов.

Основными направлениями в плане совершенствования методов пробоподготовки гербицидов являются: 1 — уменьшение количества токсичных реагентов и растворителей, в частности за счет миниатюризации и автоматизации [50] и 2 — использование альтернативных прямых аналитических методов определения, не требующих реагентов или растворителей [51]. В частности, известны примеры определения имидазолинонов методами биоанализа [52, 53].

Особого внимания заслуживает метод QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe), который позволяет существенно уменьшить объем проб и растворителей по сравнению с традиционными ЖЖЭ и ТФЭ и успешно применяется при определении остаточных количеств имидазолинонов в различных матрицах [37, 44, 54]. QuEChERS основан на экстракции аналитов ацетонитрилом и включает дополнительную стадию очистки на основе дисперсионно-твердофазной экстракции. Опыт сочетания пробоподготовки QuEChERS и мицеллярной электрокинетической хроматографии представлен в работе [44] и использован для определения в почве 23-х совместно используемых пестицидов различных классов, в том числе имазапира (степень извлечения — $41 \pm 8\%$, $c_{\text{мин}}$ — 0.015 мг/кг). QuEChERS в сочетании с трехквადрупольной ЖХ-МС/МС использовали для оценки периода полураспада имазетапира и имазапира [37]. Предложенный метод характеризуется достаточно высокой чувствительностью и селективностью и позволил определить имазетапир/имазапик в почвах с пределами обнаружения 2.2/2.0 и нижней границей определяе-

мых содержаний 6.6/6.1 мкг/кг соответственно. Одновременный анализ энантиомеров имазетапира, имазамокса и имазапира в различных культурах (соя, арахис, пшеница, кукуруза, рис) реализован при использовании QuEChERS в сочетании с ВЭЖХ-МС/МС [54].

В ряде работ рассмотрена возможность использования в качестве материала для ТФЭ имидазолинонов полимеров с молекулярными отпечатками (молекулярно-импринтированных полимеров, МИП). Синтез МИП для имазетапира на поверхности стеклянных капилляров описан в работе [55]. Предложенный подход к ТФЭ в сочетании с ВЭЖХ использовали для определения 5-ти имидазолинонов. Степень извлечения аналитов составила в образцах риса 60.6–99.5%, арахиса — 79.1–123% и почвы — 61.3–116%, линейный диапазон для имазамета, имазамокса, имазопировой кислоты и имазетапира — 0.50–50 мкг/л, для имзахиновой кислоты — 1.0–100 мкг/л, предел обнаружения — 0.070–0.29 мкг/л.

МИП для имазетапира на поверхности хлорметилированной полистирольной смолы использовали для определения имазетапира в образцах почвы методом ВЭЖХ-УФ в диапазоне 0.10–5.00 мкг/мл, $c_{\text{мин}}$ — 15 нг/г [56]. Высокая степень извлечения имазетапира 91.1–97.5% позволила определить следовые количества гербицида в почвах.

Синтез МИП на поверхности магнитных микрочастиц для определения имазетапира предложен в работе [57]. МИП характеризуется высокими адсорбционными свойствами (34.85 мг/г). Показано, что при определении аналита методом ВЭЖХ-УФ в искусственно загрязненных образцах молока степень извлечения составила 86.9–103.2% в диапазоне 5–100 мкг/л с пределом обнаружения 2.13 мкг/л.

НЕГАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМИДАЗОЛИНОНОВ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В последние годы отмечено постоянное увеличение использования гербицидов в сочетании с устойчивыми к гербицидам сельскохозяйственными культурами и, как следствие, рост нагрузки на окружающую среду [58]. Известно, что для эффективного разложения остатков гербицидов в почве необходимо соблюдение некоторых почвенно-климатических условий: достаточная влажность почвы, необходимый уровень pH, а также повышенная температура. В засушливых условиях, а также в условиях низких температур скорость деградации гербицидов почвенной микробиотой

может быть значительно снижена, что приводит к накоплению гербицидов и их сохранности в почве до следующего сезона [59], к изменению почвенного биоразнообразия [60], развитию устойчивых сорняков и самопроизвольному появлению новых растений из-за утечки генов среди родственных видов [34, 61–63]. Например, при перекрестном опылении может происходить обмен генов (перенос трансгенного признака) между растениями одного или разных видов. В результате ауткроссинга определенных культур такие признаки как устойчивость к гербицидам, а также утечка генов от сельскохозяйственных культур к близкородственным сорным растениям и наоборот являются актуальной и серьезной проблемой. Примером может служить передача генов от культурного подсолнечника к диким видам, наиболее устойчивым к действию имидазолинона. Другим примером передачи трансгенных признаков родственным сорнякам путем опыления [64] является возникновение гибридных форм между сортом зернового сорго (*Sorghum bicolor* L.) и родственным ему алеппским сорго (*S. halepense* L.) [65], пшеницей и эгилопсом цилиндрическим (*A. cylindrica*) [66], культурным и красным рисом (*Oryza sativa* var *sylvatica* L.) [67].

Негативным фактором является также действие гербицидов на окружающую среду и здоровье человека [68], их экотоксичность (побочное действие на почвенные микроорганизмы, сельскохозяйственную фауну и флору). На примере гидробионтов показана высокая токсичность для них новых химических классов гербицидов [9].

Вследствие применения гербицидов развивается устойчивая сорная растительность, приводящая к снижению урожайности сельскохозяйственных культур [69, 70]. Одним из таких сорняков является сорный рис (*Oryza sativa* f. *spontanea* или *Oryza sativa* complex), произрастающий на рисовых полях и признанный основным сорняком риса во всей Азии, который может привести к потере урожая от 5 до 100% [71, 72]. К негативным последствиям применения гербицидов можно также отнести развитие сорной растительности, связанной в том числе с перемещением генов в популяциях сорняков [33, 73]. Например, ген устойчивости к гербицидам, в частности к имазетапире, выявлен у канолы (*Brassica napus*) [74]. Подробные исследования устойчивости различных популяций *Alopecurus myosuroides* Huds к гербицидным комплексам с использованием имидазолинонов представлены в работе [75].

Одним из недостатков использования устойчивых к гербицидам растений является появление “суперсорняков”, которые возникают в ре-

зультате естественного переноса сорняками гена устойчивости к устойчивым к гербицидам культурным растениям [34].

В то же время использование имидазолинонов в некоторых случаях является практически безальтернативным, например при борьбе с заразной подсолнечника. Предлагают на сегодняшний день схемы борьбы с заразной подсолнечника препаратами на основе трибенурон-метила в связи с необходимостью возделывания гибридов, устойчивых не менее чем к 8-ми расам заразы и отсутствием действия трибенурон-метила на злаковые сорняки и двудольные сорняки на средних и поздних стадиях вегетации.

На современном этапе выявлено, что большинство сортов и гибридов сельскохозяйственных культур характеризуются повышенной чувствительностью к действию гербицидов группы имидазолинонов. Оставшееся количество препарата в почве может вызвать негативное влияние на культуры в севообороте. Выявлено, что в результате использования имазетапира наблюдали отрицательное влияние на кукурузу (*Zea mays* L.) [76], а у таких культур, как перец чили (*Capsicum annuum* L.), сахарная свекла (*Beta vulgaris* L.) и томаты (*Solanum lycopersicum* L.) проявлялась высокая чувствительность к имазетапире через 300 сут после применения [77]. Традиционным подходом снижения негативного последствия гербицидов группы имидазолинонов является научно обоснованные севообороты. С целью снижения высокой активности гербицидов группы имидазолинонов в почве и негативного влияния на пшеницу (*Triticum aestivum* L.) и ячмень (*Hordeum vulgare* L.) необходимо выдерживать период покая между посевами до 540 сут [66]. В опыте по изучению влияния имидазолинонов на культуры ячменя (*Hordeum vulgare* L.), овса (*Avena sativa*) и пшеницы (*Triticum aestivum* L.) показано, что смесь имазамокса и имазапипера оказывала наименьший негативный эффект на эти культуры, чем имазапир в чистом виде. Это связано с высоким накопительным эффектом имазапипера в почве. Также исследование показало, что ячмень (*Hordeum vulgare* L.) был более чувствителен к имидазолинонам, чем другие озимые злаки [78]. Изучено влияние остаточных количеств имидазолинонов в почве при использовании смеси имазамокса (33 г) и имазапипера (15 г) в производстве устойчивого подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) на рост и урожайность последующих культур в севообороте (озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), ячменя (*Hordeum vulgare* L.), озимого масличного рапса (*Brassica napus* L.), кукурузы (*Zea mays* L.) и сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.))

[79]. Показано, что через 4 мес. после применения смеси на участках подсолнечника, рост и урожайность семян значительно снизились (на 35.7 и 23.7% соответственно). При посеве сахарной свеклы через 9 мес. после применения смеси на этих участках показатели урожайности свеклы снизились на 26.7 и 11.6% соответственно. Только на 2-й год на тех же участках севооборота изученные показатели рапса и сахарной свеклы существенно не пострадали от остатков смеси [79].

В то же время комплексный характер почвенной матрицы, ее неоднородность по составу и гидрогеологическим условиям в пределах даже небольших по площади полей снижают эффективность описанного выше подхода. Альтернативный вариант снижения негативных последствий имидазолинов гербицидов представлен в работе [80]. В работе описан препарат на основе полидиаллилдиметиламмоний-хлорида и монтмориллонита с контролируемым высвобождением имазапира. Связывание имазапира с матрицей позволяет уменьшить скорость его вымывания и, как следствие, снизить уровень загрязнения почвы и воды. Показана возможность электростатических взаимодействий поликатиона с поверхностью и интеркаляции поликатиона в монтмориллоните. Добавление высоких концентраций имазапира в композит 0.16 г/г позволяет достигать высокой гербицидной нагрузки (66% активного имазапира). Биотесты в почвенной колонке показали снижение вымывания имазапира более чем в 2 раза при сохранении хорошей гербицидной активности. К сожалению, коммерческие препараты с использованием данного подхода до сих пор не разработаны.

В работе [81] предложен метод снижения остаточной концентрации имидазолинов в почве путем внесения композита β -циклодекстрина и хитозана. Сорбция имидазолинов на композите позволила достичь уровня остаточных концентраций имидазолинов ниже пределов детектирования в течение 21 сут во всех исследованных почвах.

Перспективным способом снижения остаточного уровня гербицидов ряда имидазолинов в почве является использование специализированных биологических препаратов. На рынке РФ представлен препарат на основе живой культуры штамма *Rhodococcus erythropolis* [82]. *Rhodococcus erythropolis* выделяет в окружающую среду ряд гидролитических ферментов, активно расщепляющих молекулы гербицидов на безопасные компоненты. Очевидно, что несмотря на положительный эффект от применения подобных препаратов, их использование связано со значительными ограни-

чениями, в первую очередь с необходимостью поддержания достаточной влажности почвы и отсутствием в ней следов препаратов, негативно влияющих на используемую живую культуру. Разработчики отмечали снижение популяции активного штамма в течение достаточно быстрого времени, которое вероятно может значительно уменьшиться при взаимодействии с активной аборигенной почвенной микробиотой.

Метод фиторемедиации почв от остатков имидазолинов представлен в работе [83]. Было изучено 7 видов растений: канавалия мечевидная (*Canavalia ensiformis*), соя (*Glycine max*), рис (*Oryza sativa*), плевел многоцветковый (*Lolium multiflorum*), горошек посевной (*Vicia sativa*) и консорциум лядвенец рогатый (*Lotus corniculatus*) + клевер ползучий (*Trifolium repens*) на предмет их способности фитостимулировать почву и усиливать деградацию имазетапира, имазапика и имазапира. Биodeградацию имидазолинов оценивали путем количественного определения остатков гербицидов в почве методом ЖХ. Отметили, что бобовые виды *Canavalia ensiformis*, *Glycine max*, *Vicia sativa* и консорциум *Lotus corniculatus* + *Trifolium repens* показали большую способность стимулировать рост почвенных микробов, что привело к средним показателям биodeградации 91, 92 и 93% для гербицидов имазетапир, имазапик и имазапир соответственно.

Фитотоксическое последствие имидазолинов на сидеральную культуру — озимое тритикале изучено в работе [84]. Показано, что применение приема сидерации с использованием регулятора роста снижало последствие имидазолинов в 5–10 раз в зависимости от почвенно-климатических условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение гербицидов ряда имидазолинов является быстроразвивающимся и крайне эффективным агротехническим приемом при культивировании значительного числа основных сельскохозяйственных культур. Возделывание устойчивых к имидазолинам растений позволяет повысить урожайность, при этом снизить экономические затраты на обработку почвы и механическую очистку семян от сорных примесей. В то же время гербицидам этой группы свойственны недостатки, связанные со значительными ограничениями в севооборотах, возможностью развития резистентных сорняков и потенциальному снижению почвенного биоразнообразия и плодородия.

Для совершенствования технологий использования гербицидов группы имидазолинов необ-

ходимо расширять и углублять исследования по созданию альтернативных методов и способов снижения негативных последствий использования гербицидов этой группы и разработке более доступных и эффективных методов их контроля в почвах и сельскохозяйственных растениях.

Пиденко П.С. благодарит Совет по грантам Президента РФ (стипендия № СП-1690.2022.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов Ю.Я., Жемчужин С.Г., Королева Л.М., Босак Г.С. Современное состояние проблемы изучения и применения гербицидов (дайджест публикаций за 2017–2019 гг.) // *Агрохимия*. 2021. № 3. С. 88–96.
2. Спиридонов Ю.Я., Жемчужин С.Г., Клейменова И.Ю., Босак Г.С. Современное состояние проблемы изучения и применения гербицидов (дайджест публикаций за 2014–2017 гг.) // *Агрохимия*. 2019. № 6. С. 81–91.
3. Rani L., Thapa K., Kanojia N., Sharma N., Singh S., Grewal A.S., Srivastav A.L., Kaushal J. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment // *J. Clean. Prod.* 2021. V. 283. № 10. P. 124657.
4. Koutros S., Silverman D.T., Alavanja M.C.R., Andreotti G., Lerro C.C., Heltshe S., Lynch C.F., Sandler D.P., Blair A., Freeman L.E.B. Occupational exposure to pesticides and bladder cancer risk // *Inter. J. Epidemiol.* 2016. V. 45. № 3. P. 792–805.
5. Golombieski J.I., Sutili F.J., Salbego J., Seben D., Gressler L.T., da Cunha J.A., Gressler L.T., Zanella R., Vaucher R. de A., Marchesan E., Baldisserotto B. Imazapyr + imazapic herbicide determines acute toxicity in silver catfish *Rhamdia quelen* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* V. 128. P. 91–99.
6. Peoples T.R. Arsenal herbicide (AC 252925): A developmental overview // *Proc. South. Weed Sci. Soc.* 1984. V. 37. P. 378–387.
7. Shaner D.L. Imidazolinone herbicides // *Encyclopedia of agrochemicals* / Eds. Plummer D., Ragsdale N. Hoboken: John Wiley and Sons, 2003. P. 769–784.
8. Hathway D.E. Molecular mechanisms of herbicide selectivity. Oxford Univ. Press, 1989. 214 p.
9. Федорова А.А., Зинчук О.А., Бессчетнова Л.М., Сороколетова Г.В. Хроническая токсичность имидазолинонового гербицида имазетапир для пресноводных организмов разных систематических групп // *Научн. журн. КубГАУ*. 2016. № 123. С. 1–12.
10. Болтухина Е.В., Чернышев В.П., Шешенев А.Е., Каракотов С.Д. Перспективы применения гербицида имазамокс // *Вестн. защиты раст.* 2017. Т. 91. № 1. С. 38–42.
11. Arda H., Kaya A., Alyuruk G. Physiological and genetic effects of imazamox treatment on imidazolinone-sensitive and resistant sunflower hybrids // *Water Air Soil Pollut.* 2020. V. 231. № 3. P. 118.
12. Vega T., Gil M., Martin G., Moschen S., Picardi L., Nestares G. Stress response and detoxification mechanisms involved in non-target-site herbicide resistance in sunflower // *Crop Sci.* 2020. V. 60. № 4. P. 1809–1822.
13. Якимович Е.А., Сорока С.В., Ивашкевич А.А. Методические рекомендации по борьбе с борщевиком Сосновского. Минск: РНДUP “Институт защиты растений”, 2011. 76 с.
14. Bondareva L., Fedorova N. Pesticides: Behavior in agricultural soil and plants // *Molecules*. 2021. V. 26. № 17. P. 5370.
15. Buerge I.J., Bächli A., Kasteel R., Portmann R., López-Cabeza R., Schwab L.F., Poiger T. Behavior of the chiral herbicide imazamox in soils: pH-dependent, enantioselective degradation, formation and degradation of several chiral metabolites // *Environ. Sci. Technol.* 2019. V. 53. № 10. P. 5725–5732.
16. Bhardwaj L., Pandey J., Dubey S.K. Effects of herbicides on soil enzymes and their regulatory factors in agroecosystem: A Review // *Plant, Soil and Microbes in Tropical Ecosystems*. Springer Nature, 2021. 88 p.
17. Yavari S., Sapari N.B., Malakahmad A., Razali M.A.B., Gervais T.S., Yavari S. Adsorption–desorption behavior of polar imidazolinone herbicides in tropical paddy fields soils // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2020. V. 104. P. 121–127.
18. Rani D., Duhan A., Punia S.S., Yadav D.B., Duhan S. Behavior of pre-mix formulation of imazethapyr and imazamox herbicides in two different soils // *Environ. Monit. Assess.* 2019. V. 191. № 1. P. 1–8.
19. Senseman S.A. Herbicide handbook. 9th Edit. Weed Science Society of America, Champaign, 2007. 458 p.
20. Quivet E., Faure R., Georges J., Paisse J.O., Herbreteau B. Kinetic studies of imazapyr photolysis and characterization of the main photoproducts // *Toxicol. Environ. Chem.* 2004. V. 86. № 4. P. 195–204.
21. Wang X.D., Zhou S.M., Wang A.L. Biodegradation of imazapyr in typical soils in Zhejiang Province, China // *J. Environ. Sci.* 2005. V. 17. № 4. P. 593–597.
22. Gray J., Shattuck J., Bradford K. Herbicide tolerance in agricultural crops, biotechnology for sustainability // *Biotechnol. Agric. Forest.* 2010. V. 67. P. 211–236.
23. Duke S.O. Taking stock of herbicide-resistant crops ten years after introduction // *Pest Manag. Sci.* 2005. V. 61. P. 211–218.
24. Steele G.L., Chandler J.M., McCauley G.N. Control of red rice (*Oryza sativa*) in imidazolinone-tolerant rice (*O. sativa*) // *Weed Technol.* 2002. V. 16. № 3. P. 627–630.
25. Jin M., Chen L., Deng X.W., Tang X. Development of herbicide resistance genes and their application in rice // *Crop J.* 2021. V. 10. № 1. P. 26–35.
26. Pfenning M., Palfay G., Guillet T. The Clearfield® technology – A new broad-spectrum post-emergence weed control system for European sunflower growers // *J. Plant Dis. Protect.* 2008. V. 21. P. 649–654.
27. Arda H., Kaya A., Alyuruk G. Physiological and genetic effects of imazamox treatment on imidazolinone-sensitive and resistant sunflower hybrids // *Water Air Soil Pollut.* 2020. V. 231. № 3. P. 1–12.
28. Parihar B.S., Tripathi B.P., Sinha P.K. Effect of chemical weed management in yield and economics of soy-

- bean (*Glycine max* L.) // J. Pharm. Phytochem. 2019. V. 8. № 6. P. 2289–2290.
29. Vijay J., Mallareddy M., Shekar K., Reddy T.P., Padmaja B. Effect of sequential application of herbicides on weed control in soybean (*Glycine max*) // Inter. J. Pure App. Biosci. 2018. V. 6. № 1. P. 543–546.
 30. Jefferies M.L., Willenborg C.J., Tar'an B. Response of conventional and imidazolinone-resistant chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars to imazamox and/or imazethapyr applied post-emergence // Canad. J. Plant Sci. 2016. V. 96. № 1. P. 48–58.
 31. Kashyap A.K., Kushwaha H.S., Mishra H. Effect of herbicides on weeds, yield and economics of chickpea // Indian J. Weed Sci. 2022. V. 54. № 2. P. 182–186.
 32. Galili S., Hershenhorn J., Edelman M., Sobolev V., Smirnov E., Amir-Segev O., Bellalou A., Dor E. Novel mutation in the acetohydroxyacid synthase (AHAS), gene confers imidazolinone resistance in chickpea *Cicer arietinum* L. plants // Plants. 2021. V. 10. № 12. P. 2791.
 33. Knezevic S.Z. Use of herbicide-tolerant crops as part of an integrated weed management program. 2010. <https://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/g1484.pdf>. (дата обращения: 18.10.2022).
 34. Prakash N.R., Chaudhary J.R., Tripathi A., Joshi N., Padhan B.K., Yadav S., Kumar R. Breeding for herbicide tolerance in crops: a review // Res. J. Biotechnol. 2020. V. 15. № 4. P. 154–162.
 35. Shoba D., Raveendran M., Manonmani S., Utharasu S. Development and genetic characterization of a novel herbicide (Imazethapyr) tolerant mutant in rice (*Oryza sativa* L.) // Rice. 2017. V. 10. № 1. P. 1–12.
 36. Heap I. The international herbicide-resistant weed database. <http://www.weedscience.org/Pages/SOASummary.aspx> (дата обращения: 18.10.2022).
 37. da Costa Marinho M.I., Costa A.I.G., Vieira N.M., Paiva M.C.G., de Freitas F.C.L., da Silva A.A. Validation and application of a QuEChERS based method for estimation of half-life of imidazolinone herbicides in soils by LC-ESI-MS/MS // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2019. V. 167. № 15. P. 212–217.
 38. Polo-Díez L.M., Santos-Delgado M.J., Valencia-Cabrerizo Y., León-Barrios Y. Simultaneous enantiomeric determinations of acid and ester imidazolinone herbicides in a soil sample by two-dimensional direct chiral liquid chromatography // Talanta. 2015. V. 144. P. 375–381.
 39. Амелин В.Г., Андоралов А.М. Высокоэффективная жидкостная хроматография времяпролетная масс-спектрометрия в идентификации и определении 111 пестицидов в пищевых продуктах, кормах, воде и почве // Журн. аналит. хим. 2016. Т. 71. № 1. С. 85–95.
 40. Colazzo M., Pareja L., Cesio M.V., Heinzen H. Multi-residue method for trace pesticide analysis in soils by LC-QQQ-MS/MS and its application to real samples // Inter. J. Environ. Anal. Chem. 2018. V. 98. № 14. P. 1292–1308.
 41. Kemmerich M., Bernardi G., Adaime M.B., Zanella R., Prestes O.D. A simple and efficient method for imidazolinone herbicides determination in soil by ultra-high performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry // J. Chromatograph. A. 2015. V. 1412. P. 82–89.
 42. Определение остаточных количеств имазамокса и имазапира в семенах подсолнечника, сои и растительных маслах при совместном присутствии методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Метод. указ. МУК 4.1.2214-07. Роспотребнадзор, 2009.
 43. Krynitsky A.J., Stout S.J., Nejad H., Cavalier T.C. Multiresidue determination and confirmation of imidazolinone herbicides in soil by high-performance liquid chromatography/electrospray ionization mass spectrometry // J. AOAC Inter. 1999. V. 82. № 4. P. 956–962.
 44. Большаков Д.С., Амелин В.Г., Третьяков А.В. Опыт сочетания пробоподготовки QuEChERS и мицеллярной электрокинетической хроматографии при определении пестицидов в почве // Агрохимия. 2014. № 2. С. 81–91.
 45. Jagirani M.S., Ozalp O., Soylak M. New trend in the extraction of pesticides from the environmental and food samples applying microextraction based green chemistry scenario: A review // Crit. Rev. Anal. Chem. 2022. V. 52. № 6. P. 1343–1369.
 46. Bajrai F.S.M., Ismail B.S., Mardiana-Jansar K. Optimization method for simultaneous extraction and detection of imazapic and imazapyr herbicides in soil and water using HPLC-UV with verification of LC-MS // Sains Malaysiana. 2017. V. 46. № 12. P. 2339–2348.
 47. Bzour M., Zuki F.M., Mispan M.S., Jodeh S., Abdel-Latif M. Determination of the leaching potential and residues activity of imidazolinone herbicide in clearfield rice soil using high-performance liquid chromatography // Bul. Environ. Contam. Toxicol. 2019. V. 103. № 2. P. 1–8.
 48. Кислушко П.М., Арашкович С.А. Определение остаточных количеств имазамокса в растениях гороха, почве и воде методом газожидкостной хроматографии // Защита растений. 2022. Т. 41. С. 287–295.
 49. Polo-Díez L.M., Santos-Delgado M.J., Valencia-Cabrerizo Y., León-Barrios Y. Simultaneous enantiomeric determinations of acid and ester imidazolinone herbicides in a soil sample by two-dimensional direct chiral liquid chromatography // Talanta. 2015. V. 144. P. 375–381.
 50. Pena-Pereira F., Bendicho C., Pavlović D.M., Martín-Esteban A., Díaz-Álvarez M., Pan Y., Cooper J., Yang Z., Safarik I., Pospiskova K., Segundo M.A. Miniaturized analytical methods for determination of environmental contaminants of emerging concern – a review // Anal. Chim. Acta. 2021. V. 1158. P. 238108.
 51. Armenta S., Garrigues S., De la Guardia M. Green analytical chemistry // TrAC Trends Anal. Chem. 2008. V. 27. № 6. P. 497–511.
 52. Wołejko E., Wydro U., Odziejewicz J.I., Koronkiewicz A., Jabłońska-Trypuć A. Biomonitoring of soil contaminated with herbicides // Water. 2022. V. 14. № 10. P. 1534.
 53. Liman R., Ciğerci İ.H., Öztürk N.S. Determination of genotoxic effects of Imazethapyr herbicide in *Allium cepa* root cells by mitotic activity, chromosome aberration, and comet assay // Pestic. Biochem. Phys. 2015. V. 118. P. 38–42.

54. *Li R., Hu M., Liu K., Zhang H., Li X., Tan H.* Trace enantioselective determination of imidazolinone herbicides in various food matrices using a modified QuEChERS method and ultra-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry // *Food Anal. Methods*. 2019. V. 12. № 12. P. 2647–2664.
55. *Chen Y., Feng T., Li G., Hu Y.* Molecularly imprinted polymer as a novel solid-phase microextraction coating for the selective enrichment of trace imidazolinones in rice, peanut, and soil // *J. Sep. Sci.* 2015. V. 38. № 2. P. 301–308.
56. *Zhou Y., Yang Y. i., Ma M., Sun Z., Wu S., Gong B.* Preparation of imazethapyr surface molecularly imprinted polymers for its selective recognition of imazethapyr in soil samples // *J. Anal. Methods Chem.* 2018. V. 2018. № 3. P. 1–9.
57. *Jia S., Zhou Y., Li J., Gong B., Ma S., Ou J.* Highly selective enrichment and direct determination of imazethapyr residues from milk using magnetic solid-phase extraction based on restricted-access molecularly imprinted polymers // *Anal. Methods*. 2021. V. 13. № 3. P. 426–435.
58. *Peerzada A.M., O'Donnell C., Adkins S.* Optimizing herbicide use in herbicide-tolerant crops: challenges, opportunities, and recommendations // *Agron. Crops*. 2019. P. 283–316.
59. *Gallans S., Carlson S.* Herbicide carryover injury to cover crops. <https://practicalfarmers.org/wp-content/uploads/2018/12/herbicide-injury.pdf>. (дата обращения: 18.10.2022).
60. *Satorre E.H., de la Fuente E.B., Mas M.T., Suárez S.A., Kruk B.C., Guglielmini A., Verdu A.M.C.* Crop rotation effects on weed communities of soybean (*Glycine max* L. Merr.) agricultural fields of the Flat Inland Pampa // *Crop Protect.* 2020. V. 130. P. 105068.
61. *Chen L.J., Lee D.S., Song Z.P., Suh H.S., Lu B.R.* Gene flow from cultivated rice (*Oryza sativa*) to its weedy and wild relatives // *Ann. Bot.* 2004. V. 93. № 1. P. 67–73.
62. *Sudianto E., Beng-Kah S., Ting-Xiang N., Saldain N.E., Scott R.C., Burgos N.R.* Clearfield® rice: Its development, success, and key challenges on a global perspective // *Crop Protect.* 2013. V. 49. P. 40–51.
63. *Bourdineaud J.P.* Toxicity of the herbicides used on herbicide-tolerant crops, and societal consequences of their use in France // *Drug Chem. Toxicol.* 2020. P. 1–24.
64. *Vrbničanin S., Božić D., Pavlović D.* Gene flow from herbicide-resistant crops to wild relatives // *Herbicide resistance in crops and weeds* / Ed. Pacanoski Z. InTechOpen, 2017. P. 37–63.
65. *Naidu V., Ranganath A.R.G.* Herbicide tolerant crops emerging tool in weed management // *Author Page No.* 2011. V. 173. P. 173.
66. *Seefeldt S.S., Zemetra R., Youngand F.L., Jones S.* Production of herbicide-resistance jointed goat grass (*Aegilops cylindrica*) × wheat (*Triticum aestivum*) hybrids in the field by natural hybridization // *Weed Sci.* 1998. V. 46. № 6. P. 632–634.
67. *Tan S., Evans R.R., Dahmer M.L., Singh B.K., Shaner D.L.* Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future // *Pest. Manag.* 2005. V. 61. № 3. P. 246–257.
68. *Hunt N., Hill J., Liebman M.* Reducing freshwater toxicity while maintaining weed control, profits, and productivity: effects of increased crop rotation diversity and reduced herbicide usage *Environ // Sci. Technol.* 2017. V. 51. P. 1707–1717.
69. *Senior I.J., Dale P.J.* Herbicide-tolerant crops in agriculture: oilseed rape as a case study // *Plant Breeding*. 2002. V. 121. № 2. P. 97–107.
70. *Sharkey S.M., Williams B.J., Parker K.M.* Herbicide drift from genetically engineered herbicide-tolerant crops // *Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 55. № 23. P. 15559–15568.
71. *Azmi M., Karim S.M.R.* Weedy rice – biology, ecology and management // *Malaysian Agricultural Research and Development Institute (MARDI)*. Kuala Lumpur, 2008. 56 p.
72. *Ruzmi R., Ahmad-Hamdani M.S., Mazlan N.* Ser-653-Asn substitution in the acetohydroxyacid synthase gene confers resistance in weedy rice to imidazolinone herbicides in Malaysia // *PLoS One*. 2020. V. 15. № 9. P. e0227397.
73. *Ball D.A., Peterson C.J.* Herbicide tolerance in imidazolinone-resistant wheat for weed management in the Pacific Northwest USA. In *Wheat production in stressed environments*. Developments in Plant Breeding, V. 12. Springer, Dordrecht, 2007. P. 243–250.
74. *Hall L., Topinka K., Huffman J., Davis L., Good A.* Pollen flow between herbicide-resistant *Brassica napus* is the cause of multiple-resistant *B. napus* volunteers // *Weed Sci.* 2000. V. 48. P. 688–694.
75. *Löbmann A., Christen O., Petersen J.* Response of *Alopecurus myosuroides* Huds. to varying intensities of acetolactate synthase-inhibiting herbicides in a crop rotation including imidazolinone-tolerant oilseed rape // *J. Plant. Dis. Prot.* 2021. V. 128. P. 203–214.
76. *Curran W.S., Knake E.L., Liebl R.A.* Corn (*Zea mays*) following use of clomazone, chlorimuron, imazaquin, and imazethapyr // *Weed Technol.* 1991. V. 5. P. 539–544.
77. *Alister C., Kogan M.* Efficacy of imidazolinone herbicides applied to imidazolinone-resistant maize and their carryover effect on rotational crops // *Crop Protect.* 2005. V. 24. P. 375–379.
78. *Scursoni J.A., Montoya J.C., Vigna M.R., Gigón R., Istiart C., Pugni J.P.R., López R., Porfiri C.* Impact of imazamox and imazapyr carryover on wheat, barley, and oat // *Weed Technol.* 2017. V. 31. № 6. P. 838–846.
79. *Süzer S., Büyük H.* Residual effects of spraying imidazolinone-family herbicides on Clearfield®* sunflower

- production from the point of view of crop rotation // *Helia*. 2010. V. 33. № 52. P. 25–35.
80. *Radian A., Mishaal Y.G.* Characterizing and designing polycation–clay nanocomposites as a basis for imazapyr controlled release formulations // *Environ. Sci. Technol.* 2008. V. 42. № 5. P. 1511–1516.
 81. *Kaur P., Kaur P., Kaur N., Jain D., Singh K., Bhullar M.S.* Dissipation and phytotoxicity of imazethapyr and imazamox in soils amended with β -cyclodextrin-chitosan biocomposite // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 735. P. 139566.
 82. Bionovatic. Ресурсы. URL: <https://bionovatic.ru/catalog/restart>. (дата обращения: 10.09.2022).
 83. *Souto K.M., Jacques R.J.S., Zanella R., de Oliveira Machado S.L., Balbinot A., de Avila L.A.* Phytostimulation of lowland soil contaminated with imidazolinone herbicides // *Inter. J. Phytoremediat.* 2020. V. 22. № 7. P. 774–780.
 84. *Ладан С.С.* Фитотоксическое последствие имидазолинонов на сидеральную культуру и способы его уменьшения // *Плодородие*. 2021. № 6. С. 78–83.

Negative Effects of Imidazolinone Herbicides Usage: Problems and Desicions

V. V. Bychkova^{a,b,#}, I. A. Sazonova^{a,b}, P. S. Pidenko^b, S. A. Pidenko^b, and N. A. Burmistrova^b

^a*Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn
1st Institute Passage 4, Saratov 410050, Russia*

^b*Saratov Chernyshevsky State University
ul. Astrakhanskaya 83, Saratov 410012, Russia*

[#]*E-mail: bychkova_vv@list.ru*

Currently, in industrial agricultural production, the best results are demonstrated by technological schemes for weed control based on the use of complexes of non-selective and selective herbicides in crop rotations. Herbicides of the imidazolinone group are well-known representatives of selective herbicides class. Commercial drugs based on them are widely represented on the market. At the same time, the negative consequences of using herbicides of the imidazolinone group are well known. They lead to disruption of natural soil biodiversity, inhibition of growth and decreasing in the yield of subsequent crops in crop rotations and the emergence of resistant weeds. The manuscript discusses the mechanisms of action of herbicides of the imidazolinone group, the current state of methods of their analysis in the soil, as well as approaches to reducing the negative effects of their usage.

Key words: herbicides, imidazolinones, imazapir, imazamox, imazapik, methods of analysis in soil, resistance, negative effect.