

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Формирование агрофона с оптимальным содержанием подвижного фосфора в черноземе выщелоченном

О. В. Волынкина, Е. В. Кириллова

3

Удобрения

Эффективность применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в полевом севообороте на Северо-Западе РФ

А. М. Шпанев, М. А. Фесенко, В. В. Смук

12

Регуляторы роста растений

Сходство и различия в гормональной и ростовой реакции корней растений разных генотипов на дефицит фосфатов

Л. Б. Высоцкая, А. В. Феоктистова, З. А. Ахтямова, Г. Р. Ахиярова, А. В. Коробова, Г. Р. Кудоярова

23

Пестициды

Совершенствование ассортимента средств борьбы с вредителями растений в XXI веке

В. И. Долженко, Г. И. Сухорученко, Л. А. Буркова, Г. П. Иванова, Т. И. Васильева, О. В. Долженко, А. Б. Лаптиев

31

Влияние супрамолекулярных комплексов тебуконазола на ростовые процессы яровой мягкой пшеницы

О. И. Теплякова, В. И. Евсеенко, А. В. Душкин, Н. Г. Власенко

41

Продуктивность сахарной свеклы, поврежденной гербицидами гормоноподобного действия в сублетальных и изреживающих посевах дозах

Е. А. Дворянкин

49

Агроэкология

Миграционная подвижность Al, Mn и Fe в мелиорированных дерново-подзолистых почвах

А. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев, А. А. Белимов

55

Динамика доминирующих факультативных паразитов грибной природы в полевых агроценозах с минимальной обработкой почвы в Западной части Волгоградской области

Н. И. Будынков, С. Н. Михалева, А. В. Проскурин

62

Экотоксикология

Фитотоксичность нанокмппозитов селена в природных матрицах на развитие растений картофеля *in vitro*

А. И. Перфильева, О. А. Ножкина, И. А. Граскова, Н. С. Забанова, Б. Г. Сухов

70

ОБЗОРЫ

Особенности взаимодействия растений и фитофагов в агроценозах при изменении климата

Е. И. Кошкин, И. В. Андреева, Г. Г. Гусейнов, К. Г. Гусейнов, Ф. С.-У. Джалилов, И. М. Митюшев

79

Contents

No. 1, 2021

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Formation of Soil Fertility with Optimum Content of Mobile Phosphorus in Leached Chernozem
O. V. Volynkina, E. V. Kirillova 3

Fertilizers

- Efficiency of Application of Mineral Fertilizers and Integrated Plant Protection System
in Field Crop Rotation in the North-West of the Russian Federation

A. M. Shpanev, M. A. Fesenko, V. V. Smuk

12

Plant Growth Regulators

- Similar and Specific Hormonal and Root Growth Responses to Phosphate Starvation
in Plants of Different Genotypes

*L. B. Vysotskaya, A. V. Feoktistova, Z. A. Akhtyamova, G. R. Akhiyarova,
A. V. Korobova, G. R. Kudoyarova*

23

Pesticides

- Improving the Range of Plant Pest Control Products in Russia in the 21st Century

*V. I. Dolzhenko, G. I. Sukhoruchenko, L. A. Burkova, G. P. Ivanova,
T. I. Vasilyeva, O. V. Dolzhenko, A. B. Laptiev*

31

- Effect of Supramolecular Complexes of Tebuconazole on Growth Processes of Spring Soft Wheat

O. I. Teplyakova, V. I. Evseenko, A. V. Dushkin, N. G. Vlasenko

41

- Productivity of Sugar Beet Damaged by Hormone-Like Herbicides
in Sublethal and Thinning Doses

E. A. Dvoryankin

49

Agroecology

- Migration Mobility of Al, Mn and Fe in Reclaimed Sod-Podzolic Soils

A. V. Litvinovich, O. Yu. Pavlova, A. V. Lavrishchev, A. A. Belimov

55

- Dynamics of Dominant Facultative Parasites of Fungal Nature in Field Agroecosystems
with Minimal Soil Treatment in the Western Part of the Volgograd Region

N. I. Budynkov, S. N. Mikhaleva, A. V. Proskurin

62

Ecotoxicology

- Phytotoxicity of Selenium Nanocomposites in Natural Matrices
on Potato Plant Development in vitro

A. I. Perfilova, O. A. Nozhkina, I. A. Graskova, N. S. Zabanova, B. G. Sukhov

70

REVIEWS

- Specific Aspects of the Plant and Phytophage Interactions
in Agroecosystems under Climate Change

*E. I. Koshkin, I. V. Andreeva, G. G. Guseinov, K. G. Guseinov,
F. S. -U. Dzhalilov, I. M. Mityushev*

79

ФОРМИРОВАНИЕ АГРОФОНА С ОПТИМАЛЬНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПОДВИЖНОГО ФОСФОРА В ЧЕРНОЗЕМЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОМ¹

© 2021 г. О. В. Волюнкина^{1,*}, Е. В. Кириллова¹

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

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

Поступила в редакцию 14.05.2020 г.

После доработки 01.06.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

Результаты учетов и наблюдений в 2-х стационарных опытах на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ показали изменчивость содержания подвижного фосфора в слое 0–20 см выщелоченного чернозема под влиянием времени и удобрений. Повышенные дозы фосфора быстрее увеличивали содержание P_2O_5 , доводя их до более высоких показателей по сравнению с применением P_{20} . Однако по урожайности культур не обнаружены такие же темпы и размеры увеличения. В опытах прослежено за длительностью последствия применения повышенных доз фосфора. Срок проявления последствия зависел от суммарной дозы примененного удобрения. В зернопаровом севообороте суммарная доза P_{1000} оказывала последствие в течение 24-х лет. В зернопаровом севообороте суммарное запасное внесение $P_{240-360-720}$ проявляло последствие на следующем числе посевов – 15–20–28. В момент окончания последствия среднегодовое количество фосфора уменьшалось до P_9-16 , что было сигналом необходимости возобновления применения фосфорного удобрения в дозах не более P_{15-20} . Контроль содержания подвижного P_2O_5 в почве с использованием шкалы Чирикова, откорректированной для местных условий, необходимо совмещать с учетом прежней удобренности поля.

Ключевые слова: севооборот, содержание подвижного фосфора в почве, удобрение, последствие удобрения, урожайность, окупаемость удобрений.

DOI: 10.31857/S0002188121010117

ВВЕДЕНИЕ

Низкое содержание подвижного P_2O_5 в почве ухудшает использование растениями азота как из почвенных запасов, так и удобрений. При этом существенно снижается продуктивность культур, т.к. потребление растениями азота и фосфора находится в тесном взаимодействии [1, 2]. Повышение обеспеченности фосфором пшеницы и других культур требует определенных экономических вложений, величина которых определяется заданным уровнем содержания подвижного P_2O_5

в почве. Есть несколько методов контроля наличия в почве подвижного фосфора. В работе [3] отмечено, что все методы определения P_2O_5 достаточно жесткие, поскольку основаны на кислотных вытяжках, а такой кислотности в почве не бывает. В агрохимической службе принят метод Чирикова (вытяжка 0.5 н. HCl). В исследованиях Курганского НИИСХ наряду с этим методом применяют еще и более чувствительный к изменениям, происходящим в почве, метод Францесона (0.002 н. раствор H_2SO_4). Для обыкновенных черноземов, особенно карбонатных, используют метод Мачигина (1%-ная углеаммонийная вытяжка). Шкалы обеспеченности растений фосфором, установленные авторами этих методов, удобны для пользования практиками. На основе изучения действия доз фосфорного удобрения в местных условиях они могут быть частично откорректированы.

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

Срок отбора почвы может менять показатель содержания P_2O_5 . В исследованиях в лесостепи Приобья [4] установлено, что от весны к осени происходило изменение показателей содержания подвижного фосфора. В 30-летнем опыте СибНИИЗХима установлено наиболее заметное их возрастание на фоне глубокой безотвальной обработки (на 70%), при минимальной обработке — на 41% и на фоне вспашки — на 22%.

В вопросе о необходимом количестве фосфорного удобрения для запланированного повышения обеспеченности растений фосфором мнения ученых расходятся. Д.Н. Прянишников [5], анализируя результаты опытов Геосети ВНИИА, считал, что дозы фосфора должны быть равны величине выноса элемента культурой или быть чуть меньше выноса. Вынос фосфора пшеницей и кукурузой при урожайности, которая формируется на среднесуглинистом выщелоченном черноземе Центрального опытного поля Курганского НИИСХ при частых июньских засухах, не превышает 12–17 кг/га на фонах без удобрений и 16–22 кг/га — при их внесении (при том, что солому не отчуждают с поля).

Зная, что в России доля почв с низким содержанием подвижного фосфора равна 22.7% [6], ученые предлагают приемы его увеличения. В работе [7] для некарбонатных черноземов показаны дозы P_{50-120} , которые способны поднять содержание P_2O_5 на 10 мг/кг. В работе [8] отмечено, что для увеличения содержания P_2O_5 на 10 мг/кг на выщелоченном черноземе требуются дозы $P_{100-110}$. Авторы показали, что в 1991–2015 гг. применение фосфора в земледелии России ограничивалось дозой P_{23} с отрицательным балансом — 12 мг P_2O_5 /кг.

В карбонатном черноземе Ставрополя [9] дозы фосфора $P_{30-90-150}$ на азотно-калийном фоне за первые 6 лет повысили содержание P_2O_5 по Мачигину с исходной величины 13 мг/кг до 21, 26, 58 мг/кг соответственно. С продолжением внесения этих доз за следующие 18 лет показатели увеличились до 28, 52, 76 мг/кг, еще через 12 лет — до 30, 54, 70 мг/кг. Насколько это было экономически выгодным? В первом шестилетии сбор зерновых единиц (з.е.) в севообороте составил 27.7 ц/га в контроле и 34.3, 35.2, 35.7 ц/га на 3-х удобренных фонах. Похожими были результаты и в последующие сроки опыта. Везде существенная прибавка урожайности была получена от первой дозы фосфора, дальнейшее ее повышение было в пределах ошибки опыта.

Подобные данные приведены в работе [10] в зависимости от уровней прироста урожайности

озимой пшеницы на выщелоченном черноземе Центрального округа РФ. При содержании P_2O_5 в почве <50 мг/кг от доз $P_{30-45-60-90-120}$ получены следующие прибавки: соответственно 3.8, 4.2, 4.5, 4.7, 4.5 ц/га к контролю, где урожайность составила 17.4 ц зерна/га. На почвах с наличием подвижного фосфора 51–75 мг/кг урожайность в контроле была намного больше — 28.0, а прибавки варьировали в пределах 1.7–2.0 ц/га. В дальнейшем прибавки были < 1.0 ц/га, но урожайность в контроле при содержании подвижного фосфора в почве 76–100 мг/кг достигала уже 33.9 ц/га, при 101–150 мг/кг — 39.5, >150 мг/кг — 40.7 ц/га. Следовательно, в условиях Центрального округа удвоение содержания P_2O_5 в почве пашни вело к удвоению урожая, а утроение его содержания дало дополнительно лишь 5 ц зерна/га. При обогащении почвы подвижным фосфором наблюдали последствие вновь созданных фонов, на которых новые порции фосфорного удобрения были малоэффективными.

В работе [11] для систематического применения удобрений на южном малогумусном тяжело-суглинистом черноземе Саратовской обл. предложили дозу фосфора P_{19} с совместным внесением $N_{33}K_9$.

В Белгородской обл. [12] поступление фосфора с минеральными и органическими удобрениями составляло 17, 21, 32 кг д.в./га в 3-х первых циклах определения, в 4-м и 5-м циклах оно увеличилось до 62 и 53 кг д.в./га, а далее уменьшилось до 18, 12, 22 кг д.в./га. Соответственно, средневзвешенное содержание P_2O_5 в этих 8-ми циклах менялось таким образом: 55, 72, 86, 103, 119, 131, 121, 116 мг/кг. Даже после достижения столь высокого показателя (131 мг/кг) снижение поступления фосфора с удобрениями вызвало в дальнейшем уменьшение содержания P_2O_5 . Вполне очевидно, что в поддержании высоких показателей имело место последствие прежнего применения фосфора, которое продлилось определенное число лет, после чего такой размер поступления, как 12 кг P_2O_5 /га, приведет к снижению содержания подвижного фосфора в почве.

В Курганской обл. применение минеральных удобрений было удовлетворительным в 1980-х гг. прошлого века — до NPK_{40-50} . В 1990-х гг. оно резко снизилось до NPK_{5-6} , в последние годы составляло NPK_{12-17} , причем большей частью преобладали азотные удобрения, в то время как в среднем в структуре пашни насчитывали 62% почв с низким содержанием P_2O_5 . Лишь несколько развитых сельскохозяйственных предприятий применяют аммофос и сложные удобрения. Средневзве-

шенное количество подвижного фосфора на 2017 г. менялось в 24 районах области в основном в пределах 14–49 мг P_2O_5 /кг, и только в 4-х районах области эти показатели были больше — 56–62 мг/кг [13].

Цель работы — по данным Центрального опытного поля Курганского НИИСХ оценить изменчивость содержания подвижного фосфора в пахотном слое чернозема выщелоченного под влиянием удобрений и времени, оценить затраты на формирование высокой обеспеченности почвы подвижным P_2O_5 с низким исходным его содержанием (38–40 мг P_2O_5 /кг по Чирикову).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства — филиале УрФАНИЦ УрО РАН в лабораториях агрохимии и земледелия в 2-х стационарных экспериментах. Почва — выщелоченный чернозем маломощный малогумусный среднесуглинистый: pH_{KCl} 6.2–6.5 — при закладке опытов и 5.2–5.5 — в настоящее время, гумус (по Тюрину) — 4.4%, общий азот — 0.20%, общий фосфор — 0.07%, сумма поглощенных Ca^{2+} и Mg^{2+} (по Каппену) — 20–22 мэкв/100 г. Содержание подвижного фосфора и обменного калия (по Чирикову) в слое 0–20 см почвы на участке под опытом — 40–50 и 250–350 мг/кг соответственно.

Стационарные эксперименты 1 и 2 заложены В.И. Волинкиным в 1971 г. на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ. В настоящее время исполнители исследований — О.В. Волинка и Е.В. Кириллова. Агротехника в опыте 1 предусматривала соблюдение севооборота: кукуруза–2 пшеницы–овес с осенней вспашкой в течение 7-ми ротаций в 1971–1998 гг. После этого стали выращивать бессменную пшеницу после стернового фона, который в области оставляют с осени на 40% пашни. В опыте 2 исследования вели в зернопаровом севообороте: пар–2 пшеницы–овес при ежегодной вспашке также в 7-ми ротациях в 1971–1998 гг. С отменой вспашки севооборот был преобразован: пар–3 пшеницы. Посев зерновых культур в севооборотах в годы отвальной обработки вели дисковой сеялкой СЗ-3.6, кукурузы — сажалкой СУПК. Во второй период исследования в опытах 1 и 2 с осени оставляли стерновой фон, после которого посев вели стерновой сеялкой СКП-2.1 с сошником культиваторного типа. Исключением была первая культура после пара, которую сеяли после 5-летних мелких обработок почвы. В опытах использовали районированные сорта культур. Солому оставля-

ли на поле с 1978 г. со времени проведения уборочных работ комбайном Sampo-500.

Метеоусловия в центральной зоне Курганской обл.: годовое количество осадков — 350–369 мм, продолжительность периода с температурой $>10^\circ C$ — 130–134 сут. Отмечено, что во 2-й период опытов количество засушливых лет увеличилось.

Удобрения — N_{aa} и K_x (калий вносили под кукурузу). Фосфорное удобрение — $P_{cd}40$ в первом периоде опытов, АФ — во 2-м. Способ внесения — весеннее локальное врезание дисковой сеялкой СУК-24 до посева на глубину 4–5 см. Дозы азота в севообороте в опыте 1 под кукурузу — $N40-80-120$, под зерновые — $N20-40-60$, в среднем в севообороте — $N25-50-75$, во 2-м периоде опыта в посевах бессменной пшеницы — $N20-40-60$. В опыте 2 дозы удобрений были следующими: $P20-40$, $N40$ (вносили в 3-м поле) и $N60$ (вносили в 4-м поле). В среднем в этом севообороте дозы были равны $N25P15-30$, на посевной площади севооборота — $N33P20-40$.

Общая площадь делянок в опыте — 270–300 m^2 ($6 \times 45-50$ м), учетная — 90–100 m^2 ($2 \times 40-50$ м). Повторность трехкратная. Учет урожая пшеницы — напрямую комбайном Sampo-500 с отбором образца для определения влажности и чистоты бункерной массы зерна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В зернопаровом севообороте (опыт 2) сравнили изменчивость содержания подвижного P_2O_5 в почве под влиянием удобрений по двум методам его определения. Показана тесная их взаимосвязь при коэффициентах корреляции 0.92 и 0.95 (табл. 1).

Влияние фосфорного удобрения и величины его доз на содержание подвижного P_2O_5 в почве особенно ярко показано в вариантах запасного применения суперфосфата. В запас фосфор был внесен в 1971 и 1975 гг. дозами $P120-180-360$. В сумме дозы составили $P240-360-720$. Эти три фона были повторены дважды. На первых фонах следили за последствием фосфора, на вторых — стали вносить $P20$, чтобы уловить срок проявления эффекта от добавления $P20$. К 1983 г. после закладки опыта в 1971 г. прошло 13 лет и после добавления в 1975 г. второй дозы фосфора — 8 лет. За это время содержание P_2O_5 на первых фонах повысилось до 5.47, 6.50, 8.65 мг/100 г почвы по сравнению с контролем (4.82 мг/100 г почвы). Еще заметнее повысилось содержание P_2O_5 при внесении $P20$ на данных фонах. Оно стало равным 5.80, 6.12, 9.42 при той же величине в контроле 4.82 мг/100 г почвы (табл. 1).

Таблица 1. Влияние удобрений на содержание подвижного P_2O_5 в слое 0–20 см почвы, определенного двумя методами на 13-й год 4-польного зернопарового севооборота (22.09.1983 г.), мг/100 г

Вариант	N0P0 (9 контролей)	N40—60 в 3—4-м полях	P20 ежегодно	P40 ежегодно	P20 ежегодно + + N40—60 в 3—4-м полях	P40 ежегодно + N40—60 в 3—4-м полях	
По Чирикову	4.82	4.45	4.67	6.48	4.90	5.68	
По Францесону	0.06	0.09	0.12	0.34	0.05	0.28	
<i>r</i>				0.92			
	Запасное и ежегодное удобрение						
Вариант	N0P0 (9 контролей)	P120 в 1971 и 1975 гг. + + N40—60 в 3—4-м полях		P180 в 1971 и 1975 гг. + + N40—60 в 3—4-м полях		P360 в 1971 и 1975 гг. + + N40—60 в 3—4-м полях	
		—	+ P20 ежегодно	—	+ P20 ежегодно	—	+ P20 ежегодно
По Чирикову	4.82	5.47	5.80	6.50	6.12	8.65	9.42
По Францесону	0.06	0.11	0.22	0.42	0.62	0.96	1.28
<i>r</i>				0.95			

Примечание. В 1971 г. исходное содержание P_2O_5 (по Чирикову) на участке — 3.8–4.0 мг/100 г.

Таблица 2. Влияние состава ежегодного удобрения P40 на содержание P_2O_5 весной в слое 0–20 см почвы в зерно-пропашном севообороте, мг/100 г (по Францесону)

Вариант, среднее в севообороте	Кукуруза, 1975 г.	Пшеница, 1976 г.	Пшеница, 1976 г.	Овес, 1978 г.
Контроль	0.20	0.18	0.14	0.36
N25	0.24	0.20	0.12	0.42
N50	0.33	0.20	0.22	0.30
N75	0.42	0.20	0.14	0.31
Суммарная доза фосфора в вариантах с P40, кг/га	160	200	240	280
N25P40	0.74	0.54	0.72	1.24
N50P40	0.78	0.72	0.92	1.80
N75P40	0.58	0.56	1.14	1.80
<i>HCP</i> ₀₅	0.10	0.08	0.12	0.15

При сравнении варьирования показателей содержания P_2O_5 при весеннем и осеннем сроках отбора почвы большими были изменения при использовании метода Францесона. Не случайно, как более стабильный, для агрохимической службы взят метод Чирикова. В рассмотренном исследовании использовали оба метода. Есть мнение, что наиболее объективным является средний результат определения в течение 3-х лет при отборе почвы в один и тот же срок одним и тем же методом [14].

В опыте 1 в зернопропашном севообороте кукуруза–2 пшеницы–овес изучали дозы азота как без внесения фосфора, так и на его фоне. Прослежено за изменениями содержания подвижного фосфора под влиянием фосфорного фона в дозе P40. Этот вариант выбран в 1971 г., когда еще не испытывали до-

зы фосфора при систематическом применении, что было сделано позднее и показало, что достаточно вносить P15–20 [15]. Но завышенная доза дала ценную информацию о длительности ее последствий, в 2019 г. она составила 24 года.

В годы действия фосфорных удобрений уже ко 2-й ротации севооборота в 1975–1978 гг. при весеннем сроке отбора образцов до внесения удобрений фосфорный фон существенно улучшил питание растений. Содержание P_2O_5 в слое почвы 0–20 см к контролю заметно повысилось. Показано постепенное увеличение его содержания в связи с внесением новых доз суперфосфата (табл. 2).

Насколько улучшение фосфорного питания растений на выщелоченном черноземе с низким содержанием P_2O_5 повышало продуктивность

Таблица 3. Урожайность культур севооборота в контроле и прибавки от удобрений, ц/га

Вариант, среднее в севообороте	Кукуруза, зеленая масса, 1975 г.	Пшеница, 1976 г.	Пшеница, 1976 г.	Овес, 1978 г.
Контроль	158	18.7	20.7	25.0
Прибавка				
N25	28	0.0	0.7	0.7
N50	10	0.2	0.5	1.7
N75	24	0.5	0.4	1.1
N25P40	32	2.4	3.0	3.7
N50P40	42	4.3	3.0	4.4
N75P40	54	4.0	3.9	4.4
HCP ₀₅	20	2.8	1.8	2.6

культур севооборота, видно по результатам учета урожайности во 2-й ротации севооборота (табл. 3). Следует отметить, что приведенные в табл. 3 данные отразили действие удобрений при недостатке влаги. Особенно засушливыми были 1975 и 1976 гг. В целом за 7 ротаций зернопропашного севооборота уровень прибавок урожайности был значительно больше. Закономерность существенного преимущества азотно-фосфорного удобрения перед применением одного азота сохранялась все годы (табл. 4).

В табл. 3 и 4 не показано действие удобрений в комбинации NPK, оно было достаточно близким к влиянию NP. После 7-ми ротаций севооборота в опыт была введена бессменная пшеница. В ее

Таблица 4. Влияние состава удобрения на средний сбор кормовых единиц за 7 ротаций севооборота, 1971–1998 гг.

Вариант	Урожайность в севообороте кукуруза—2 пшеницы— овес	Прибавка	Окупаемость удобрений, кг к.е./кг д.в.
	ц к.е/га		
Контроль	24.2	—	—
N25	27.1	2.9	11.6
N50	28.1	3.9	7.8
N75	27.6	3.4	4.5
N25P40	30.3	6.1	10.9
N50P40	33.0	8.8	9.8
N75P40	33.0	8.8	7.6
НСР ₀₅	2.0—3.4		

посев 12 лет не вносили фосфорное удобрение и пользовались хорошо проявленным его последствием в вариантах NP и NPK. Следующие 12 лет в комбинации NPK продолжали учитывать последствие фосфора, а в комбинации NP с 2008 г. стали применять фосфор в дозе P20. Считаем, что в последствии РК положительное влияние оказывал в основном фосфор. Доказательством служит очень высокое содержание обменного K_2O в почве участка под опытом – 250–350 мг/кг. Последствие проявлялось в течение 24-х лет, при подсчете оплаты удобрения прежние затраты на удобрение РК не взяты в расчет. Наличие подвижного фосфора сделало фон окультуренным. Количество фосфора, примененного в севообороте в вариантах с фоном РК (P1000), поделенное на 49 лет опыта, равно среднегодовой дозе P20. В комбинации NP внесение P20 начато 12 лет назад – в 2008 г., и количество внесенного за 49 лет фосфора равно P1240, на год приходилось P25. Сравнение этих вариантов показало все еще проявляемое последствие ранее примененного суперфосфата с небольшим преимуществом фона P25 перед P20 (табл. 5).

Наличие подвижного фосфора в почве в варианте последствия обеспечило более заметные изменения. На фоне P20 установлено постепенное снижение содержания P_2O_5 . Отчетливо показано, что многолетнее применение одного азота было способно привести к усилению дефицита подвижного фосфора. Фон P20 отстал по этому показателю от фона P25 в среднем за 11 лет на 20 мг/кг при содержании P_2O_5 60 и 80 мг/кг соответственно (табл. 6).

В опыте 2 образцы почвы проанализировали перед закладкой севооборота, содержание P_2O_5 (по Чирикову) было равно 38–40 мг/кг. Зернопа-

Таблица 5. Влияние действия и последствий фосфорных удобрений на величину прибавок урожайности и окупаемость 1 кг д.в. удобрений в посеве бессменной пшеницы, кг/кг

Вариант	1999–2019 гг.		
	урожай- ность	прибавка	оплата, кг/кг
Контроль	9.9	—	—
N20	11.8	1.9	9.5
N40	12.5	2.6	6.5
N60	12.2	2.3	3.8
N20П*РК(P20)	13.2	3.3	16.5
N40 ПКР(P20)	15.2	5.3	13.2
N60 ПКР(P20)	15.4	5.5	9.2
N20ПР+P20(P25)	13.3	3.4	8.5
N40ПР+P20(P25)	15.4	5.5	9.2
N60ПР+P20(P25)	16.6	6.7	8.4
НСП ₀₅ , ц/га	1.2–2.3		

*П – последствие.

ровой севооборот пар–2 пшеницы–овес был за-
ложен в 1971 г., в течение 7 ротаций вели вспашку.
После 7-ми ротаций более урожайный овес был
заменен пшеницей, была устранена вспашка. По-
казано, что преимущественное влияние на уро-
жайность 1-й культуры после пара оказывал фос-
фор. При удалении посева от пара больше дей-
ствовал азот, но прибавки от одного азота были
меньше, чем от сочетания его с фосфором. Поло-
жительная роль азотного удобрения, которое
вносили в посевы 2-й и 3-й культур после пара,
обеспечила величину прибавок ≈ 3 ц/га в 1-й пе-
риод опыта при ежегодной вспашке и 4–5 ц/га
при минимизации обработки почвы. Добавление
к азоту фосфора в дозе P20 способствовало даль-

нейшему росту урожайности. Прибавка увеличи-
валась еще на 2 ц/га в годы применения вспашки
и на 1.0–1.6 ц/га – в период минимальной обра-
ботки почвы.

Применение более высокой дозы фосфора P40
повышало содержание P_2O_5 в почве с 76 мг/кг при
P20 до 102 мг/кг в среднем за период минимиза-
ции обработки почвы, но удвоение дозы не при-
носило удвоения прибавки урожайности пшени-
цы после пара. В остальных полях севооборота
повышенная доза P40 не давала эффекта при уве-
личении затрат на дорогостоящий аммофос в
2 раза (табл. 7). При цене аммофоса 2900 руб./ц и
с расходами на применение дозы P20 обходилась в
1660, доза P40 – в 2820 руб./га.

В вариантах с запасным фосфорным удобре-
нием среднегодовое количество внесенного фос-
фора за все 48 лет опыта в 36 посевах варьировало
от P6.6 до P40. Наибольшие прибавки урожайно-
сти были получены при средней дозе P20 в вари-
анте N33P720, ежегодное добавление к которой
еще P20 в основном было неэффективным, осо-
бенно в поле овса (табл. 8).

В ротациях севооборота проследили за сроком
ослабления последствий 3-х суммарных доз
фосфора P240–360–720, внесенных в запас в по-
ловинном количестве за 2 года в 1971 и 1975 гг.
Уменьшение последствий 1-й суммарной дозы
P240 произошло на 27-й год. В этот срок средняя
доза фосфора за год составила P9. При такой же
средней величине P9 последствие P360 пере-
стало происходить на 39-й год опыта и P720 – на
45-й год при среднегодовой дозе P16. Исключая
годы с паром и первые 5 лет, когда формирова-
лись фоны, число посевов, выращенных за счет
последствия доз P240–360–720, было равно 15,
20, 28 соответственно. При снижении среднего-
довой дозы фосфора до P9–16 возникла необхо-
димость улучшения условий фосфорного пита-
ния пшеницы путем возобновления ежегодного

Таблица 6. Изменение содержания P_2O_5 (по Чирикову) в слое 0–20 см почвы в посеве бессменной пшеницы в течение 11 лет (2009–2019 гг.), мг/кг

Вариант	Годы возделывания бессменной пшеницы											2009–2019 гг.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
N0P0	51	64	41	45	39	47	45	41	57	52	48	48
N40	36	—	41	40	40	—	—	50	50	35	41	41
N40P20	67	—	63	60	60	—	62	—	62	48	59	60
N40P25	73	78	74	82	90	86	89	84	73	74	75	80

Примечание. Исходное содержание P_2O_5 (по Чирикову) в 1971 г. – 40 мг/кг.

Таблица 7. Влияние состава удобрения на урожайность культур 4-польного зернопарового севооборота, ц/га

Вариант	1971–1998 гг.			1999–2018 гг.			P ₂ O ₅ , мг/кг, 2016 год***
Пар	1-я пшеница	2-я пшеница	Овес	1-я пшеница	2-я пшеница	3-я пшеница	
Контроль	24.9	17.76	22.8	13.6**	16.7	9.5	62
P20	27.7	20.3	25.8	14.7	17.6	11.9	81
P40	29.3	20.0	26.2	16.3	17.6	11.0	116
N33*	25.6	20.0	25.5	13.7	20.9	13.8	68
N33P20	27.8	21.7	27.4	14.1	21.9	15.4	76
N33P40	28.6	21.6	27.1	14.8	22.1	15.2	121
HCP ₀₅	1.9	1.7	2.3	2.1	3.1	2.7	16

*Азот вносили в 3-м (N40) и 4-м (N60) полях севооборота. **Урожайность 1-й пшеницы была низкой по причине совпадения ее посева с 3-мя засушливыми годами и одним годом поражения растений стеблевой ржавчиной. *** Исходный показатель на участке в 1971 г. – 38–40 мг/кг.

Таблица 8. Влияние запасного удобрения на урожайность культур 4-польного зернопарового севооборота, ц/га

Вариант	1971–1998 гг.			1999–2018 гг.			P ₂ O ₅ , мг/кг, 2016 г.
Пар	1-я пшеница	2-я пшеница	Овес	1-я пшеница	2-я пшеница	3-я пшеница	
Контроль	24.9	17.7	22.8	13.6	16.7	9.5	62
N33P240	27.7	21.5	26.9	12.9	21.1	15.3	65
N33P240+P20	28.3	21.3	26.8	14.6	22.0	15.8	78
N33P360	27.9	21.4	26.8	13.6	20.3	14.8	65
N33P360+P20	28.9	21.0	27.4	16.1	23.3	16.6	93
N33P720	29.2	21.9	29.2	15.8	22.7	16.0	68
N33P720+P20	29.9	20.5	27.2	15.7	21.5	16.0	94
HCP ₀₅	1.9	1.7	2.3	2.1	3.1	2.7	16

Таблица 9. Эффективность действия и последствий фосфора в зернопаровом севообороте (урожайность в контроле и ее прибавки, ц/га)

Вариант	1971–1998 гг.	1999–2018 гг.	Среднее*	Оплата, кг/кг	Вариант	1971–1998 гг.	1999–2018 гг.	Среднее*	Оплата, кг/кг
Контроль	21.8	13.3	18.2	–	Контроль	21.8	13.3	–	–
P20	2.8	1.4	2.2	11.0	N33P240 (P6.6)**	3.6	3.1	3.4	8.6
P40	3.4	1.7	2.7	6.8	N33P240 + P20 (P26.6)	3.7	4.2	3.9	6.5
N33	1.9	2.8	2.3	7.0	N33P360 (P10)	3.6	2.9	3.3	7.7
N33P20	3.8	3.8	3.8	7.2	N33P360 + P20 (P30)	4.0	5.4	4.6	7.0
N33P40	4.0	4.1	4.0	5.5	N33P720 (P20)	5.0	4.9	5.0	9.4
					N33P720 + P20 (P40)	4.1	4.4	4.2	5.8

*Средневзвешенная доза в 21-м посеве за 7 ротаций в 1971–1998 гг. и в 15-ти посевах за 5 ротаций в 1999–2018 гг.

**Доза фосфора за 1 год посева.

внесения фосфора в дозах P15–20 локальным способом.

Обобщение результатов в целом в зернопаровом севообороте за 48 лет опыта дало возмож-

ность оценить изученные приемы по окупаемости 1 кг д.в. дополнительным урожаем. При переходе дозы от P20 к P40 оплата единицы удобрения прибавкой резко снижалась (табл. 9).

Таблица 10. Влияние доз суперфосфата при внесении в рядки при посеве на урожайность пшеницы сорта Шадринская после пара (1977–1979 гг.), ц/га

Доза	Урожайность	Общая прибавка	Предельная прибавка	Оплата общей прибавки, кг/кг	Оплата предельной прибавки, кг/кг
Контроль	24.2	—	—	—	—
P15	30.4	6.2	6.2	41	41
P30	32.6	8.4	2.2	28	15
P45	33.5	9.3	0.9	20	6
P60	34.7	10.5	1.2	16	8
P90	34.2	10.0	–0.5	11	–1.6
HCP_{05} , ц/га	1.8				

Наблюдения и учеты, проведенные в 2-х опытах, обосновали следующее заключение: совместно с ориентацией на неустаревшую картограмму содержания подвижного фосфора в почве на конкретном поле надо знать историю применения удобрений на нем в предыдущие годы. Длительность последействия фосфора можно выявлять, точно зная величину суммарной дозы примененного ранее удобрения и числа лет, за которые эта суммарная доза была использована культурами севооборота. Необходимо вновь применять фосфорное удобрение, если в среднем на год приходилось менее P18–20.

На основании результатов опытов с фосфорными удобрениями В.И. Волынкиным была откорректирована шкала Чирикова для слоя 0–20 см почвы и для местных условий. Предложена следующая оценка уровней содержания подвижного фосфора (мг/кг): очень низкое – до 20, низкое – 20–45, среднее – 45–60, повышенное – 60–80 и высокое – >80.

Насколько надежно полученную информацию можно распространять в центральной зоне Курганской обл.? Надо сказать, что в пределах ОПХ “Садовое”, на землях которого заложено Центральное опытное поле, есть и другой подтип почвы – обыкновенный солонцеватый чернозем с еще более низким содержанием подвижного фосфора (28 мг/кг по Чирикову). Тем более, в центральной зоне этот подтип почвы встречается наряду с выщелоченным черноземом. В течение 3-х лет был проведен опыт с дозами фосфора на обыкновенном солонцеватом черноземе в Альменевском р-не Курганской обл. (центральная зона). Содержание P_2O_5 по Чирикову в этом случае было равно 36 мг/кг. В этом опыте экономически выгодной оказалась доза P15 (табл. 10). Стоит подчеркнуть, что опыты были краткосрочными, на сменяющихся участках. При систематическом

применении доз на одном поле результаты еще более значимо доказывали бы, что для припосевного способа внесения фосфора достаточно дозы P15, для локального предпосевного – доза P20.

ВЫВОДЫ

1. При решении о применении фосфорного удобрения под зерновые культуры вполне надежно пользоваться неустаревшей картограммой содержания подвижного фосфора на конкретном поле и шкалой для метода Чирикова, откорректированной для местных условий.

2. В условиях центральной зоны Курганской обл. на почвах с содержанием подвижного P_2O_5 по Чирикову, равного 28–36–40 мг/кг, дозы фосфора под пшеницу P15–20 в рядки при посеве являлись оптимальными на фонах с хорошей обеспеченностью растений азотом. Одно фосфорное удобрение с удалением от пара при ухудшении условий азотного питания действовало слабее, что было проверено в 3-м и 4-м полях зернопарового севооборота.

3. Наряду с учетом показателя картограммы не менее важно знание истории удобренности поля. Суммарную дозу примененного ранее фосфора следует поделить на число лет ее использования. При снижении этого показателя менее P18–20 необходимо вновь применять фосфорное удобрение в дозе не более P15–20 в рядки при посеве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон У.Б. Состав стартовых удобрений и способы их внесения по ресурсосберегающим технологиям // Эффективность фосфорных удобрений. Журн. Международ. института питания раст. 2016. С. 31–33.
2. Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Оптимизация доз азотных и фосфорных удобрений на черноземных

- почвах Поволжья с различным содержанием фосфора // Плодородие. 2017. № 2. С. 8–11.
3. Христенко А.А. Проблема изучения фосфатного состояния почв // Агрохимия. 2001. № 6. С. 89–95.
 4. Синещев В.Е., Ткаченко Г.И. Динамика содержания легкоподвижного фосфора в почве при минимизации механической обработки в лесостепи Приобья // Агрохимия. 2016. № 11. С. 19–24.
 5. Прянишников Д.Н. Избр. соч. / Под ред. Петербургского А.В. М.: Сельхозиздат, 1963. Т. 1. 735 с.
 6. Шафран С.А. Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и ее резервы // Агрохимия. 2016. № 8. С. 3–10.
 7. Касицкий Ю.И. Агрохимические аспекты решения проблемы фосфора в земледелии СССР // Агрохимия. 1983. № 10. С. 16–31.
 8. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Содержание подвижного фосфора в почвах при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2013. № 2. С. 30–36.
 9. Шафран С.А., Кирпичников Н.А. Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // Агрохимия. 2019. № 4. С. 3–10.
 10. Шафран С.А., Прошкин В.А., Адрианов С.Н., Шаброва Е.В. Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожайности озимой и яровой пшеницы на почвах России // Агрохимия. 2011. № 10. С. 9–21.
 11. Чуб М.П., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Плодородие чернозема южного и продуктивность зернопарового севооборота при длительном применении минеральных удобрений // Агрохимия. 2010. № 7. С. 3–13.
 12. Чекмарев П.А., Лукин С.В., Юмашев Н.П. Фосфатный режим черноземов // Вестн. РАСХН. 2010. № 6. С. 28–30.
 13. Волынкина О.В., Волынкин В.И., Кириллова Е.В., Копылов А.Н., Лысухин Д.В. Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья / Под ред. Волынкиной О.В. Куртамыш: ООО “Куртамышская типография”, 2017. 284 с.
 14. Кук Дж. У. Регулирование плодородия почвы. Пер. с англ. М.: Колос, 1970. 519 с.
 15. Емельянов Ю.Я., Копылов А.Н., Волынкина О.В., Кириллова Е.В. Эффективность доз и способов внесения фосфорного удобрения при систематическом применении под яровую пшеницу // Плодородие. 2013. № 4(73). С. 11–13.

Formation of Soil Fertility with Optimum Content of Mobile Phosphorus in Leached Chernozem

O. V. Volynkina^{a,*} and E. V. Kirillova^a

^a Ural Federal Agricultural Research Center of the Ural branch of the RAS
ul. Belinskogo 112a, Yekaterinburg 620142, Russia

^{*}E-mail: kniish@ketovo.zaoral.ru

The results of calculations and observations in 2 stationary experiments on the Central experimental field of the Kurgan research Institute showed the variability of the content of mobile phosphorus in the 0–20 cm layer of leached Chernozem under the influence of time and fertilizers. Increased doses of phosphorus increased the content of P₂O₅ faster, bringing them to higher levels compared to the use of P20. However, the same rates and sizes of increase were not found for crop yields. In experiments, the duration of the aftereffect of the use of increased doses of phosphorus was traced. The duration of the aftereffect depended on the total dose of the applied fertilizer. In the grain crop rotation, the total dose of P1000 had an aftereffect for 24 years. In the grain-fallow crop rotation, the total reserve application of P240–360–720 showed an aftereffect on the next number of crops – 15, 20, 28. At the end of the aftereffect, the average annual amount of phosphorus decreased to P9–16, which was a signal of the need to resume the use of phosphorus fertilizer in doses not exceeding P15–20. Monitoring the content of mobile P₂O₅ in the soil using the Chirikov scale, adjusted for local conditions, must be combined with the previous fertilization of the field.

Key words: crop rotation, content of mobile phosphorus in the soil, fertilizer, aftereffect of fertilizer, yield, payback of fertilizers.

УДК 631.816:632.91:631.582(470.2)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ В ПОЛЕВОМ СЕВООБОРОТЕ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РФ

© 2021 г. А. М. Шпанев^{1,2,*}, М. А. Фесенко¹, В. В. Смук^{1,2}

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: ashpanev@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.

После доработки 07.05.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В многолетних исследованиях определено, что совместное применение минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений обеспечивает формирование наиболее высокой урожайности культур и продуктивности полевого севооборота на Северо-Западе РФ. Наименьшая прибавка урожайности от действия обоих факторов химизации отмечена на озимой ржи (30.2 ц/га или 90%), наибольшая — на яровом ячмене (24.6 ц/га или 138%), промежуточное положение занимали картофель (177 ц/га или 117%) и яровой рапс (13.1 ц/га или 127%). Основной вклад в формирование урожая ярового ячменя (17.9 ц/га или 100%) и озимой ржи (24.7 ц/га или 76%) осуществлялся за счет внесения минеральных удобрений, ярового рапса (10.4 ц/га или 90%) и картофеля (110 ц/га или 58%) — интегрированной системы защиты растений. Эффект взаимодействия от совместного применения удобрений и пестицидов был слабым (3.6–16.5%) и не постоянным на всех культурах. Рост продуктивности севооборота при улучшении питательного режима культурных растений и фитосанитарной обстановки достигал 16.2–22.7 ц з.е./га (50.9–71.4%).

Ключевые слова: севооборот, минеральные удобрения, интегрированная система защиты растений, фитосанитарное состояние, комплексное влияние средств химизации.

DOI: 10.31857/S0002188121010099

ВВЕДЕНИЕ

Масштабные исследования, проведенные в период интенсивного развития растениеводства в нашей стране и в ближнем зарубежье, продемонстрировали существенные преимущества комплексного применения средств химизации при возделывании разных культур в разных природно-климатических зонах. При этом основными средствами реализации продуктивности культурных растений как раньше, так и сейчас, выступают удобрения и средства защиты растений [1–6].

Большинство литературных данных посвящены изучению совместного применения удобрений и отдельных защитных мероприятий, тогда как хорошо известно, что гарантированную защиту будущего урожая способна обеспечить только полноценная система интегрированной защиты растений [7, 8]. Значительно реже встречаются в литературе результаты исследований совместного применения минеральных удобре-

ний и всего набора защитных мероприятий, обусловленного фактической фитосанитарной обстановкой в конкретных условиях года или опытного поля. Например, внесение азота в дозе 90 кг/га и использование интегрированной системы защиты растений позволяло получать на дерново-подзолистых почвах Московской обл. урожайность ярового ячменя на уровне 44.8–65.1 ц/га [9]. Совместное использование средств защиты растений и минеральных удобрений под яровую пшеницу в лесостепи Западной Сибири обеспечивало прибавку урожайности зерна 15–17 ц/га и гарантировало получение 26–37 ц/га [10]. Оптимальное сочетание применяемых средств химизации в плодосменном севообороте обеспечивало реализацию планируемого уровня урожайности зерна озимой пшеницы в условиях Брянской обл. от 53.7 до 59.5 ц/га [11]. В Центральном регионе на фоне органо-минеральной системы удобрения и интегрированной системы защиты растений

урожайность озимой пшеницы достигала 77–86, ярового ячменя – 75–77 ц/га [12]. По нашим данным, комплексное применение минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений обеспечивало прибавку урожайности ярового ячменя на Северо-Западе РФ от 18.6 до 31.2 ц/га в зависимости от погодных условий периода вегетации и проявления фитосанитарной обстановки [13].

Еще меньше сведений в литературе относительно эффектов, связанных с улучшением питательного режима растений и фитосанитарной обстановки, в рамках всего набора культур, возделываемых на севооборотной площади. Известно, что рост продуктивности основной продукции в полевом севообороте при комплексном применении удобрений и пестицидов сопровождается улучшением агрохимических свойств почвы, а именно повышением содержания гумуса, насыщения основаниями, концентрации подвижного фосфора и обменного калия, снижением гидролитической кислотности [14, 15].

Цель работы – оценка многолетней хозяйственной эффективности совместного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в полевом севообороте на Северо-Западе России.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) в период очередной ротации (2012–2017 гг.) полевого севооборота, представляющего собой длительный эксперимент, функционирующий с 1982 г. Состав и чередование культур в севообороте – традиционные для Северо-Западного региона: сидеральный пар (люпин узколистный)–озимая рожь–яровой ячмень с подсевом многолетних трав (тимopheевка луговая + клевер красный)–многолетние травы 1-го года пользования, многолетние травы 2 года пользования–картофель–рапс. Изучение озимой ржи из-за крайне неблагоприятной перезимовки в 2011 г. ограничилось 2013–2017 гг. и ярового рапса, за исключением 2016 г., когда посев оказался очень изреженным вследствие повышенной глубины заделки семян при высеве и сильного повреждения всходов крестоцветными блошками.

Почва опытных полей – дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая. Мощность пахотного слоя 23 см, pH_{KCl} 4.6, содержание гумуса (по Тюрину) – 1.9%, подвижных соединений фосфора и

калия (по Кирсанову) – 257 и 92 мг/кг соответственно.

Схемой опыта в севообороте было предусмотрено изучение 3-х уровней удобренности, формируемых предпосевным внесением азофоски и аммиачной селитры из расчета планируемой урожайности под озимую рожь, яровой ячмень, картофель, яровой рапс и многолетние травы 2-го года пользования. В варианте высокой удобренности доза NPK составляла 100, 75 и 75 кг д.в./га, средней – 65, 50 и 50 кг д.в./га, низкой – удобрения не вносили. Влияние длительного применения удобрений отразилось на агрохимических показателях почвы полей севооборота, которые для различных уровней удобренности составляли: азота – 93, 107, 110 мг/кг, фосфора – 208, 266, 268 мг/кг, калия – 88, 90, 98 мг/кг, органического вещества – 3.05, 3.42, 3.75%.

Вторым изученным фактором в опыте являлась интегрированная система защиты растений (ИСЗР), согласно которой защитные мероприятия против вредных организмов проводили при условии превышения пороговых величин их присутствия в посеве. Остальные элементы интегрированной защиты в условиях Северо-Запада России реализуются не в полной мере. При этом использованные в нашем опыте сорта обладают определенной устойчивостью к местным расам возбудителей заболеваний, что подтверждено данными оригинатора. Агротехнический метод реализован в научно обоснованном, в том числе с точки зрения фитосанитарных последствий, чередовании культур в севообороте, оптимальных сроках сева и сжатых по возможности ранних сроках уборки, а также соблюдении агротехники возделывания культур. Биологический метод, по результатам наших исследований, с применением биопрепаратов в защите от болезней на яровом ячмене и картофеле [16, 17] на данном этапе не обеспечивал высокой степени защиты культурных растений от вредных организмов и не имел оснований к широкому применению.

Система интегрированной защиты озимой ржи состояла из обязательного протравливания посевного материала препаратами винцит Форте, КЭ (1.0 л/т), максим, КС (2 л/т), максим Экстрим, КС (1.8 л/т), одно- или двукратного применения фунгицидов в период вегетации культуры (препараты амистар Экстра, СК (0.6 л/га), альто Супер, КЭ (0.4 л/га), титул Дуо, ККР (0.25 л/га), фоликур, КЭ (1.0 л/га)), а также гербицидной обработки (прима, СЭ (0.6 л/га)), проводимой в редких случаях.

На яровом ячмене в защите от семенной и почвенной инфекции в разные годы проводили обработку семян фунгицидами клад, КС (0.4 л/т), винцит Форте, КЭ (1.0 л/т), ламадор, КС (0.2 л/т), систива, КС (0.5 л/т), в защите от болезней листового аппарата и колоса — в фазе начала колошения обработка вегетирующих растений фунгицидами альто Супер, КЭ (0.4 л/га), зантара, КЭ (0.8 л/га), прозаро, КЭ (0.8 л/га), солигор, КЭ (0.7 л/га), титул Дуо, ККР (0.3 л/га). Против сорной растительности в фазе первого тройчатого листа клевера красного проводили ежегодную обработку посевов ярового ячменя гербицидами агритокс, ВК (1 л/га), базагран, ВР (2 л/га). В годы массового размножения черемухово-злаковой тли применяли инсектициды фуфанон, КЭ (1 л/га), каратэ Зеон, МКС (0.15 л/га).

Система защиты картофеля включала предпосадочную обработку клубней одним из инсектофунгицидных препаратов — престиж, КС (1.0 л/т), селест Топ, КС (0.4 л/т), применение гербицидов за 3–5 сут до появления всходов картофеля — торнадо, ВР (3 л/га) и при высоте растений 10–15 см — титул, СТС (50 г/га) + тренд 90 (80 мл/га), проведение 2–4-х фунгицидных обработок с интервалом в 10–14 сут — ридомил Голд МЦ, ВДГ (2.5 кг/га), сектин Феномен, ВДГ (1.25 кг/га), инфинито, КС (1.4 л/га), полирам, ВДГ (2 кг/га).

На яровом рапсе проводили предпосевную обработку семян инсектицидом круйзер, КС (10 л/т), табу, ВСК (8 л/т), до появления всходов культурных растений — обработка гербицидом дуал Голд, КЭ (1.3 л/га), в фазах розетки листьев и бутонизации — обработка инсектицидами против капустной моли препаратом фуфанон, КЭ (0.15 л/га) и рапсового цветоеда — децис Профи, ВДГ (0.03 кг/га), децис Эксперт, КЭ (0.125 л/га), каратэ Зеон, МКС (0.1 л/га), калипсо, КС (0.1 л/га), при образовании стручков в нижнем ярусе растений — фунгицидами амистар Экстра, СК (1.0 л/га), прозаро, КЭ (0.6 л/га), аканто Плюс, КС (0.6 л/га).

Совместное применение минеральных удобрений и средств защиты растений осуществляли только на озимой ржи, яровом ячмене, картофеле и яровом рапсе. Изученные сорта селекции ЛенНИИСХ “Белогорка”: Славия (озимая рожь), Ленинградский (яровой ячмень), Сударыня (картофель), Оредеж 4 (яровой рапс), допущенные к возделыванию в Северо-Западном регионе. Минеральные удобрения и средства защиты растений вносили механически соответственно поперек и вдоль полей севооборота.

Площадь делянок под каждым из вариантов составляла 0.18 и 0.27 га, площадь одного поля севооборота — 0.60 га, общая площадь под опытом — 4.2 га. Повторность в опыте трехкратная.

Погодные условия в период активной вегетации культур полевого севооборота существенно различались в годы исследования. Избыточное количество осадков выпадало в 2012 г. (139%) и 2013 г. (217%), меньше нормы — в 2015 г. (74%) и 2017 г. (77%), близкое к среднемноголетней норме — в 2014 г. (92%) и 2016 г. (108%). В 2012 г. засушливый период пришелся на 1-ю декаду июня и первые 2 декады июля, в 2013 г. — 3-ю декаду июня, 2014 г. — на весь июль и 1-ю декаду августа, 2015 г. — 2 первые декады июня, 1-е декады июля и августа, 2016 г. — 2-ю и 3-ю декады мая, 2017 г. — 2-ю декаду июня, 1-ю декаду июля, 2 первые декады августа. Наиболее теплыми годами оказались 2013 г. (121%) и 2014 г. (112%), остальные были близки к среднемноголетней норме суточных температур.

Для оценки фитосанитарного состояния посевов и посадок культур севооборота использовали методику постоянных учетных площадок с их стационарным размещением на протяжении всего периода вегетации культур [18, 19]. Площадь постоянных площадок в посевах зерновых культур и ярового рапса составляла 0.1 м², картофеля — 1.4 м². В каждом варианте опыта устанавливали от 6 (картофель) до 12 (зерновые, рапс) постоянных площадок, всего на поле — 54–72. На постоянных площадках определяли видовой состав, численность, проективное покрытие и фитомассу сорных растений в отдельности по видам, поврежденность культурных растений вредителями и развитие болезней. На них же несколько раз за вегетацию определяли густоту и высоту стеблестоя культурных растений, урожайность и основные элементы структуры урожая.

Оценку экономической эффективности применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений проводили в соответствии с методикой, разработанной Гончаровым [20]. При расчете экономических показателей исходили из фактической стоимости примененных агрохимикатов, дизельного топлива, использования соответствующих технических средств, оплаты труда тракториста и специалиста по фитосанитарному мониторингу, а также средней рыночной цены реализации зерновых культур, рапса и картофеля в Северо-Западном регионе.

Статистическую обработку полученных данных проводили методом дисперсионного анализа в программе Statistica 6.

Таблица 1. Экономическая эффективность совместного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в посеве озимой ржи в Северо-Западном регионе РФ

Год	Вариант	Урожайность, ц/га		Прибавка урожайности					
				от удобрений		от пестицидов		от удобрений и пестицидов	
		Без ИСЗР	ИСЗР	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
2013	N0P0K0 (контроль)	27.0	32.0	—	—	5.0	19	—	—
	N65P50K50	42.4	44.9	15.4	57	2.5	6	17.9	66
	N100P75K75	45.8	49.7	18.8	70	3.9	9	22.7	84
2014	N0P0K0 (контроль)	34.1	46.1	—	—	12.0	35	—	—
	N65P50K50	58.1	58.7	24.0	70	0.6	1	24.6	72
	N100P75K75	61.2	69.9	27.1	79	8.7	14	35.8	105
2015	N0P0K0 (контроль)	47.6	57.3	—	—	9.7	20	—	—
	N65P50K50	71.6	79.7	24.0	50	8.1	11	32.1	67
	N100P75K75	80.8	95.4	33.2	70	14.6	18	47.8	100
2016	N0P0K0 (контроль)	26.7	26.3	—	—	0	0	—	—
	N65P50K50	42.9	48.0	16.2	61	5.1	12	21.3	80
	N100P75K75	51.0	52.1	24.3	91	1.1	2	25.4	95
2017	N0P0K0 (контроль)	28.4	31.9	—	—	3.5	12	—	—
	N65P50K50	55.0	63.9	26.6	94	8.9	16	35.5	125
	N100P75K75	65.6	67.5	37.2	131	1.9	3	39.1	138
2013–2017	N0P0K0 (контроль)	32.8	38.7	—	—	5.9	18	—	—
	N65P50K50	54.0	59.0	21.2	65	5.0	9	26.2	80
	N100P75K75	60.9	66.9	28.1	86	6.0	10	34.1	104

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди возделываемых в севообороте культур самую слабую отзывчивость на улучшение минерального питания и фитосанитарного состояния посевов показала озимая рожь. Совместное применение агрохимикатов обеспечивало повышение урожайности этой культуры на 26.2–34.1 ц/га, что в относительных показателях от контроля составило 80–104%. Обращает на себя внимание стабильная ситуация в отношении проявления хозяйственного эффекта, который на протяжении большинства годов в варианте средней удобрённости составлял 66–80%, высокой — 84–105% (табл. 1). Повышение урожайности происходило в основном за счет увеличения густоты продуктивного стеблестоя (49–64%), в меньшей степени за счет количества (13–15%) и массы (3–10%) зерен в колосе, тогда как масса 1000 зерен оставалась без изменений.

Эффективность минеральных удобрений на озимой ржи выражалась прибавками урожая в 21.2 и 28.1 ц/га (65 и 86%) при внесении средних и высоких доз. На фоне остальных выделялся 2017 г., когда из-за затяжной весны и длительного сохранения на полях снежного покрова наблюдали

сильную гибель растений от снежной плесени (67.3%). Внесение минеральных удобрений повышало выносливость растений к данному заболеванию, что приводило к снижению доли погибших растений в 1.3 и 1.4 раза соответственно в вариантах средней и высокой удобрённости [21]. В значительной степени за счет этого эффекта в 2017 г. была получена самая большая прибавка урожайности в удобренных вариантах.

Интегрированная система защиты растений, вследствие обычно вполне удовлетворительной фитосанитарной обстановки [22], слабо влияла на формирование урожая озимой ржи. По усредненным данным, величина сохраненного урожая составляла 5.6 ц/га (12.3%), в разные годы — от 2.1 (4.7%) до 7.1 ц/га (16.7%). При этом в неудобренном варианте, где сильнее проявлялась вредоносность снежной плесени, хозяйственная эффективность защитных мероприятий была в 1.8 раза выше, чем в высокоудобренном варианте.

Более сильные эффекты от комплексного применения средств химизации фиксировали на картофеле. Прибавка урожайности в удобренных и защищенных вариантах в зависимости от дозировки составила 145–209 ц/га (96–138%). Вари-

Таблица 2. Хозяйственная эффективность совместного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в посеве картофеля в Северо-Западном регионе РФ

Год	Вариант	Урожайность, ц/га		Прибавка урожайности					
				от удобрений		от пестицидов		от удобрений и пестицидов	
		Без ИСЗР	ИСЗР	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
2012	N0P0K0 (контроль)	120	255	—	—	135	112	—	—
	N65P50K50	233	332	113	94	98.5	42	212	176
	N100P75K75	255	366	135	112	112	44	246	205
2013	N0P0K0 (контроль)	73.3	185	—	—	112	152	—	—
	N65P50K50	74.6	204	1.3	2	129	173	131	178
	N100P75K75	61.4	207	0	0	145	237	134	182
2014	N0P0K0 (контроль)	147	127	—	—	0	0	—	—
	N65P50K50	199	212	51.9	35	13.1	7	65.0	44
	N100P75K75	231	283	83.1	56	52.1	23	135	92
2015	N0P0K0 (контроль)	280	275	—	—	0	0	—	—
	N65P50K50	399	344	119	42	0	0	63.8	23
	N100P75K75	354	462	74.0	26	108	30	182	65
2016	N0P0K0 (контроль)	120	251	—	—	132	110	—	—
	N65P50K50	176	373	56.8	48	196	111	253	212
	N100P75K75	223	400	103.6	87	177	79	281	235
2017	N0P0K0 (контроль)	171	289	—	—	118	69	—	—
	N65P50K50	119	304	0	0	186	109	134	78
	N100P75K75	130	450	0	0	319	187	279	164
2012–2017	N0P0K0 (контроль)	152	233	—	—	80.8	53	—	—
	N65P50K50	200	297	48.4	32	96.9	48	145	96
	N100P75K75	209	361	57.2	38	152	73	209	138

рование данного показателя по годам было значительным и находилось в пределах 23–212% и 65–235% соответственно в средне- и высокоудобренном вариантах (табл. 2). Наиболее сильное влияние ИХЗР оказывала на продуктивные характеристики картофеля, а именно на массу клубней с одного растения (94–121%) и массу 1-го клубня (70%). Количество клубней с растения увеличивалось под действием агрохимикатов на 18–32%, густота продуктивных растений – 4–11%.

На картофеле, в отличие от озимой ржи, более сильное влияние на урожайность оказывали защитные мероприятия, чем внесение удобрений. Такое положение обусловлено высокой вредоносностью отдельных вредных организмов в природно-климатических условиях Северо-Запада России. К таковым в первую очередь относится фитофтороз, при раннем проявлении способный уничтожить большую часть урожая [23]. Самая высокая отдача от реализуемой в нашем опыте системы интегрированной защиты картофеля от-

мечена в годы эпифитотийного развития фитофтороза (2013 и 2016 гг.), самая низкая – в годы депрессивного развития данного заболевания (2014 и 2015 гг.). Средняя величина сохраненного урожая картофеля при проведении всего необходимого набора защитных мероприятий составила 110 ц/га, или 58% от фактической урожайности культуры, равной 297 ц/га. По усредненным данным 2012–2017 гг., эффективность интегрированной системы защиты картофеля увеличивалась на 20% на фоне внесения высоких доз минеральных удобрений.

Среднемноголетняя прибавка урожая от внесения минеральных удобрений составила 32–38% и только в 2012 г. была значительно больше (94–112%). В 2013 и 2017 гг. положительные эффекты, связанные с действием удобрений, нивелировались сильным поражением посадок картофеля фитофторозом. В полной мере реализовать продуктивный потенциал растений в удобренных вариантах опыта позволяли защитные обработки.

Таблица 3. Хозяйственная эффективность совместного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в посеве ярового рапса в Северо-Западном регионе РФ

Год	Вариант	Урожайность, ц/га		Прибавка урожайности					
				от удобрений		от пестицидов		от удобрений и пестицидов	
		Без ИСЗР	ИСЗР	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
2012	N0P0K0 (контроль)	16.0	15.6	—	—	0	0	—	—
	N65P50K50	21.9	35.2	5.9	37	13.3	61	19.2	120
	N100P75K75	20.3	29.1	4.3	27	8.8	43	13.1	82
2013	N0P0K0 (контроль)	0.3	9.2	—	—	8.9	30.7*	—	—
	N65P50K50	7.4	15.5	7.1	24.7*	8.1	2.1*	15.2	51.7*
	N100P75K75	5.8	17.5	5.5	19.3*	11.7	3.0*	17.2	58.3*
2014	N0P0K0 (контроль)	8.8	18.3	—	—	9.5	108	—	—
	N65P50K50	15.6	21.6	6.8	77	6.0	68	12.8	145
	N100P75K75	14.6	24.6	5.8	66	10.0	114	15.8	179
2015	N0P0K0 (контроль)	21.4	31.1	—	—	9.7	45	—	—
	N65P50K50	12.2	25.6	0	0	13.4	110	4.2	20
	N100P75K75	11.2	21.7	0	0	10.5	94	0.3	1
2017	N0P0K0 (контроль)	11.0	21.5	—	—	10.5	95	—	—
	N65P50K50	8.8	27.8	0	0	19.0	216	16.8	153
	N100P75K75	3.3	17.6	0	0	14.3	433	6.6	60
2012–2015, 2017	N0P0K0 (контроль)	10.3	19.2	—	—	8.9	86	—	—
	N65P50K50	13.2	24.8	2.9	28	11.6	88	14.5	141
	N100P75K75	11.2	21.9	0.9	9	10.7	95	11.6	113

*Прибавка урожайности приведена в размах.

Например, разница в урожайности в удобренных и неудобренных вариантах на фоне интегрированной системы защиты картофеля составляла 28–55% и стабильно фиксировалась на протяжении всего периода исследования, включая 2013 г. (10–12%) и 2017 г. (5–56%).

Совместное применение минеральных удобрений и средств защиты растений в посевах ярового рапса обеспечивало формирование урожайности семян 21.9–24.8 ц/га, что превосходило контроль на 11.6–14.5 ц/га (113–141%) (табл. 3). В 2013 г. из-за практически полностью уничтоженного урожая капустной моли в контрольном варианте прибавка урожайности ярового рапса от средств химизации достигла 15.2–17.2 ц/га, что составило 51.7–58.3 раза (табл. 4). Повышение урожайности происходило в основном за счет количества и массы семян с растения, которые увеличивались на фоне применения удобрений и средств защиты растений на 140 и 139% соответственно.

Ввиду сложной фитосанитарной обстановки, обусловленной сильной засоренностью посевов,

высокой вредоносностью фитофагов и фитопатогенов, возделывание этой культуры на Северо-Западе России без системы интегрированной защиты растений нецелесообразно. Об этом свидетельствовала фактическая урожайность культуры, полученная за годы исследования, которая была равна 11.6 ц/га. При этом в годы сильного развития альтернариоза урожайность снижалась до 7.7 ц/га, массового размножения капустной моли — до 4.5 ц/га. По результатам проведения всех необходимых защитных мероприятий усредненная за годы исследования величина сохраненного урожая ярового рапса составляла 10.4 ц/га (90%), в годы массового размножения капустной моли достигала 9.6 ц/га (213%), сильного развития альтернариоза — 14.6 ц/га (248%).

В отсутствии защитных мероприятий нецелесообразным становится внесение удобрений. В отдельные годы складывалась ситуация, что в удобренных вариантах была получена урожайность рапса в 1.8 раза меньшая, чем в неудобренных. Внесение удобрений приводило к удлинению периода вегетации и сроков созревания ярового рапса, как следствие, более сильному

Таблица 4. Хозяйственная эффективность совместного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в посеве ярового ячменя в Северо-Западном регионе РФ

Год	Вариант	Урожайность, ц/га		Прибавка урожайности					
				от удобрений		от пестицидов		от удобрений и пестицидов	
		Без ИСЗР	ИСЗР	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
2012	N0P0K0 (контроль)	19.2	26.3	—	—	7.1	37	—	—
	N65P50K50	31.4	42.2	12.2	64	10.8	34	23.0	120
	N100P75K75	39.1	49.7	19.9	104	10.6	27	30.5	159
2013	N0P0K0 (контроль)	11.2	15.4	—	—	4.2	38	—	—
	N65P50K50	22.2	31.7	11.0	98	9.5	43	20.5	183
	N100P75K75	29.9	32.7	18.7	167	2.8	9	21.5	192
2014	N0P0K0 (контроль)	12.5	32.2	—	—	19.7	158	—	—
	N65P50K50	34.3	41.5	21.8	174	7.2	21	29.0	232
	N100P75K75	34.0	45.8	21.5	172	11.8	35	33.3	266
2015	N0P0K0 (контроль)	29.5	28.2	—	—	0	0	—	—
	N65P50K50	42.1	47.5	12.6	43	5.4	13	18.0	61
	N100P75K75	52.3	48.7	22.8	77	0	0	19.2	65
2016	N0P0K0 (контроль)	14.4	12.3	—	—	0	0	—	—
	N65P50K50	27.3	30.3	12.9	90	3.0	11	15.9	110
	N100P75K75	33.3	35.7	18.9	131	2.4	7	21.3	148
2017	N0P0K0 (контроль)	19.9	24.2	—	—	4.3	22	—	—
	N65P50K50	37.5	49.7	17.6	88	12.2	33	29.8	150
	N100P75K75	46.9	56.2	27.0	136	9.3	20	36.3	182
2012–2017	N0P0K0 (контроль)	17.9	23.0	—	—	5.1	28	—	—
	N65P50K50	32.4	40.4	14.5	81	8.0	25	22.5	126
	N100P75K75	39.2	44.6	21.3	119	5.4	14	26.7	149

поражению культурных растений альтернариозом. Обратные эффекты можно наблюдать в годы массового размножения капустной моли, все чаще случающиеся на Северо-Западе РФ, из-за того, что культурные растения, испытывающие дефицит минерального питания, небольшие по высоте и массе, уничтожаются гусеницами в значительной степени [24].

Полученные данные указывали на то, что внесение средних доз минеральных удобрений обеспечивало формирование большей урожайности ярового рапса, чем высоких. Разница в урожайности между соответствующими вариантами опыта в отсутствии защитных мероприятий составила 2.0 ц/га, на фоне интегрированной системы защиты — 2.9 ц/га.

Самая высокая результативность совместного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений выявлена в посевах ярового ячменя. Прибавка урожайности в соответствующих вариантах опыта составила

22.5–26.7 ц/га, или 126–149%. Наибольшая прибавка урожайности ярового ячменя от действия обоих факторов отмечена в 2014 г. (232–266%), наименьшая — в 2015 г. (61–65%). Основными элементами структуры урожая, за счет которых происходило повышение урожайности ярового ячменя, являлись густота продуктивного стеблестоя (65–78%), масса (37–39%) и количество (29–30%) зерен в колосе, в меньшей степени — масса 1000 зерен (9–10%).

Основной вклад в формирование урожайности ярового ячменя достигался за счет применения минеральных удобрений. На протяжении большинства лет исследования прибавка урожая ярового ячменя в варианте средней удобренности составляла 11.0–12.9 ц/га (43–98%), высокой удобренности — 18.7–22.8 ц/га (77–167%). При этом между вариантами со средними и высокими дозами удобрений в абсолютном большинстве случаев наблюдали достоверные различия в урожайности с варьированием по годам от 6.0 до 10.2 ц/га.

Таблица 5. Вклад основных средств химизации в формирование урожайности культур полевого севооборота на Северо-Западе РФ

Год	Культура/Факторы											
	озимая рожь			яровой ячмень			картофель			яровой рапс		
	МУ	ИСЗР	МУ–ИСЗР	МУ	ИСЗР	МУ–ИСЗР	МУ	ИСЗР	МУ–ИСЗР	МУ	ИСЗР	МУ–ИСЗР
2012	—	—	—	34.1*	19.2*	0.5	21.1*	25.2*	0.4	37.3*	16.1*	6.1*
2013	31.2*	1.9	1.6	32.1*	4.1*	1.1	0.3	85.0*	1.0	19.6*	51.9*	1.8
2014	36.8*	3.8*	4.1*	32.8*	21.9*	3.6*	58.2*	1.3	5.4*	12.0*	30.7*	1.3
2015	53.1*	7.1*	0.5	52.0*	0.01	2.3	42.8*	0.9	16.5*	13.0*	23.4*	0.5
2016	47.2*	0.5	0.5	70.8*	0.3	1.2	23.9*	60.4*	1.6	—	—	—
2017	60.9*	0.9	2.0	70.1*	8.3*	1.2	6.6*	63.2*	10.3*	12.4*	59.9*	3.4*
2012–2017	45.8*	2.8	1.4	48.7*	9.0*	1.7	25.5*	39.3*	5.9*	18.9*	36.4*	2.6

Примечание. МУ – минеральные удобрения, ИСЗР – интегральная система защиты растений. То же в табл. 6.

*Различия достоверны при $P \geq 0.95$.

Максимальная прибавка урожая в удобренных вариантах отмечена в 2014 г., когда в критический период для роста и развития ярового ячменя, приходящийся на фазы появление всходов–кущение, выпало избыточное (на 74%) количество осадков, сопровождавшееся повышенным (на 33%) температурным режимом.

Система интегрированной защиты обеспечивала величину сохраненного урожая ярового ячменя, равную 6.3 ц/га (21%). Наибольший хозяйственный эффект от применения средств защиты растений составлял 12.9 ц/га (48%), когда в посевах ярового ячменя отмечена самая неблагоприятная фитосанитарная обстановка. Например, в 2014 г. густота сорных растений в фазе кушения культуры достигала 958 экз./м² при проективном покрытии 43.6%, развитие корневых гнилей – 33.8%, гельминтоспориозных пятнистостей листьев в фазе молочно-восковой спелости – 20.6%. В ситуации слабой засоренности посева (9.8% проективного покрытия), слабого поражения растений ячменя корневыми гнилями (2.5%) и гельминтоспориозом (3.8%), как это было в 2015 г., применение всего комплекса защитных мероприятий было неоправданно, поскольку не приводило к достоверному повышению урожайности. При этом хозяйственная эффективность защитных мероприятий была в 2.0 раза больше в неудобренном варианте, где сильнее проявлялась вредоносность корневых гнилей и гельминтоспориозных пятнистостей листьев [25].

Вклад основных факторов химизации в формирование урожайности культур полевого севооборота хорошо виден по результатам дисперсионного анализа (табл. 5). Влияние минерального питания составляло от 48.7% для ярового ячменя

до 18.9% для ярового рапса, интегрированной системы защиты растений – от 39.3% для картофеля до 2.8% для озимой ржи. Самое стабильное по годам влияние защитных мероприятий отмечено для ярового рапса, самое значительное – для картофеля при эпифитотийном развитии фитофтороза. Эффект взаимодействия от совместного применения удобрений и пестицидов отмечен чаще всего для картофеля и не превышал 16.5% влияния на урожайность этой культуры. Для других культур достоверные случаи взаимодействия обоих факторов химизации наблюдали значительно реже и ограничивались 3.6% для ярового ячменя, 4.1% – озимой ржи, 6.1% – ярового рапса. Взаимодействие обеспечивало формирование более высокой урожайности культур севооборота по сравнению с отдельным влиянием удобрений и защитных обработок.

Для объективной оценки совместного влияния минеральных удобрений и защитных мероприятий на продуктивность севооборота был проведен перерасчет урожайности возделываемых культур в единые показатели, а именно выход зерновых единиц (з.е.) с 1 га севооборотной площади. При этом в расчетах участвовали все культуры севооборота, включая многолетние травы. Оказалось, что влияние удобрений выражалось увеличением продуктивности севооборота на 8.0–10.6 ц з.е./га (25.2–33.3%), интегрированной системы защиты растений – 6.0–12.1 ц з.е./га (18.9–28.5%), обоих факторов химизации – 16.2–22.7 ц з.е./га (50.9–71.4%).

Наибольший чистый доход от применения удобрений и интегрированной системы защиты растений был получен на картофеле и яровом рапсе, где он составил соответственно 146419–

Таблица 6. Экономическая эффективность совместного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в посевах культур полевого севооборота в Северо-Западном регионе РФ

Наименование	Фон минерального питания и защиты растений					
	N0P0K0		N65P50K50		N100P75K75	
	Без ИСЗР	ИСЗР	Без ИСЗР	ИСЗР	Без ИСЗР	ИСЗР
Озимая рожь						
Полученный урожай, ц/га	32.8	38.7	54.0	59.0	60.9	66.9
Сохраненный урожай, ц/га	—	5.9	21.2	26.2	28.1	34.1
Стоимость сохраненного урожая, руб./га	—	4130	14840	18340	19670	23870
Затраты на защиту растений и внесение удобрений, руб./га	—	900	10941	14888	15274	19221
Затраты на уборку и доработку сохраненного урожая, руб./га	—	177	636	786	843	1023
Чистый доход, руб./га	—	3053	3263	2666	3553	3626
Яровой рапс						
Полученный урожай, ц/га	10.3	19.2	13.2	24.8	11.2	21.9
Сохраненный урожай, ц/га	—	8.9	2.9	14.5	0.9	11.6
Стоимость сохраненного урожая, руб./га	—	89000	29000	145000	9000	116000
Затраты на защиту растений и внесение удобрений, руб./га	—	10423	10941	24771	15274	29104
Затраты на уборку и доработку сохраненного урожая, руб./га	—	267	87	435	27	348
Чистый доход, руб./га	—	78310	17972	119794	—	86548
Картофель						
Полученный урожай, ц/га	152	233	200	297	209	361
Сохраненный урожай, ц/га	—	80.8	48.4	145.3	57.2	209.4
Стоимость сохраненного урожая, руб./га	—	109807	60597	244831	71614	281434
Затраты на защиту растений и внесение удобрений, руб./га	—	19611	6151	25762	9323	28934
Затраты на уборку и доработку сохраненного урожая, руб./га	—	40400	24200	72650	28600	104700
Чистый доход, руб./га	—	49796	30246	146419	33691	147800
Яровой ячмень						
Полученный урожай, ц/га	17.9	23.0	32.4	40.4	39.2	44.6
Сохраненный урожай, ц/га	—	5.1	14.5	22.5	21.3	26.7
Стоимость сохраненного урожая, руб./га	—	4590	13050	20250	19170	24030
Затраты на защиту растений и внесение удобрений, руб./га	—	1263	10941	14150	15274	18483
Затраты на уборку и доработку сохраненного урожая, руб./га	—	153	435	675	639	801
Чистый доход, руб./га	—	3174	1674	5425	3257	4746

147800 и 86548–119974 руб./га. Среди зерновых культур, возделываемых в севообороте, прибыль от применения средств химизации оказалась больше при возделывании ярового ячменя, чем озимой ржи (табл. 6). При этом проведение защитных обработок на фоне внесения высокой дозы минеральных удобрений на большинстве культур оказалось экономически не целесообразным. Оптимальным вариантом можно считать внесение средней дозы минеральных удобрений и проведение мероприятий, предусмотренных системой интегрированной защиты. В этом случае за счет интегрированной защиты растений экономический эффект возрастал в 3.2 раза при возделывании ярового ячменя, 4.8 раза — картофеля, 6.7 раза — ярового рапса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместное применение минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений обеспечивало формирование наиболее высокой урожайности культур и продуктивности полевого севооборота на Северо-Западе РФ. Наименьшая прибавка урожайности от действия обоих факторов химизации отмечали в посевах озимой ржи (30.2 ц/га или 90%), наибольшая — ярового ячменя (24.6 ц/га или 138%), промежуточное положение занимали картофель (177.4 ц/га или 117%) и яровой рапс (13.1 ц/га или 127%). Рост продуктивности севооборота при улучшении питательного режима культурных растений и фитосанитарной обстановки достигал 16.2–22.7 ц з.е./га (50.9–71.4%).

Основной вклад в формирование урожая ярового ячменя (17.9 ц/га или 100%) и озимой ржи (24.7 ц/га или 76%) осуществлялся за счет внесения минеральных удобрений, ярового рапса (10.4 ц/га или 90%) и картофеля (110 ц/га или 58%) — интегрированной системы защиты растений. Эффект взаимодействия от совместного применения удобрений и пестицидов был слабым и не постоянным, не превышал 16.5% влияния на урожайность картофеля, 6.1% — ярового рапса, 4.1% — озимой ржи, 3.6% — ярового ячменя.

Наибольшая эффективность интегрированной системы защиты растений приходилась на годы сильного поражения озимой ржи снежной плесенью, картофеля — фитофторозом, ярового ячменя — корневыми гнилями, гельминтоспориозными пятнистостями листьев и засоренностью посевов, ярового рапса — альтернариозом и повреждению капустной молю. Хозяйственная эффективность защитных мероприятий была больше (в 1.8 и 2.0 раза) в неудобренном варианте в

посевах озимой ржи (в 1.8 раза) и ярового ячменя (в 2.0 раза), где сильнее проявлялась вредоносность снежной плесени, корневых гнилей и гельминтоспориозных пятнистостей, в посеве ярового рапса (в 10.2 раза) — при массовом размножении капустной моли. Обратная ситуация отмечена в посевах ярового рапса (в 4.5 раза) в годы сильного поражения растений альтернариозом и картофеля (в 2.2 раза) при эпифитотийном развитии фитофтороза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ладонин В.Ф., Алиев А.М., Валькова В.А.* Агроэкологические аспекты комплексного применения средств химизации в севооборотах Российского Нечерноземья. Сообщение 1. Эффективность комплекса средств химизации в полевом севообороте // *Агрохимия*. 1992. № 9. С. 45–52.
2. *Ладонин В.Ф.* Эффективность и перспективы комплексного применения удобрений, пестицидов и регуляторов роста растений в земледелии России // *Агрохимия*. 1997. № 1. С. 8–9.
3. *Прищепа И.А.* Влияние минеральных удобрений на эффективность пестицидов и ретардантов, применяемых на посевах зерновых колосовых культур // *Вестн. защиты раст.* 2000. № 1. С. 73–93.
4. *Алиев А.М., Самойлов Л.Н., Цимбалист Н.И.* Эффективность комплексного применения средств химизации в Нечерноземной зоне (итоги 55 лет исследований в длительном полевом опыте) // *Агрохимия*. 2016. № 2. С. 20–30.
5. *Стрижков Н.И., Пронько В.В., Корсаков К.В., Говряков А.С.* Эффективность совместного применения минеральных удобрений, гербицидов и регуляторов роста при возделывании овса на черноземах южных Саратовского правобережья // *Вестн. СаратовГАУ*. 2012. № 1. С. 61–63.
6. *Титова Е.М., Внукова М.А.* Эффективность комплексного применения удобрений и гербицида Димесол на посевах ярового ячменя // *Вестн. ОрелГАУ*. 2012. № 2. С. 32–35.
7. *Павлюшин В.А.* Научное обеспечение защиты растений и продовольственная безопасность России // *Защита и карантин раст.* 2010. № 2. С. 11–15.
8. *Павлюшин В.А.* Проблемы фитосанитарного оздоровления агроэкосистем // *Вестн. защиты раст.* 2011. № 2. С. 3–9.
9. *Хаирова Н.И.* Эффективность совместного применения азотных удобрений и химических средств защиты растений под ячмень на дерново-подзолистой суглинистой почве: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2014. 30 с.
10. *Шарков И.Н., Захаров Г.М., Крупская Т.Н.* Эффективность применения средств химизации под яровую пшеницу в лесостепи Западной Сибири // *Земледелие*. 2017. № 6. С. 16–18.
11. *Ториков В.Е., Мельникова О.В., Мамеев В.В., Осипов А.А.* Влияние уровня применения средств химизации на фитосанитарное состояние посевов и урожайность зерна озимой пшеницы в системе пло-

- сменного севооборота // Аграрн. вестн. Верхневолжья. 2019. № 2(27). С. 38–43.
12. Алиев А.М., Варламов В.А., Ваулина Г.И., Державин Л.М., Переведенцева С.В., Самойлов Л.Н., Сычев В.Г., Шаповал О.А., Яковлева Т.А. Комплексное применение агрохимических средств – основа высокой продуктивности и устойчивости земледелия // Плодородие. 2009. № 2(47). С. 5–8.
 13. Шпанев А.М., Фесенко М.А., Смук В.В. Эффективность комплексного применения средств химизации при возделывании ярового ячменя на Северо-Западе РФ // Агрохимия. 2019. № 12. С. 47–55.
 14. Кононова А.М. Продуктивность севооборота при комплексном применении средств химизации // Плодородие. 2010. № 4(55). С. 15–17.
 15. Кононова А.М., Державин Л.М., Самойлов Л.Н. Продуктивность севооборота и плодородие дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при длительном применении агрохимических средств // Достиж. науки и техн. АПК. 2011. № 3. С. 9–11.
 16. Шпанев А.М., Денисюк Е.С., Смук В.В. Перспективы биологической защиты ярового ячменя и картофеля от болезней в Северо-Западном регионе РФ // Информ. бюл. ВПРС МОББ. 2017. № 52. С. 330–334.
 17. Шпанев А.М., Денисюк Е.С. Эффективность микробиологических препаратов на основе *Bacillus subtilis* и *Trichoderma harzianum* в защите ярового ячменя от болезней на Северо-Западе России // Биотехнология. 2020. Т. 36. № 1. С. 61–72.
 18. Зубков А.Ф. Методические указания по сбору полевой биоценологической информации с целью оценки вредоносности комплекса вредных организмов. Л.: ВИЗР, 1978. 18 с.
 19. Шпанев А.М., Голубев С.В. Агробиоценоз яровых зерновых культур (юго-восток ЦЧЗ). СПб., 2010. 128 с.
 20. Гончаров Н.Р. Методика экономической оценки эффективности мероприятий по защите растений в условиях производственного эксперимента. СПб., 2017. 26 с.
 21. Шпанев А.М., Фесенко М.А. Влияние предпосевного внесения полного минерального удобрения на фитосанитарное состояние посевов озимой ржи на Северо-Западе России // Вестн. защиты раст. 2019. № 3. С. 34–40.
 22. Шпанев А.М. Фитосанитарное состояние посевов озимой ржи на агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института // Вестн. защиты раст. 2018. № 3(97). С. 67–72.
 23. Шпанев А.М., Смук В.В. Эпифитотии развития фитофтороза на картофеле в Северо-Западном регионе // Совр. микология в России. Т. 7. М., 2017. С. 113–114.
 24. Шпанев А.М. Массовое размножение капустной моли // Защита и карантин раст. 2015. № 9. С. 43–45.
 25. Рогожников Е.С., Шпанев А.М., Фесенко М.А. Влияние удобрений на поражение ярового ячменя болезнями в IV агроклиматической зоне Ленинградской области // Вестн. защиты раст. 2016. № 4(90). С. 56–61.

Efficiency of Application of Mineral Fertilizers and Integrated Plant Protection System in Field Crop Rotation in the North-West of the Russian Federation

A. M. Shpanev^{a,b,#}, M. A. Fesenko^a, and V. V. Smuk^{a,b}

^aAgrophysical Research Institute
Grazhdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

^bAll-Russian Institute of Plant Protection
shosse Podbel'skogo 3, Saint-Petersburg 196608, Russia

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

The results of the long term research showed that the combined usage of the mineral fertilizers and integrated plant protection systems allowed for the highest crop harvest and productivity on fields in the North-West Russia. The lowest increase of harvest resulted from both chemical factors was reported for winter rye (30.2 c/ha – 90%), the highest increase was reported for barley (24.6 c/ha – 138%), the intermediate results showed potato (177.4 c/ha – 117%) and spring rape (13.1 c/ha – 127%). The most important input to the harvest productivity of spring barley (17.9 c/ha – 100%) and winter rye (24.7 c/ha – 76%) was due to the application of mineral fertilizers, and the most important input to the harvest productivity for the spring raps (10.4 c/ha – 90%) and potato (110 c/ha – 58%) was due to the integrated system of plant protection. The effect of the interaction from the combined usage of the fertilizers and pesticides was low (3.6–16.5%) and unstable for all the crops. The productivity increase of the field during the improvement of the crops nutritional regime and phytosanitary state reached 16.2–22.7 centner grain units/ha (50.9–71.4%).

Key words: crop rotation, mineral fertilizers, integrated plant protection system, phytosanitary condition, complex influence of chemicals.

СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЯ В ГОРМОНАЛЬНОЙ И РОСТОВОЙ РЕАКЦИИ КОРНЕЙ РАСТЕНИЙ РАЗНЫХ ГЕНОТИПОВ НА ДЕФИЦИТ ФОСФАТОВ¹

© 2021 г. Л. Б. Высоцкая^{1,*}, А. В. Феоктистова¹, З. А. Ахтямова¹,
Г. Р. Ахиярова¹, А. В. Коробова¹, Г. Р. Кудоярова¹

¹Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

*E-mail: vysotskaya@anrb.ru

Поступила в редакцию 23.04.2020 г.

После доработки 04.06.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

Дефицит фосфора в растениях арабидопсиса и ячменя вызывал перераспределение массы в пользу корня, обусловленное снижением содержания в побеге цитокининов (ЦК). У растений ячменя сорта Прерия это происходило за счет регуляции вторично активного трансмембранного переноса, у сорта Steptoe — уменьшения оттока ЦК из корней в результате подавления их синтеза. Отсутствие адаптивного ростового ответа мутанта ячменя AZ34 на удаление фосфата из среды связано с нарушением синтеза абсцизовой кислоты (АБК), повлекшим изменения содержания и распределения не только этого гормона, но и ЦК, индолилуксусной кислоты (ИУК). Обсуждается взаимное влияние гормонов и ключевая роль АБК в реализации ростового ответа на дефицит фосфора.

Ключевые слова: ячмень, арабидопсис, дефицит фосфора, рост, АБК, цитокинины, ИУК.

DOI: 10.31857/S0002188121010129

ВВЕДЕНИЕ

Изменение архитектуры корней — важная адаптивная реакция растений, обеспечивающая оптимизацию поглощения элементов минерального питания и воды. Относительная активация роста корней предполагает возрастание соотношения массы корней к массе побега и обеспечивает увеличение поглотительной способности корней при дефиците ресурсов в почвенном растворе. Быстрое удлинение корней позволяет растению осуществить поиск ресурсов в почве, а активное ветвление — быстрый захват элементов минерального питания [1]. Вместе с тем ростовая реакция на изменение уровня минерального питания не одинакова у растений разных видов и сортов [2, 3]. В этой связи выявление механизмов, от которых зависят особенности роста растений, в том числе и корневой системы, вызывает живой интерес исследователей. Предполагается, что изменение архитектуры корней в соответствии с условиями их обитания контролируется гормона-

ми, концентрация которых меняется под влиянием внешних воздействий [4]. Например, регуляторная роль цитокининов (ЦК) чаще обсуждается в реакции на уровень нитратов [5], а снижение концентрации этого гормона считается важным фактором в относительной активации роста корней при дефиците элементов минерального питания [6]. Предполагается, что накопление абсцизовой кислоты (АБК) при стрессе способствует относительной активации роста корней, что было наиболее убедительно показано в экспериментах с дефицитом воды [7]. Обсуждается роль ауксинов (ИУК) в регуляции ветвления корней при дефиците фосфатов [8]. Предположения о роли гормонов в регуляции архитектуры корней основаны скорее на данных косвенного характера — в основном на особенностях реакции на уровень минерального питания у генно-модифицированных растений, а если и измеряли содержание гормонов, то в лучшем случае — концентрация одного из них [5, 8, 9]. Одновременное определение нескольких гормонов и особенно АБК — редкое исключение [10], в то время как взаимодействие гормонов важно для более ясного понимания механизма регуляции роста корней [11, 12]. Лишь

¹ Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “Агидель”, при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-04-00305 и госзадания АААА-А18-118022190099-6.

единичные работы посвящены изучению этой проблемы при дефиците фосфора [13], хотя растения практически всегда испытывают его недостаток из-за плохой растворимости фосфатов и недоступности для растений органических и комплексных соединений фосфора в почве. Соответственно, цель данной работы — выявление особенностей изменения содержания гормонов (цитокенинов, индолилуксусной кислоты и АБК) хорошо изученного модельного растения арабидопсиса [2, 8] и ячменя как важной сельскохозяйственной культуры [14], а также установление связи этих изменений с ростовой реакцией корней при дефиците фосфатов. Наряду с мутантными растениями ячменя AZ34 со сниженной способностью к синтезу АБК и растениями исходного генотипа сорта Steptoe, также был изучен сорт Прерия, который характеризуется как засухоустойчивый.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили растения арабидопсиса экотипа Columbia (*Col*) и ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сортов Прерия (внесен в Госреестр РФ) и Steptoe [15], а также мутанта Az34 [16] со сниженной способностью к синтезу АБК, появление которого стало результатом мутации гена *nar2a* исходного генотипа Steptoe. Семена после холодовой индукции при 4°C проращивали в темноте. Проростки ячменя высаживали на плотки из стеклянных трубок и переносили на фосфатсодержащий (P+) модифицированный 10%-ный раствор Хогланда—Арнона (X—A) и на не содержащий KH_2PO_4 (P—) для моделирования дефицита фосфора. Модификация X—A (0.5 mM KNO_3 , 0.5 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0.1 mM KH_2PO_4 , 0.1 mM MgSO_4) состояла в замене KH_2PO_4 на NaH_2PO_4 для выравнивания концентрации ионов калия в (P+) и (P—) растворах. Замена существенно не влияла на рост растений, которые служили контролем. Проростки арабидопсиса пересаживали в сосуды с песком, пропитанным 100%-ным раствором X—A и выращивали до 2—3-х настоящих листьев. Затем пересаживали на плотки, в качестве которых служили полистироловые планшеты с отверстиями и переносили на (P+) и (P—) растворы так же, как и растения ячменя. Для предотвращения изменений pH, а в контрольных растворах — дефицита питания и фосфора, по ходу эксперимента все питательные среды ежедневно заменяли на свежие. Растения ячменя выращивали в условиях светоплощадки: 14 ч фотопериод 25—27/18°C день/ночь и 400 мкмоль/м²/с ФАР, растения арабидопсиса — в климатической

камере при 120 мкмоль/м²/с ФАР, 23/19°C день/ночь, относительной влажности воздуха 70%.

После переноса растений на бесфосфатную среду через 1 сут (ячмень) и через 3 сут (арабидопсис) отбирали образцы побегов и корней на определение содержания гормонов, а через 5—6 сут измеряли массу побега и корня, длину всех корней (ячмень) или главного (арабидопсис), а также количество боковых корней.

При обработке растений ячменя сорта Прерия протонофором карбонилцианид-*m*-хлорофенилгидразоном (КЦХФ) проростки ячменя в течение 2 сут выращивали на питательном растворе с фосфатом (P+), половина из которых в последующие сутки была перенесена на раствор без фосфата (P—). За один час до отбора проб на гормоны в питательные растворы половины растений (P+) и (P—) вводили протонофор до концентрации 10 мкМ [17].

Для определения содержания гормонов в тканях растительный материал гомогенизировали и экстрагировали 80%-ным этанолом, который упаривали до водного остатка после центрифугирования [14]. Цитокинины, содержащиеся в аликвоте водного остатка, концентрировали на картридже C-18 (Sep-Pak, США). Цитокинины элюировали 80%-ным этанолом, который упаривали досуха и, растворив в 0.02 мл 80%-ного спирта, наносили на силикофловую пластину для тонкослойной хроматографии (Merck 50 × 200 × 0.25 мм силикагеля 60 F-254, Германия). В состав смеси для разделения цитокининов входили бутанол, аммиак, вода (6 : 1 : 2 v/v). В соответствии с положением метчиков зеатина, зетинрибозид и зетиннуклеотида в УФ-свете содержащее зон элюировали 0.1 М фосфатным буфером (pH 7.4), в супернатанте определяли содержание цитокининов с помощью твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА), используя антитела к зеатину, зетинрибозиду, которые имеют высокую специфичность к производным зеатина [18] и высокую иммунореактивность к зеатину, рибозиду и нуклеотиду зеатина [19]. Для определения содержания ИУК и АБК из аликвоты водного остатка, который предварительно разбавляли дистиллированной водой и подкисляли до pH 2.5, гормоны дважды экстрагировали диэтиловым эфиром (соотношение органической фазы и неорганической 1 : 3) [20]. На следующем этапе очистки к диэтиловому эфиру, содержащему гормоны, добавляли 1%-ный раствор гидрокарбоната натрия (pH 7.0—8.0, соотношение органической и неорганической фазы 2 : 1), из которого после подкисления до pH 2.5 вновь экстрагировали гормоны диэтиловым эфиром. Метилирование гормонов осу-

Таблица 1. Соотношение масс побег/корень, общая длина первичных корней и число боковых корней растений арабидопсиса (Col) и ячменя сортов Прерия, Steptoe и мутанта AZ34, при выращивании в течение 5–6 сут на содержащей (P+) и не содержащей (P–) фосфаты питательных средах

Вид, сорт	Длина первичных корней, см		Побег/корень, г/г		Число боковых корней	
	P+	P–	P+	P–	P+	P–
Арабидопсис	55 ± 3	74 ± 4*	5.7 ± 0.5*	3.3 ± 0.4	10 ± 2	16 ± 2*
Прерия	33 ± 3	32 ± 2	2.1 ± 0.1*	1.6 ± 0.1	23 ± 3*	14 ± 2
Steptoe	31 ± 2	37 ± 2*	2.7 ± 0.1*	2.2 ± 0.1	25 ± 3	29 ± 3
AZ34	29 ± 3	27 ± 3	3.0 ± 0.2	3.0 ± 0.2	32 ± 2	28 ± 2

Примечания. 1. Достоверно отличающиеся величины каждого показателя между вариантами выращивания (P+) и (P–) обозначены звездочками. То же в табл. 2. 2. $n = 30$, $p \leq 0.05$, t -тест.

шествовали диазометаном, после упаривания эфира и растворения в 80%-ном этаноле проводили иммуноферментный анализ с использованием сыворотки, содержащей антитела к ИУК и АБК.

Для иммуногистохимической локализации цитокининов и АБК через 1 сут воздействия дефицита фосфора отрезали верхушку главного корня длиной 5 мм и немедленно фиксировали либо смесью альдегидов (4%-ный параформальдегид и 0.1%-ный глutarальдегид на фосфатном буфере) для фиксации цитокининов [17], либо 4%-ным карбодиимидом (EDAC, Sigma, Япония) – для АБК [21]. Растительные ткани выдерживали в фиксаторе в течение 14 ч при 4°C, первые 30 мин создавали вакуум для улучшения проникновения раствора фиксатора. Постепенное обезвоживание проводили в серии разведений этанола (от 10 до 96%). На следующем этапе образцы тканей корня заключали в гидрофильную метакрилатную смолу JB4 (Electron Microscopy Sciences, США). Ультратонкие продольные срезы корней толщиной 1.5 мкм получали на ротационном микротоме (HM 325, “MICROM Laborgerate”, Германия) и помещали на предметные стекла. Для выявления локализации гормонов на срезах корней использовали кроличью иммунную сыворотку, содержащую специфические антитела к зеатинрибозиду или АБК. Разведения сывороток готовили на 0.1 М фосфатном буфере, содержащем 0.2%-ный желатин и 0.05%-ный Твин-20. Далее на срезы наносили вторичные иммуноглобулины козы против антител кролика, меченные коллоидным золотом (“Aurion”, Голландия). Иммунное золото проявляли препаратом серебра (“Aurion”, Голландия) и в световом микроскопе Axio Imager.A1 (“CarlZeiss Jena”, Германия), оборудованном цифровой камерой AxioCam MRc5 (“CarlZeiss Jena”), анализировали почернение срезов. Для контроля специфичности окрашивания часть срезов параллельно обрабатывали не-

иммунной сывороткой. Количественная оценка интенсивности окрашивания срезов на цитокинины и АБК выполнена с помощью программы ImageJ, как описано в [21], в условных единицах: за 100 принят максимальный уровень интенсивности окрашивания, за 0 – минимальный.

Активность цитокининоксидазы [22] определяли как деградацию изопентениладенина (ИП) в реакционной смеси с добавлением белка, выделенного из растений разных (P+ и P–) питательных сред (нг ИП/г белка/ч).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение ростовой реакции растений арабидопсиса и ячменя на удаление фосфатов из питательной среды выявило, что общей и воспроизводимой ростовой реакцией было снижение соотношения массы побега к массе корня (табл. 1). Эта реакция проявлялась у растений арабидопсиса и ячменя сортов Прерия и Steptoe, а ее отсутствие было зарегистрировано только у дефицитного по АБК мутанта ячменя AZ34. Дефицит фосфора ускорял удлинение корней растений арабидопсиса и ячменя сорта Steptoe, в то время, как ни у мутанта, ни у растений сорта Прерия дефицит фосфора не оказывал влияния на длину корней. Стимуляция ветвления после изъятия фосфата из питательного раствора была обнаружена у растений арабидопсиса. У ячменя сорта Прерия удаление фосфатов из питательной среды вызывало достоверное снижение количества боковых корней.

Сравнение ростовой и гормональной реакции на дефицит фосфора изученных растений показало, что снижение концентрации цитокининов в побеге предшествовало относительной активации роста корней (увеличение доли корня в массе растения) и было почти универсальным ответом (табл. 2). Только у дефицитного по АБК мутанта ячменя не было выявлено снижения содержания

Таблица 2. Концентрация ИУК, АБК и цитокининов (нг/г сырой массы) в побегах и корнях растений Арабидопсиса (Col) и ячменя сортов Прерия, Steptoe и мутанта AZ34, которые росли в течение 3-х (арабидопсис) или 1-х (ячмень) сут на питательном растворе, содержащем (P+) и не содержащем (P-) фосфат

Вид, сорт	ИУК		АБК		ЦК (Z+ZR+ZN)	
	P+	P–	P+	P–	P+	P–
Побег						
Арабидопсис	13 ± 1	21 ± 2*	4 ± 1	3 ± 1	4 ± 1*	2 ± 1
Прерия	6 ± 1*	4 ± 1	11 ± 1	14 ± 2	17 ± 2*	8 ± 2
Steptoe	25 ± 2	23 ± 2	13 ± 2	12 ± 2	10 ± 2*	6 ± 1
AZ34	26 ± 3	19 ± 2	10 ± 1	11 ± 2	7 ± 1	8 ± 1
Корень						
Арабидопсис	6 ± 1	9 ± 1*	20 ± 2	19 ± 2	10 ± 1	12 ± 2
Прерия	3.4 ± 0.2	3.9 ± 0.2	15 ± 1	22 ± 1*	10 ± 1	26 ± 2*
Steptoe	24 ± 2	40 ± 3*	20 ± 2	19 ± 1	8 ± 1	8 ± 1
AZ34	33 ± 2	34 ± 2	10 ± 1	13 ± 1	11 ± 1	9 ± 1

Примечание. $n = 9$, $p \leq 0.05$, t -тест.

цитокининов в побеге, что совпадало с отсутствием относительной активации роста корней. Очевидно, что обнаруженное соответствие не было случайным. Показано, что цитокинины необходимы для поддержания роста побега [6], снижение их уровня в этом органе при дефиците фосфора способствует ингибированию его роста, что освобождает ресурсы для их экспорта в корни.

Механизмы снижения концентрации цитокининов в побеге при фосфатном голодании, исходя из анализа полученных экспериментальных данных, могли быть различными. У растений ячменя сорта Прерия обнаружено снижение концентрации цитокининов в побеге, предположительно, являлось следствием ингибирования их транспорта в побег из корней, поскольку было выявлено их накопление в корнях на фоне дефицита фосфора (табл. 2). Ранее было показано, что снижение оттока цитокининов из корней может быть обусловлено их активным поглощением клетками корней [17]. В настоящих экспериментах с растениями ячменя сорта Прерия ингибирование вторично активного трансмембранного переноса с помощью протонифора КЦХФ уменьшало уровень накопления цитокининов в корнях и увеличивало их концентрацию в побеге на фоне дефицита фосфатов (рис. 1). Эти результаты являются аргументом в пользу предположения о том, что в случае растений ячменя сорта Прерия снижение уровня цитокининов в побеге было результатом ингибирования их транспорта из корней за счет активного поглощения этих гормонов клетками корней. В случае сорта Steptoe, механизм снижения притока цитокининов из корней при дефиците фосфатов мог быть иным. У сорта

Steptoe в наших экспериментах при дефиците фосфора была выявлена стимуляция удлинения корней, при этом концентрация цитокининов в целом корне (нг/г) не зависела от среды выращивания (P+ и P–). Очевидно, что основные события, связанные с ростом корня в длину, происходили в его апексе. С помощью метода иммуногистохимической локализации с использованием специфических антител к гормону была проведена оценка интенсивности окрашивания на присутствие в клетках кончика корня цитокининов. Как видно из рисунка, окрашивание на цитокинины достоверно снижалось под влиянием дефицита фосфатов (рис. 2). Поскольку апекс корня является местом синтеза цитокининов, эти результаты дают основание предполагать, что у растений ячменя сорта Steptoe дефицит фосфора подавлял синтез цитокининов. Таким образом, снижение уровня цитокининов в побегах этих растений при данном воздействии могло быть следствием уменьшения притока цитокининов из корней в результате подавления их синтеза.

В литературе очень широко представлены результаты исследований с растениями арабидопсиса, которые выращивали на среде с агаром и сахарозой. В большинстве этих экспериментов было зарегистрировано торможение линейного роста корней [3], которое исследователи зачастую рассматривают как адаптивную реакцию растений, поскольку фосфаты из-за их низкой растворимости накапливаются в верхних слоях почвы [23]. В наших опытах мы не обнаружили снижения скорости удлинения корней при дефиците фосфатов ни у одного из изученных генотипов (табл. 1), что, предположительно, могло быть свя-

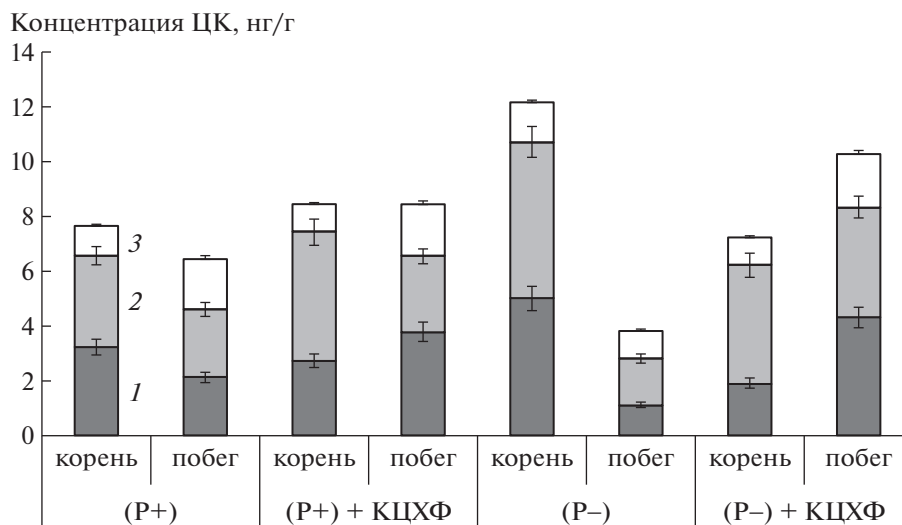


Рис. 1. Концентрация цитокининов (зеатин (Z) — 1, зеатинрибозид (ZR) — 2, зеатиннуклеотид (ZN) — 3), нг/г сырой массы, в корнях и побегах проростков ячменя сорта Прерия, которые в течение 1 сут выращивали на содержащем (P+) и не содержащем (P-) фосфат питательных растворах. За один час до отбора проб на гормоны в растворы вносили протонифор КЦХФ до 10 мкМ. Представлены средние величины и ошибки среднего, $n = 9$.

зано в том числе и с отсутствием сахарозы в использованной в опытах питательной среде. Сегодня уже доказано, что само присутствие сахарозы в питательном растворе влияет на ростовую реакцию корней [24]. Вместе с тем у растений пшеницы дефицит фосфатов вызывал стимуляцию, а не подавление скорости роста корней [23]. Авторы объясняют это необходимостью удлинения корней для поиска элементов питания в бедной почве, а затем их активного ветвления в случае достижения богатых питанием слоев.

Что касается регуляции роста корней цитокининами, то в отличие от влияния на побег они скорее подавляют рост корней [6]. Поэтому мы полагаем, что активация удлинения корней, зарегистрированная у растений сорта Steptoe на фоне фосфатного голодания, могла быть следствием понижения уровня цитокининов в апексах корней этих растений (рис. 2).

В наших опытах не было зарегистрировано быстрого (в течение суток) существенного накопления АБК в целом растении (**bulk ABA**) в ответ на дефицит фосфора (табл. 2), лишь в корнях растений ячменя сорта Прерия было обнаружено достоверное накопление этого гормона. Ранее, в опытах с разбавлением питательного раствора наблюдали накопление АБК в побегах растений пшеницы [11]. Стимулом к накоплению гормона было снижение концентрации осмотиков и, возможно, уменьшение тургора клеток побега [25]. В отличие от резкого снижения содержания всех макроэлементов питательного раствора путем его

разбавления, удаление фосфатсодержащей соли не приводило к существенному снижению осмолальности среды, которая для (P+) и (P-) растворов составляла 0.009 осмоль/кг. Возможно, поэтому заметного накопления АБК в целом растении сорта Steptoe не было зарегистрировано при дефиците фосфора. На полной питательной среде у мутанта AZ34, как и ожидалось, содержание АБК было меньше по сравнению с растениями исходного генотипа Steptoe (табл. 2), при фосфатном голодании у мутанта наблюдали отсутствие



Рис. 2. Количественная оценка интенсивности окрашивания на цитокинины срезов апексов корней растений ячменя сорта Steptoe с помощью программы ImageJ. Звездочкой обозначены достоверные различия между (P+) и (P-); $p \leq 0.05$, $n = 12$ окрашенных срезов каждого варианта.

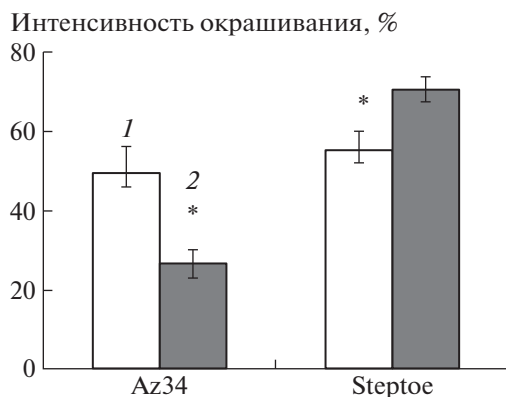


Рис. 3. Количественная оценка интенсивности окрашивания на АБК срезов апексов корней растений ячменя сорта Steptoe и мутанта AZ34 с помощью программы ImageJ. Звездочкой обозначены достоверные различия между (P+) – 1 и (P-) – 2; $p \leq 0.05$, $n = 12$ окрашенных срезов каждого варианта каждого генотипа.

характерных реакций, таких как относительная активация роста корней, снижение содержания цитокининов в побеге. Это свидетельствовало о том, что способность к синтезу АБК играла существенную роль в реакции растений на дефицит фосфатов. В отличие от анализа суммарного содержания АБК иммунолокализация этого гормона в кончиках корней показала достоверное увеличение его содержания у проростков сорта Steptoe и снижение – у мутанта AZ34 (рис. 3).

Ранее было показано, что накопление АБК в результате воздействия тотального дефицита макроэлементов активировало цитокиноксидазу, и, как результат, снижало уровень цитокининов в растениях пшеницы [11]. В наших опытах с удалением фосфата из питательного раствора в апексах корней ячменя сорта Steptoe активации этого фермента под влиянием дефицита фосфора не было обнаружено. Изменение активности цитокиноксидазы наблюдали параллельно со снижением уровня цитокининов. Активность составила 20.2 ± 2.1 и 15.4 ± 1.7 нг ИП/г сырой массы/ч ($n = 9$) в растениях с (P+) и (P-) питательной среды соответственно. В то же время отсутствие как накопления АБК, так и снижения уровня цитокининов в верхушках корней мутанта AZ34, могло свидетельствовать о связи пониженного уровня цитокининов в кончиках корней растений сорта Steptoe с накоплением в них АБК. Способность АБК подавлять уровень экспрессии *IPT*-генов, контролирующих синтез цитокининов [26], позволяет предполагать, что повышенный уровень АБК может способствовать ингибированию синтеза цитокининов.

Наконец, важно обсудить возможное участие ауксинов в реакции корней на дефицит фосфатов. Ауксины чаще всего обсуждают в связи с образованием боковых корней. Обнаруженное повышение концентрации ИУК в корнях арабидопсиса под влиянием дефицита фосфатов соответствует довольно многочисленным свидетельствам усиления ветвления корней растений арабидопсиса на фоне фосфатного голодания [17], а также данным об участии ауксинов в регуляции этих процессов [8, 27]. Тем не менее, у растений ячменя стимуляции ветвления под влиянием дефицита фосфора не обнаружили: у растений ячменя сорта Прерия, наоборот, было зарегистрировано снижение ветвления, а у сорта Steptoe в обсуждаемых временных рамках усиления ветвления не было отмечено, несмотря на повышенный уровень ауксинов в корнях на фоне фосфатного голода. Очевидно, одного накопления ауксинов было недостаточно для стимуляции ветвления корней, что предполагает влияние других гормонов и факторов. Известно, что АБК негативно влияет на рост и формирование примордиев боковых корней, что и объясняет подавление их образования у ячменя сорта Прерия при дефиците фосфора. У сорта Steptoe накопление АБК было обнаружено лишь в апексах корней, но именно здесь и осуществляется закладка примордиев боковых корней. Соответственно, в отличие от арабидопсиса, отсутствие достоверных изменений в ветвлении корней растений ячменя сорта Steptoe в ответ на недостаток фосфора могло быть результатом разнонаправленного влияния на этот процесс ауксинов и АБК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление изменений содержания гормонов (цитокининов, индолилуксусной кислоты и АБК) в растениях арабидопсиса и ячменя, в том числе и мутанта со сниженной способностью к синтезу АБК, с ростовой реакцией корней этих растений позволило выявить ключевую роль АБК в формировании архитектуры корневой системы при дефиците фосфатов. Видовым и сортовым особенностям ростовых ответов корней на отсутствие в питательном растворе фосфата предшествовали изменения гормонального баланса, которые были выявлены как на уровне целого растения, так и на уровне клеток корня. Обнаруженное перераспределение массы в пользу корней у растений арабидопсиса и ячменя, за исключением мутанта Az34, могло быть обусловлено снижением содержания в побегах цитокининов, которое достигалось у разных сортов ячменя с помощью

различных механизмов: регуляция транспорта у сорта Прерия и подавление синтеза у сорта Steptoe. Активации удлинения и ветвления корня растений арабидопсиса предшествовало накопление в них ауксина, у растений ячменя сорта Прерия подавление ветвления корней, предположительно, связано с накоплением АБК и ЦК. Снижение в апексах корней растений сорта Steptoe концентрации цитокининов под влиянием АБК может являться стимулом для активации их линейного роста, в то время как отсутствие изменений ветвления может быть результатом взаимодействия ИУК и АБК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hodge A. Roots: the acquisition of water and nutrients from the heterogeneous soil environment // *Progress in Botany*. 2010. V. 71. P. 307–337.
2. Niu Y.F., Chai R.S., Jin G.L., Wang H., Tang C.X., Zhang Y.S. Responses of root architecture development to low phosphorous availability: a review // *Ann. Bot.* 2013. V. 112. P. 391–408.
3. Kudoyarova G.R., Dodd I.C., Veselov D.S., Rothwell S.A., Veselov S.Y. Common and specific responses to availability of mineral nutrients and water // *J. Exp. Bot.* 2015. V. 66. P. 2133–2144.
4. Rubio V., Bustos R., Irigoyen M.L., Cardona-López X., Rojas-Triana M., Paz-Ares J. Plant hormones and nutrient signaling // *Plant Mol. Biol.* 2009. V. 69. P. 361–73.
5. Sakakibara H., Takei K., Hirose N. Interactions between nitrogen and cytokinin in the regulation of metabolism and development // *Trends Plant Sci.* 2006. V. 11. P. 440–448.
6. Werner T., Nehnevajova E., Kollmer I., Novak O., Strnad M., Kramer U., Schmulling T. Root-specific reduction of cytokinin causes enhanced root growth, drought tolerance, and leaf mineral enrichment in Arabidopsis and tobacco // *Plant Cell*. 2010. V. 22. P. 3905–3920.
7. Sharp R.E., Poroyko V., Hejlek L.G., Spollen W.G., Springer G.K., Bohnert H.J., Nguyen H.T. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics // *J. Exp. Bot.* 2004. V. 55. P. 2343–2351.
8. Nacry P., Canivenc G., Muller B., Azmi A., Onckelen H.V., Rossignol M., Dumas P. A role for auxin redistribution in the response of the root system architecture to phosphate starvation in Arabidopsis // *Plant Physiol.* 2005. V. 138. P. 2061–2074.
9. Zhu X.F., Zhao X.S., Wu Q., Shen R.F. Abscissic acid is involved in root cell wall phosphorus remobilization independent of nitric oxide and ethylene in rice (*Oryza sativa*) // *Ann Bot.* 2018. V. 8(121). P. 1361–1368. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy034>
10. Kiba T., Kudo T., Kojima M., Sakakibara H. Hormonal control of nitrogen acquisition: roles of auxin, abscissic acid, and cytokinin // *J. Exp. Bot.* 2011. V. 62. P. 1399–1409.
11. Vysotskaya L.B., Korobova A.V., Veselov S.Y., Dodd I.C., Kudoyarova G.R. ABA mediation of shoot cytokinin oxidase activity: assessing its impacts on cytokinin status and biomass allocation of nutrient deprived durum wheat // *Func. Plant Biol.* 2009. V. 36. P. 66–72.
12. Liu J., Moore S., Chen C., Lindsey K. Crosstalk complexities between auxin, cytokinin, and ethylene in Arabidopsis root development: from experiments to systems modeling, and back again // *Mol. Plant*. 2017. V. 10. P. 1480–1496.
13. Prerostova S., Kramna B., Dobrev P.I., Gaudinova A., Marsik P., Fialad R., Knirsch V., Vaneck T., Kuresovae G., Vankova R. Organ-specific hormonal crosstalk in phosphate deficiency // *Environ. Exp. Bot.* 2018. V. 153. P. 198–208.
14. Vysotskaya L.B., Trekozova A.W., Kudoyarova G.R. Effect of phosphorus starvation on hormone content and growth of barley plants // *Acta Physiol. Plant.* 2016. V. 38. P. 108. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2127-5>
15. Muir C.E., Nilan R.A. Registration of Steptoe barley // *Crop Sci.* 1973. V. 13. P. 770.
16. Walker-Simmons M., Kudrna D.A., Warner R.L. Reduced accumulation of ABA during water stress in a molybdenum cofactor mutant of barley // *Plant Physiol.* 1989. V. 90. P. 728–733.
17. Kudoyarova G.R., Korobova A.V., Akhiyarova G.R., Arkhipova T.N., Zaytsev D.Yu., Prinsen E., Egutkin N.L., Medvedev S.S., Veselov S.Yu. Accumulation of cytokinins in roots and their export to the shoots of durum wheat plants treated with the protonophore carbonyl cyanide *m*-chlorophenylhydrazone (USSR) // *J. Exp. Bot.* 2014. V. 65. № 9. P. 2287–2294.
18. Arkhipova T.N., Prinsen E., Veselov S.U., Martinenko E.V., Melentiev A.I., Kudoyarova G.R. Cytokinin producing bacteria enhance plant growth in drying soil // *Plant and Soil*. 2007. V. 292. № 1–2. P. 305–315.
19. Veselov S.Yu., Valcke R., Van Onckelen H., Kudoyarova G.R. Cytokinin content and location in the leaves of the wild-type and transgenic tobacco plants // *Rus. J. Plant Physiol.* 1999. 46(1). P. 26–31.
20. Veselov S.U., Kudoyarova G.R., Egutkin N.L., Gyuli-Zade V.G., Mustafina A.R., Kof E.K. Modified solvent partitioning scheme providing increased specificity and rapidity of immunoassay for indole 3-acetic acid // *Physiol. Plantarum*. 1992. V. 86. P. 93–96.
21. Sharipova G., Veselov D., Kudoyarova G., Fricke W., Dodd I., Katsuhara M., Furuichi T., Ivanov I., Veselov S. Exogenous application of abscissic acid (ABA) increases root and cell hydraulic conductivity and abundance of some aquaporin isoforms in the ABA deficient barley mutant Az34 // *Ann. Bot.* 2016. V. 118. P. 777–785.
22. Veselov S.Yu., Simonyan M.V. Immunoassay analysis of cytokinins as an assay for cytokinin oxidase activity // *Russ. J. Plant Physiol.* 2004. T. 51. № 2. C. 266–270.
23. Lynch J.P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops // *Plant Physiol.* 2011. V. 156. P. 1041–1049.
24. Тимергалина Л.Н., Высоцкая Л.Б., Кулуев Б.Р., Шарипова Г.В., Федяев В.В., Мухарримова А.Ф., Ступак Е.Э., Веселов Д.С. Взаимодействие сахара и ауксинов в регуляции ветвления корней в норме

- и при дефиците фосфатов // Изв. УфНЦ РАН. 2017. № 3(1). С. 126–129.
25. Vysotskaya L.B., Korobova A.V., Kudoyarova G.R. Abscissic acid accumulation in the roots of nutrient-limited plants: its impact on the differential growth of roots and shoots // J. Plant Physiol. 2008. V. 165. P. 1274–1279.
 26. Ha S., Vankova R., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K., Tran L.S. Cytokinins: metabolism and function in plant adaptation to environmental stresses // Trends Plant Sci. 2012. V. 17. P. 172–179.
 27. Pérez-Torres C.A., López-Bucio J., Cruz-Ramírez A., Ibarra-Laclette E., Dharmasiri S., Estelle M., Herrera-Estrella L. Phosphate availability alters lateral root development in *Arabidopsis* by modulating auxin sensitivity via a mechanism involving the TIR1 auxin receptor // Plant Cell. 2008. V. 20. P. 3258–3272.

Similar and Specific Hormonal and Root Growth Responses to Phosphate Starvation in Plants of Different Genotypes

L. B. Vysotskaya^{a, #}, A. V. Feoktistova^a, Z. A. Akhtyamova^a, G. R. Akhiyarova^a,
A. V. Korobova^a, and G. R. Kudoyarova^a

^a*Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre, RAS
prosp. Oktyabrya 69, 450054 Ufa, Russia*

[#]*E-mail: vysotskaya@anrb.ru*

Deficiency of phosphorus in plants of *Arabidopsis* and barley caused a redistribution of mass in favor of the root, due to a decrease in the content of cytokinins (CK) in the shoot. In barley plants of the Prairie variety, this was due to the regulation of the secondary active transmembrane transfer, and in Steptoe variety, due to a decrease in the outflow of CK from the roots as a result of the inhibition of their synthesis. The lack of an adaptive growth response of the AZ34 barley mutant to the removal of phosphate from the medium is associated with a disruption in the synthesis of ABA, which led to changes in the content and distribution of not only this hormone, but also CK, IAA. The mutual influence of hormones and the key role of ABA in the implementation of the growth response to phosphorus deficiency are discussed.

Key words: barley, *Arabidopsis*, phosphorus deficiency, growth. ABA, cytokinins, IAA.

УДК 632.951

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АССОРТИМЕНТА СРЕДСТВ БОРЬБЫ С ВРЕДИТЕЛЯМИ РАСТЕНИЙ В XXI ВЕКЕ

© 2021 г. В. И. Долженко¹, Г. И. Сухорученко^{1,*}, Л. А. Буркова¹, Г. П. Иванова¹,
Т. И. Васильева¹, О. В. Долженко¹, А. Б. Лаптев¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского 3, Россия*

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

Поступила в редакцию 16.04.2020 г.

После доработки 12.05.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

Представлен анализ результатов научно-исследовательских работ по изучению средств защиты растений от вредных насекомых и клещей, разработке регламентов их эффективного и безопасного применения и модернизации ассортимента инсектицидов и акарицидов в XXI веке. Показаны этапы развития химического метода защиты растений и совершенствования средств, методологии и стратегии их использования с учетом современных требований. По результатам исследований был сформирован ассортимент, состоящий из 350 препаратов и позволяющий защищать 53 культуры и пастбища от отдельных и/или комплексов вредителей.

Ключевые слова: вредители, инсектициды, акарициды, формы препаратов, биологическая эффективность, избирательность действия, экологическая безопасность.

DOI: 10.31857/S000218812101004X

ВВЕДЕНИЕ

Ретроспективный анализ развития химического метода борьбы с вредными видами на сельскохозяйственных культурах в России показал, что более, чем за столетний период, он прошел несколько этапов, соответствующих необходимости решения проблем защиты растений, возникающих в сельскохозяйственной практике страны в разные временные периоды [1]. С развитием теоретических основ защиты растений менялись методология и стратегия решения этих проблем, что требовало постоянного совершенствования химического метода, прежде всего, основной его составляющей — ассортимента средств борьбы с вредными видами и, в первую очередь, с вредителями, как наиболее опасных для человека, теплокровных животных и объектов окружающей среды.

Если в 1920–1940 гг. к инсектицидам и акарицидам предъявляли единственное требование — наличие высокой биологической эффективности для подавления всплеск размножения вредителей и сохранения урожая защищаемых культур, то в 1960–1970 гг., наряду с высокой эффективностью, к ним стали предъявлять требования по обеспечению безопасности для теплокровных

животных и человека. В этот период на совершенствование ассортимента средств борьбы с вредителями существенное влияние оказала Концепция IPM (Интегрированное Управление Вредителями) в связи с требованием их безопасности для полезных компонентов агробиоценозов и объектов окружающей среды. Учет требований санитарно-гигиенической и экологической безопасности и уровень развития научно-технического прогресса в области химии пестицидов обусловили существенные изменения ассортимента средств борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур в 1980–1990 гг. [1].

Дальнейшее совершенствование ассортимента инсектицидов и акарицидов в XX веке происходило с учетом требований, сформулированных концепцией “Фитосанитарная оптимизации агроэкосистем”, направленной на долгосрочную стабилизацию их фитосанитарного состояния в масштабах крупных агроэкосистем и агроландшафтов [2]. За рубежом такие системы получили название — широкомасштабное интегрированное управление вредителями (**Areawide IPM Systems**) [3]. Пестициды остаются одними из основных звеньев этих систем, но для этого они должны обладать повышенной экологичностью и избира-

тельностью действия, регулируемыми свойствами и максимально сочетаться с биологическими средствами защиты растений. В этой связи в первые 2 десятилетия XXI века велся поиск средств борьбы с вредителями, отвечающих предъявляемым к ним требованиям данного периода времени.

ФОРМИРОВАНИЕ АССОРТИМЕНТА ИНСЕКТИЦИДОВ И АКАРИЦИДОВ В ПЕРВЫЕ ДВА ДЕСЯТИЛЕТИЯ XXI ВЕКА

Изучение биологической эффективности появляющихся на мировом рынке новых средств борьбы с вредителями растений проводили с использованием стандартных методик проведения регистрационных испытаний пестицидов в стране. В 1995 г. Госхимкомиссией при МСХ РФ было опубликовано “Положение о регистрационных испытаниях и регистрации пестицидов в Российской Федерации”. Это послужило основанием ВИЗР для переработки изданного ранее сборника “Методические указания...” 1986 г. [4], дополнив его новыми методиками, и издания в 2004 г. сборника “Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве” [5], переизданного в 2009 г.

В сборник “Методические указания...” 2009 г. [6] вошло 97 методик оценки биологической эффективности пестицидов в деляночных и производственных опытах применительно к ряду многолетних вредителей (саранчовых, лугового мотылька, подрывающих совок, слизней, проволочников, полевок) и основным вредителям более 30 сельскохозяйственных культур. Методики были максимально стандартизированы и приведены в соответствие с аналогичными руководствами ЕОЗР (нормы, способы и кратность обработок, методы и сроки учетов). Это позволило не только получать сравнимые результаты исследований при проведении регистрационных испытаний препаратов в отношении вредителей в разных почвенно-климатических зонах страны, но и облегчило международный обмен информацией о биологической эффективности тех или иных средств борьбы.

На начало 2000-х гг. ассортимент инсектицидов и акарицидов был представлен 115 препаратами на основе 50 действующих веществ [7]. Доминирующее положение среди них занимали пиретроиды (43 препарата, 13 д.в.), ФОС (21 препарат, 10 д.в.) и карбаматы (8 препаратов, 5 д.в.) (табл. 1). Далее шли органические производные серы, мочевины, неоникотиноиды, отдельные соединения из новых химических классов авермекти-

нов, феноксифенилэфиров, азинов (хиназолины, тетразины) и др., а также препараты природного происхождения, металлосодержащие и комбинированные. Значительное пополнение ассортимента этих лет избирательно действующими соединениями в низких нормах применения привело к значительному улучшению их агроэкотоксикологических и гигиенических характеристик. Например, снизилась токсичность вошедших в его состав соединений для теплокровных (LD_{50} для крыс увеличилась с 944.3 до 1170.6 мг/кг), уменьшились нормы применения препаратов и их действующих веществ на 1 га защищаемой площади и, соответственно, в 13.6 раза — величина токсической нагрузки по сравнению с началом 1980-х гг. Благодаря этому многих представителей ассортимента начала 2000-х гг. активно использовали в последующие годы в борьбе с вредителями на зерновых, плодовых, картофеле, сахарной свекле и других культурах.

Однако, учитывая требования к пестицидам, сформулированные концепцией фитосанитарной оптимизации агроэкосистем, из ассортимента инсектицидов и акарицидов в 2000 г. по ряду показателей (гигиенической и экологической опасности, высоких норм применения и др.) были исключены фосфорорганические препараты: лебайцид, КЭ, СП (д.в. фентион), хостаквик, КЭ (хептенофос) и антио, КЭ (формотион); карбаматы: пиримор, СП (д. в. пиримикарб) и промет 400, МКС (д.в. фуратиокарб), а содержащий его инсектофунгицид рапкол ТЗ, П был заменен комбинированным препаратом круйзер Рапс, КС (д.в. тиаметоксам + фунгициды флудиоксонил и мифеноксам), высоко эффективным в борьбе с крестоцветными блошками на ряде культур. Из ассортимента были удалены пиретроиды: данитол, КЭ (д.в. фепропатрин) и последний препарат на основе перметрина — ровикурт, СП, препараты фенвалерата (сумицидин, КЭ; фенвалерат, КЭ; фенаксин Д, феникс Д) были заменены препаратами суми-альфа, КЭ и сэмпей, КЭ полученными на основе его изомера эсфенвалерата, как более эффективными при сниженном в несколько раз содержании действующего вещества. Были также исключены производные мочевины: пегас, КС (д.в. диафентиурон) и сонет, СП (д.в. гексафлумурон), а также митак, КЭ (амитраз), неорон, КЭ (д.в. бромпропилат), ниссоран КЭ, СП (д.в. гексатиазокс), смеси дельтаметрина с хептенофосом или с фентионом (децис-Квик, КЭ и бифетрин, СП), фумигант метабром, Газ (д.в. бромистый метил).

Вместо исключенных акарицидов в ассортимент был введен специфический акарицид из

Таблица 1. Изменения в ассортименте средств борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур в 2000–2019 гг.

Химический класс (группа) препаратов	Число препаратов/действующих веществ (д.в.)		
	2000 г.	2010 г.	2019 г.
Неорганические	3/1	4/1	4/1
Растительные		3/1	
Углеводороды	1/1	1/1	1/1
Фосфорорганические	21/10	45/8	72/7
Металлосодержащие соединения	9/2	11/2	16/2
Карбаматы	8/5	7/4	7/3
Броморганические соединения	1/1		
Органические соединения серы	5/3	4/3	1/1
Нитропроизводные	1/1		
Пиретроиды	43/13	47/9	72/11
Производные мочевины	4/4	3/2	6/4
Неоникотиноиды	4/3	26/5	77/5
Феноксифениловые эфиры		1/1	1/1
Азометины			1/1
Производные пиразола			
феноксипиразолы	1/1	—	1/1
фенилпиразолы	4/1	2/1	3/1
Производные токсинов актиномицетов			
авермектины	1/1	1/1	6/2
Производные пиридина			
пиридазины	1/1		1/1
никотинамиды			1/1
карбоксамины			1/1
Производные тетраеновых кислот			
циклические кетенолы			1/1
Диамиды			
антриламины			1/1
диамиды фталиевой кислоты			1/1
Азины			
тетразины	1/1	1/1	1/1
оксидиозины		1/1	1/1
хиназолины	1/1	1/1	
Комбинированные препараты	6	15	74
Всего	115/50	174/43	350/49
Средний класс опасности	2.76	2.63	2.92
Средняя LD_{50} для крыс, мг/кг	1170.6	1233.0	1630.3
Средняя норма применения препарата, кг/га	3.570	2.002	1.050
Средняя норма применения д.в., кг/га	0.408	1.400	0.978
Токсическая нагрузка/га (величина LD_{50} в норме применения д.в.)	349	1135	600

класса азинов — тетразин флумайт, СК (д.в. дифлоvidaзин) с наличием контактной и трансламинарной активности. Механизм действия этого акарицида, как и другого представителя класса азинов — аполло, КС (д.в. клофентизин), заключается в нарушении метаморфоза клещей, снижении репродуктивного потенциала самок и жизне-способности отложенных яиц. Это обусловило высокую биологическую эффективность флу-майта в борьбе с растительноядными клещами различных семейств, что позволило рекомендо-вать его для широкого применения в плодовых садах и на виноградной лозе в нормах примене-ния 0.30–0.48 л/га.

Изъятые из ассортимента пиретроиды были заменены на яблоне и виноградной лозе в борьбе с яблонной плодовой жоркой и листовертками сле-дующими высокоэффективными инсектицидами:

- из класса карбаматов — ланнатом 20 Л, РК (д.в. метомил), контактно-кишечным препара-том антихолинэстеразного действия. Форма лан-ната в виде растворимого концентрата с низким содержанием действующего вещества (200 г/л) и слабая персистентность снижали высокую опас-ность этого СДЯВ (LD_{50} для крыс 30–34 мг/кг) для человека и животных. Ланнат был рекомен-дован для применения в нормах 1.0–2.2 л/га;

- из класса азинов — оксидиазином авант, КС (д.в. индоксикарб), средне опасным для теплокров-ных препаратом (LD_{50} для крыс 179–407 мг/кг) контактно-кишечного действия с наличием ови-цидной активности. Механизм действия аванта заключается в блокировании Na^+ -каналов мем-бран нервных клеток, что приводит к нарушению передачи нервных импульсов и координации движений у насекомых, в результате чего они пе-рестают питаться и быстро погибают. Препарат эффективен в борьбе с вредителями из отрядов че-шукрылых в нормах применения 0.24–0.4 л/га, пе-риод защитного действия равен 10–14 сут;

- из класса неоникотиноидов — калипсо, КС (д.в. тиаклоприд), среднетоксичным для тепло-кровных контактно-кишечным препаратом (LD_{50} для крыс 396–621 мг/кг) с наличием транслами-нарной активности и длительностью токсическо-го действия 7 сут. Рекомендован в борьбе с яблон-ной плодовой жоркой и листовертками на яблоне в норме применения 0.20–0.45 л/га.

Поскольку перечисленные инсектициды от-личались между собой механизмом действия на членистоногих, их ротация в системах защиты плодовых культур от вредителей длительное вре-мя сдерживала развитие резистентности в попу-ляциях чешукрылых к этим средствам борьбы.

Необходимо также отметить появление в ас-сортименте 2000 г. эффективного средства борь-бы с проволочниками на ряде культур (кукурузе, картофеле, сахарной свекле, подсолнечнике) — пи-ретроида форс, Г, МКС. Действующее вещество этого пиретроида (тефлутрин) является контактно—кишечным соединением с выраженным фумигант-ным эффектом, что обеспечивает высокую токсич-ность в отношении почвообитающих вредителей, включая проволочников. Тефлутрин относится к СДЯВ (LD_{50} для крыс равен 21.6–34.0 мг/кг), но его высокая токсичность для теплокровных нивели-руется быстрой деградацией в почве (в течение 10–14 сут), а также формами препарата в виде гра-нул, вносимых в почву одновременно с посадкой клубней картофеля, или в виде микрокапсулиро-ванной суспензии для обработки семян сахарной свеклы, кукурузы и подсолнечника перед посе-вом в борьбе с проволочниками.

Характерной чертой ассортимента 2000-х гг. являлось наличие в нем инсектицидов, представ-ленных значительным числом препаратов, со-зданных на основе одного действующего веще-ства. К их числу относились 6 препаратов малати-она, 7 препаратов циперметрина, 12 препаратов диметоата, по 13 препаратов альфа-циперметри-на и лямбда-цигалотрина, по 18 препаратов ди-азинона и имидаклоприда, многие из которых производили различные фирмы для личных под-собных хозяйств. Помимо этого, в ассортименте содержался ряд препаратов, являющихся комби-нациями действующих веществ инсектицидов и фунгицидов, например, престиж, КЭ (имидакло-прид + пецикурон) или 2-х инсектицидов, напри-мер, неоникотиноида имидаклоприда с пиретро-идами — бета-цифлутрин (чинук, СК) или лямбда-цигалотрин (борей, СК). Использование комби-нированных препаратов значительно расширяло спектр токсического действия этих средств и поз-воляло проводить обработки против комплекса вредных видов, снижая общий расход пестицидов и, соответственно, их нагрузку на агробиоцено-зы, способствуя тем самым повышению экологи-ческой безопасности химического метода.

Большие возможности повышения экологиче-ской и гигиенической безопасности химических средств борьбы заложены в количестве и много-образии современных форм их препаратов и спо-собов применения, т.к. токсичность веществ для различных организмов, в том числе и для тепло-кровных, определяется не только механизмом их действия, но во многом зависит от факторов, свя-занных с их использованием в технологиях возде-лывания сельскохозяйственных культур.

Совершенствование препаративных форм инсектицидов и акарицидов на протяжении ряда десятилетий шло параллельно с поиском соединений с новыми механизмами действия на членистоногих и его рассматривали как прогрессивное направление развития химического метода защиты растений.

В первые периоды формирования ассортимента средств борьбы с вредными членистоногими в XX веке для применения рекомендовали препараты в виде дустов (Д), порошков (П), масляных эмульсий (МЭ), технических продуктов (ТП), жидких форм (Ж) и Газа. Только после организации в 1960 г. системы Государственных испытаний пестицидов в ассортименте стали появляться такие прогрессивные формы препаратов, как смачивающиеся порошки (СП) и концентраты эмульсий (КЭ) (табл. 2). Новые формы препаратов произвели переворот в способах применения инсектицидов и акарицидов, вытесняя применяемые в высоких нормах, загрязняющие агроэкосистемы и окружающую среду дусты и порошки, позволив тем самым отказаться от способа опыливания посевов и перейти на более эффективный, технологичный и экологически менее опасный способ — опрыскивание. Опрыскивание по настоящее время остается основным способом внесения средств борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур, что обуславливает преобладание в ассортименте препаратов в виде СП и КЭ. Например, широко применяемые в настоящее время на многих культурах в борьбе с комплексами вредных видов препараты диметоата, малатиона и циперметрина на 100% представлены КЭ.

Помимо СП и КЭ, в ассортименте 2000-го г. присутствует такая более безопасная для окружающей среды форма инсектицидов, как гранулы (Г), интерес к которой проявился еще в конце 1950-х гг. в связи с неудовлетворительной эффективностью применяемых способом опрыскивания инсектицидов в борьбе с проволочниками и вредителями всходов ряда культур [8]. В результате многолетнего изучения различных средств борьбы с почвообитающими вредителями (проволочниками и подгрызающими совками на ряде культур), тлями-переносчиками вирусной инфекции на картофеле, внутристеблевыми мухами на пшенице и ячмене для применения были рекомендованы гранулы гамма-изомера ГХЦГ, волатона, дурсбана, диазинона и др. В настоящее время в ассортименте остался только диазинон, из 18 препаратов которого 50% составляют КЭ, другие 50% — гранулы, рекомендуемые для личных подсобных хозяйств.

Столь длительное сохранение в ассортименте гранулированных препаратов объясняется тем, что, как правило, в такой форме применяют высокотоксичные для теплокровных инсектициды для внесения в почву, в которой они длительное время сохраняют токсичность для вредителей, надежно защищая растения от повреждений. Помимо гранул для личных подсобных хозяйств в ассортименте 2000-го г. появился ряд препаратов (искра, искра Золотая, инта Вир) в виде такой готовой к употреблению формы, как таблетки (ТАБ).

Способом применения инсектицидов, наиболее полно отвечающим требованиям концепции фитосанитарной оптимизации агроэкосистем, является обработка семян или посадочного материала системными препаратами для защиты всходов от комплекса вредных видов. Начало этому способу было положено еще в XVII в. работами русских ученых-агрономов в борьбе с крестоцветными блошками [9, 10]. Однако большое число использованных для этой цели неорганических и растительных средств лишь частично отпугивало вредителей от защищаемых культур, и только после появления препаратов органического синтеза этот превентивный способ внесения пестицидов получил дальнейшее развитие. Обработывая семена различных культур пестицидами, производители сельскохозяйственной продукции получают высокий экономический эффект, т.к. растения надежно защищены от комплекса вредных видов не только в период всходов, но и в других фазах роста и развития при минимальном расходе препаратов [11]. Этот способ применения пестицидов безопасен для человека, теплокровных и нецелевых объектов борьбы, т.к. сводит к минимуму их контакты с вносимыми таким путем препаратами, а также экологичен, поскольку позволяет значительно снизить объемы наземных обработок посевов химическими средствами и, соответственно, загрязнение окружающей среды токсическими веществами.

В 1970–1980-х гг. для обработки семян сельскохозяйственных культур против проволочников, хрущей и совков применяли препараты ГХЦГ и гамма-изомера ГХЦГ, позднее — препараты карбофурана (фурадан, ТПС, промет 400, МКС и др.) против комплекса сосущих и почвообитающих вредителей сахарной свеклы и ряда культур от крестоцветных блошек. В 2000-м г. в качестве средств для обработки семян всеобщее признание получили неоникотиноиды тиаметоксам и имidakлоприд, а также комбинированные препараты на их основе еще и в новой препаративной (концентрата суспензии — КС) форме. Особенно ши-

Таблица 2. Совершенствование форм препаратов инсектицидов и акарицидов в 2000–2019 гг.

Форма препарата	Количество препаратов		
	2000 г.	2010 г.	2019 г.
Дуст (Д)	2		
Порошок (П)	2	4	1
Смачивающийся порошок (СП)	10	8	9
Водорастворимый порошок (ВРП, РП)	2	3	6
Водорастворимый концентрат (ВРК, ВК)	1	14	23
Водная эмульсия (ВЭ)	4	4	7
Концентрат эмульсии (КЭ)	52	73	131
Минерально-масляная эмульсия (ММЭ)		1	1
Масляный концентрат эмульсии (МКЭ)			1
Масляная дисперсия (МД)			3
Микроэмульсия (МЭ)		2	3
Суспензионная микроэмульсия (СМЭ)			1
Водно-суспензионный концентрат (ВСК)		2	3
Концентрат суспензии (КС, ФЛО)	5	7	70
Микрокапсулированная суспензия (МКС)	1	2	5
Суспензионный концентрат (СК)	3	4	10
Суспензионный концентрат масляный (СК-М)		1	1
Текущий концентрат суспензии (ТКС)			1
Текущая суспензия (ТС)			1
Текущая паста (ТПС)	4	3	3
Гранулы (Г)	7	14	18
Водорастворимые гранулы (ВРГ, ВГ)	1		2
Водно-диспергируемые гранулы (ВДГ)	3	8	20
Жидкость (Ж)		1	1
Водный раствор (ВР)	1	1	2
Растворимый концентрат (РК)		1	1
Раствор для УМО	2		
Коллоидный раствор (КОЛР)	1		
Брикеты, твердые брикеты, (Б, ТБ)	1	2	1
Таблетки (ТАБ)	8	15	21
Шашки, пластины, карандаши, сетка (Ш, ПЛ, К, С)	4	4	4
Газ	1		
Всего	115	174	350

роко в данной форме применяли инсектицид круйзер, КС (д.в. тиаметоксам) и комбинированный инсектофунгицид престиж, КС (д.в. имидаклоприд + пенцикурон), которые обеспечивали высокий защитный эффект в борьбе с комплексом вредных видов на картофеле (колорадский жук, тли-переносчики вирусов, парша обыкновенная, ризоктониоз) [12–14], на рапсе (крестоцветные блошки, комплекс болезней) [15–17] и на сахарной свекле против вредителей (проволочники, свекловичные блошки, обыкновенный

свекловичный долгоносик) всходов [18]. Для обработки семян в ассортименте появились также препараты на основе бифентрина (семафор) и карбофурана (адифур, фурадан) в новой форме — текучей пасты (ТПС), повышающей качество покрытия и проницаемость семян для токсикантов.

Наличие у неоникотиноидов системных свойств открыло также перспективы для их использования в качестве превентивных средств защиты капусты в начальный период ее вегетации

от крестоцветных блошек и весенней капустной мухи *Delia brassicae* Bouche путем обработки семян каким-либо комбинированным препаратом на основе какого-либо неоникотиноида и пиретроида (например, чинук, СК) или пролива рассады неоникотиноидом актара, ВДГ (д.в. тиаметоксам) с последующей высадкой интоксцированных растений в поле [19]. Оба приема не уступали по эффективности опрыскиванию растений органофосфатом Би-58, КЭ в полевых условиях, но обладали перед ним следующими преимуществами: независимостью от погодных условий, т.к. растения были надежно защищены от повреждений вредителями в самый уязвимый период роста и развития, безопасностью для энтомофагов в результате исключения обработок в начальный период вегетации культуры в открытом грунте. Таким же эффективным, гигиенически и экологически малоопасным способом является внесение неоникотиноидов (конфидор, ВРК, актара, ВДГ) под корни овощных растений при капельном поливе в тепличных хозяйствах против комплекса сосущих вредителей [20, 21].

Ассортимент инсектицидов 2000-го г. пополнился также препаратами для опрыскивания растений в виде таких современных форм, как водно-диспергируемые гранулы (ВДГ), водные эмульсии (ВЭ), водорастворимые концентраты (ВР), растворимые порошки (РП). Эти формы препаратов представляют собой высокодисперсные системы сложной рецептуры, основу которой составляет жидкая фаза (вода), благодаря которой они обладают улучшенными по сравнению с традиционными КЭ и СП санитарно-эксплуатационными характеристиками (не оказывают раздражающего действия на кожу и слизистые оболочки, не пылят, не слеживаются, быстро диспергируются или растворяются в воде, меньше загрязняют тару и опрыскивающую аппаратуру и прочее).

Результаты проведенных в первое десятилетие нового века исследований совершенствования средств защиты растений позволили сформировать на начало 2010 г. ассортимент средств борьбы с вредными членистоногими, состоящий из 174 препаратов на основе 43 действующих веществ [22]. Несмотря на то, что относительно предыдущих лет в нем сократилось число действующих веществ, значительно увеличилось число разработанных на их основе препаратов, включая 15 комбинированных. В составе ассортимента по числу препаратов в этот период доминирующее положение заняли ФОС и пиретроиды — 45 препаратов (8 д.в.) и 47 препаратов (9 д.в.) соответственно, 28 препаратов (5 д.в.) — неоникотиноиды и 11 препаратов (2 д.в.) — фумиганты (табл. 1).

Число остальных препаратов изменялось от 7-ми (4 д.в.) до единичных, представленных новыми действующими веществами. Средний класс опасности сформированного ассортимента пестицидов и средние величины их LD_{50} для теплокровных находились практически на уровне 2000 г. В то же время токсическая нагрузка на 1 га защищаемой площади увеличилась относительно 2000 г. более, чем в 3 раза (табл. 1).

Все это потребовало дальнейшего совершенствования ассортимента средств борьбы с вредителями, пополняя его новыми токсикантами избирательного действия, в безопасных формах и регламентах применения для человека и окружающей среды.

В результате ревизии сформированного на 2010-й г. ассортимента инсектицидов из него были удалены токсичные для теплокровных или морально устаревшие препараты, применявшиеся долгие годы в довольно высоких нормах. В их число вошли производное нерестиоксина банкол, СП (д.в. бенсултап), карбамат маршал, СП (д.в. карбосульфат), органофосфат парашют, МКС (д.в. Паратион-метил), сероорганический акарицид омайг, СП, ВЭ (д.в. пропаргит), хинолинпроизводное демитан, СК (д.в. феназахин), а также 3 препарата никотина в виде порошков, рекомендованные для применения в личных подсобных хозяйствах в борьбе с вредителями овощных, плодовых и цветочных культур.

Вместе с тем проведенные в последнее десятилетие исследования позволили пополнить ассортимент следующими новыми инсектицидами и акарицидами, более отвечающими современным требованиям:

— представителем производных пиридина — карбоксамидом масай, СП (д.в. тебуфенпирад), среднеопасным для теплокровных специфическим акарицидом (LD_{50} для крыс 593–987 мг/кг) контактно-кишечного действия с наличием трансламинарной активности. Механизм молекулярного действия тебуфенпирада на клещей связан с ингибированием митохондриального окислительного фосфорилирования, что нарушает транспорт электронов в митохондриях и приводит к гибели организма. Действует на все фазы развития растительоядных клещей из разных семейств, обладает длительным токсическим действием благодаря устойчивости к фотолизу. Рекомендован для применения на яблоне и виноградной лозе в борьбе с клещами в норме 0.5 кг/га, безопасной для пчел и энтомофагов;

— представителем тетрановых кислот — циклическим кетоенолом ультор, МД (д.в. спиротетрамат), малоопасным для теплокровных инсектоакарицидом (LD_{50} для крыс >5000 мг/кг) со слабо выраженными контактными свойствами, но с высокой трансламинарной и системной активностью. Механизм действия спиротетрамата заключается в ингибировании биосинтеза липидов, что приводит к нарушению обмена веществ и гибели членистоногих. Обладает длительным токсическим действием. Рекомендован для применения в борьбе с сосущими вредителями на сое, огурце и арбузе в нормах применения 0.50–0.75 л/га;

— из класса пиридинов — азометином пленум, ВДГ (д.в. пиметрозин), малоопасным для теплокровных инсектицидом широкого спектра действия (LD_{50} для крыс >5820 мг/кг) с выраженными антифидантными свойствами. Нарушает нейрон-мышечные контакты, приводя насекомых к гибели. Действует на личинок, нимф и имаго насекомых. Благодаря термо- и фотостойкости характеризуется длительностью токсического действия (до 50 сут) [23]. Рекомендован для применения в борьбе с сосущими вредителями культур защищенного грунта и картофеля в норме 0.2–0.6 кг/га, с рапсовым цветоедом на рапсе — 0.15 кг/га;

— из класса диамидов — инсектицидом белт, КС (д. в. флубендиамид), малоопасным для теплокровных соединением (LD_{50} для крыс >5000 мг/кг), токсичным для гусениц и имаго чешуекрылых. Механизм действия флубендиамида — агонист рианидиновых рецепторов мышц насекомых, что приводит к усиленному выведению запасов кальция из их организма, прекращению сокращения мышц и гибели. Длительность токсического действия равна 2–3 нед. Рекомендован для применения в борьбе с чешуекрылыми вредителями на яблоне, виноградной лозе, овощных культурах открытого грунта в нормах применения от 0.1 до 0.4 л/га;

— представителем производных пиридина — никотинамидом тепбеки, ВГ (д.в. флониамид), малоопасным для теплокровных инсектицидом (LD_{50} для крыс более 2000 мг/кг) с наличием системной активности. Механизм действия флониамида — модулятор хордотональных органов членистоногих, превращающих механические вибрации кутикулы в нервный импульс. Эффективен в борьбе с тлями. Срок защитного действия — 21 сут, максимальный токсический эффект достигается примерно через 1 нед. Рекомендован для применения на яблоне в борьбе с зеленой яблонной тлей *Aphis pomi* Deg. в норме применения 0.13–0.15 кг/га;

— из класса диамидов — антраниламидом корарген, КС (д.в. хлорантранилипрол), малоопасным для теплокровных контактно-кишечным инсектицидом широкого спектра действия (LD_{50} для крыс >5000 мг/кг). Как и белт, корарген является агонистом рианидиновых рецепторов мышц насекомых, что приводит к истощению запасов кальция в их организме, прекращению сокращения мышц, параличу и гибели в течение 24–42 ч. Длительность токсического действия — 3 нед. Рекомендован для применения на различных культурах в борьбе с тлями, чешуекрылыми и жесткокрылыми вредителями в нормах применения от 0.04–0.06 до 0.15–0.3 л/га;

— из класса производных токсинов актиномицетов — авермектином проклэйм, ВРГ (д.в. эмабектин бензоат), высокотоксичным для теплокровных инсектицидом (LD_{50} для крыс 76–89 мг/кг), преимущественно кишечного действия, а также контактного с наличием трансламинарной активности. Агонист никотинацетилхолиновых рецепторов постсинаптических мембран нервных клеток насекомых, стимулирует выделение нейромедиатора ГАМК (гамма-аминомасляной кислоты), нарушая передачу нервных импульсов на нервно-мышечные связки насекомых, что вызывает их гибель. Рекомендован в борьбе с чешуекрылыми вредителями на овощных культурах открытого грунта, виноградной лозе и яблоне в нормах применения от 0.2 до 0.5 кг/га.

Таким образом, в результате выполненных во втором десятилетии XXI в. исследований в 2019 г. был сформирован ассортимент средств борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур, состоящий уже из 350 препаратов (49 д.в.) [24]. Среди этих инсектицидов по-прежнему доминирует (131 препарат) форма в виде концентрата эмульсии — КЭ (табл. 2), что, по-видимому, было обусловлено более простым способом ее получения в отношении малатиона, хлорпирифоса, диазинона, альфа-циперметрина, лямда-цигалотрина и некоторых других д.в. Следующей по числу (70) препаратов формой однозначно выступает концентрат суспензии — КС. Она разработана на основе действующих веществ тиаметоксама, тиаклоприда, клотианидина (неоникотиноиды) или созданных с их участием комбинированных препаратов, используемых как для обработки семян, так и вегетирующих растений. В усовершенствованном ассортименте 23 препарата представлены воднорастворимыми (ВРК, ВК) концентратами и 7 препаратов — водными (ВЭ) эмульсиями, которые представляют собой дисперсию растворенных в органических растворителях капель действующих веществ токсикантов. Замена значи-

тельной части растворителя в препарате на воду снижает токсичность этих форм для теплокровных без потери эффективности [25]. До 20 препаратов увеличилось в ассортименте число водно-диспергируемых гранул (ВДГ), созданных на основе новых веществ, которые представляют собой соединенные твердые наполнители, действующие вещества и различные добавки. Это одна из наиболее перспективных форм препаратов, которые легко диспергируются в воде, вытесняя такие формы, как порошки (П), растворимые порошки (РП) и СП [23]. В ассортименте также широко представлены твердые формы препаратов: таблетки, гранулы, брикеты (Б, ТБ) и шашки, которые рекомендуют для использования в личных приусадебных хозяйствах, а также для фумигации зернохранилищ, складских помещений и парников.

Пополнение ассортимента токсикантами нового механизма действия и спектра активности в современных прогрессивных формах положительно сказалось на его агроэкотоксикологической характеристике. Например, средний класс опасности ассортимента инсектицидов и акарицидов 2019-го г. составил 2,92, средняя величина LD_{50} для теплокровных выросла до 1630,3 мг/кг (табл. 1). Почти в 2 раза снизилась средняя норма применения препаратов и их действующих веществ на 1 га защищаемой площади, в результате чего токсическая нагрузка вошедших в ассортимент токсикантов значительно (до 600 мг/кг) уменьшилась в сравнении с предыдущими десятилетиями (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ совершенствования ассортимента средств борьбы с вредными членистоногими в XXI веке свидетельствует о том, что развитие теоретических основ защиты растений и успехи органической химии способствовали серьезным качественным и количественным изменениям, произошедшим в их составе. В этой связи изменилась роль инсектицидов и акарицидов в системах защиты растений: от “пожарных” средств подавления вспышек размножения многих опасных вредителей в 1920–1940 гг. прошлого века до одного из важных элементов современных систем управления популяциями вредных видов на различных культурах в зависимости от складывающейся фитосанитарной обстановки в их агробиоценозах. Особенно это важно при разработке программ ротации препаратов в борьбе с резистентными к ФОС, пиретроидам и неоникотиноидам популяциями вредителей, формирующихся как в разных регионах страны под воздействием

применяемых средств, так и завозимых из-за рубежа.

Необходимо также подчеркнуть, что сформированный ассортимент инсектицидов и акарицидов позволяет защищать 53 культуры и пастбища от комплекса вредителей с момента появления всходов до конца вегетации, благодаря наличию в нем препаратов для обработки семян, вегетирующих растений и хранящейся продукции. Более того, этот ассортимент позволяет решать проблемы импортозамещения, т.к. 106 препаратов из 350 входящих в его состав производят отечественные фирмы, 52 препарата рекомендованы для использования в ЛПХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухорученко Г.И., Буркова Л.А., Иванова Г.П., Васильева Т.И., Долженко О.В., Иванов С.Г., Долженко В.И. Формирование ассортимента химических средств защиты растений от вредителей в России в 20 веке // Вестн. защиты раст. 2020. № 103(1). С. 5–19.
2. Новожилов К.В., Буров В.Н., Левитин М.М., Тюмев С.Л., Павлюшин В.А. Стратегия фитосанитарной оптимизации растениеводства в условиях реформы АПК России // Защита растений в условиях реформирования агропромышленного комплекса. Всерос. съезд по защите раст.: экономика, эффективность, экологичность. СПб., 1997. С. 512–513.
3. Kogan M. Integrated Pest Management: historical perspectives and contemporary developments // Ann. Rev. Entomol. 1998. V. 43. P. 243–270.
4. Методические указания по испытанию инсектицидов, акарицидов и моллюскоцидов в растениеводстве / Под ред. Новожилова К.В., Смирновой А.А., Савченко К.Н., Сухорученко Г.И., Толстовой Ю.С. М.: Госагропром СССР, Союзсельхозхимия, ВИЗР, 1986. 279 с.
5. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве / Под ред. Долженко В.И., Сухорученко Г.И., Танского В.И., Бурова В.Н., Бурковой Л.А., Васильева С.В., Митрофанова В.Б., Лысова Л.А. СПб., 2004. 363 с.
6. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве / Под ред. Долженко В.И. СПб., 2009. 321 с.
7. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Инсектициды, акарициды, нематоды и родентициды. Государственная комиссия по химическим средствам борьбы с вредителями, болезнями растений, сорняками, и биологически активными веществами (Госхимкомиссия РФ). М., 2000. С. 1–68.
8. Сазонов П.В. Факторы эффективности гранулированных инсектицидов // Тр. ВИЗР. Л., 1972. Т. 35. С. 23–43.
9. Болотов А. О земляных блохах // Эконом. магазин. 1786. № 28. С. 139, 155, 167.

10. *Комов И.* О земледелии. М., 1788. 378 с.
11. *Сазонов П.В., Кобрин Б.Б.* Стратегия химической защиты от вредителей // Тр. ВИЗР. Л., 1963. Т. 17. С. 21–47.
12. *Долженко О.В., Иванова Г.П., Белых Е.Б.* Эффективная технология применения препарата Престиж для защиты картофеля от комплекса вредителей в Северо-Западном регионе // Прогрессивные технологии применения химических средств защиты растений с целью предупреждения и ликвидации вредных организмов. СПб., 2008. С. 3–8.
13. *Сухорученко Г.И., Долженко В.И., Васильева Т.И., Иванова Г.П., Зенькевич С.В., Белых Е.Б., Гончаров Н.Р.* Эффективные ресурсосберегающие технологии применения препаратов тиаметоксама в борьбе с комплексом вредителей картофеля // Там же. С. 19–25.
14. *Герасимова А.В., Долженко О.В., Гришечкина Л.Д., Сухорученко Г.И.* Перспективный экономичный прием использования инсектофунгицида престиж для защиты картофеля от комплекса болезней и вредителей в Северо-Западном регионе // Прогрессивные технологии применения средств защиты растений с целью предупреждения и ликвидации вредных организмов, вызывающих чрезвычайные ситуации. СПб., 2010. С. 3–14.
15. *Иванов С.Г.* Технология защиты рапса от вредителей, болезней и сорняков // Прогрессивные технологии применения химических средств защиты растений с целью предупреждения и ликвидации вредных организмов. СПб., 2008. С. 17–19.
16. *Долженко В.И., Буркова Л.А., Иванов С.Г., Чурикова В.Г.* Новые инсектициды и технологии их применения для защиты рапса // Прогрессивные технологии применения средств защиты растений с целью предупреждения и ликвидации вредных организмов, вызывающих чрезвычайные ситуации. СПб., 2010. С. 25–29.
17. *Долженко В.И.* Применение инсектофунгицидных протравителей семян для обеспечения сохранности и качества урожая ярового рапса // Агрохимия. 2016. № 2. С. 42–50.
18. *Васильева Т.И., Буркова Л.А.* Перспективная технология применения неоникотиноидов на сахарной свекле. Новые технологии применения современных инсектицидов для защиты овощных культур // Прогрессивные технологии применения химических средств защиты растений с целью предупреждения и ликвидации вредных организмов. СПб., 2008. С. 19–24.
19. *Белых Е.Б., Иванова Г.П., Дроздова Т.Н.* Совершенствование ассортимента инсектицидов на культуре капусты // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. “Химический метод защиты растений. Состояние и перспектива повышения экологической безопасности”. СПб., 2004. С. 16–18.
20. *Долженко В.И., Буркова Л.А., Иванова Г.П., Белых Е.Б.* Новые технологии применения современных инсектицидов для защиты овощных культур // Прогрессивные технологии применения химических средств защиты растений с целью предупреждения и ликвидации вредных организмов. СПб., 2008. С. 8–17.
21. *Белых Е.Б., Иванова Г.П.* Капельное внесение неоникотиноидов – эффективный элемент интегрированной защиты пасленовых культур от вредных членистоногих в теплицах // Прогрессивные технологии применения средств защиты растений с целью предупреждения и ликвидации вредных организмов, вызывающих чрезвычайные ситуации. СПб., 2010. С. 29–33.
22. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Инсектициды и акарициды. М.: Минсельхоз РФ, 2010. С. 9–100.
23. *Долженко Т.В., Долженко В.И.* Инсектоакарициды на основе аверсектина С и эмамектина бензоата // Агрохимия. 2017. № 4. С. 41–47.
24. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Ч. I. Инсектициды и акарициды. М.: Минсельхоз РФ, 2019. С. 9–143.
25. *Елиневская Л.С.* Современные препаративные формы пестицидов // Защита и карантин раст. 2005. № 8. С. 34–38.

Improving the Range of Plant Pest Control Products in Russia in the 21st Century

V. I. Dolzhenko^a, G. I. Sukhoruchenko^{a, #}, L. A. Burkova^a, G. P. Ivanova^a, T. I. Vasilyeva^a,
O. V. Dolzhenko^a, and A. B. Laptiev^a

^a All—Russian Research Institute of Plant Protection
shosse Podbelskogo 3, St. Petersburg—Pushkin 196608, Russia

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

The analysis of research data on tests of plant protection chemicals against noxious insects and mites is presented in the article as well as development of regulations of their safe application and assortment upgrading of insecticides and acaricides in the XXI century. Stages of chemical plant protection development and improvement of compounds, methodology and strategy of their application with the account of current requirements are indicated. Based on test data, the assortment was formed comprising 350 chemicals for protection of 53 crops and pastures against specific pests and/or their complexes.

Key words: pests, insecticides, acaricides, pesticide formulations, biological efficacy, selectivity, ecological safety.

УДК 632.952:581.14:633.11“321”

ВЛИЯНИЕ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТЕБУКОНАЗОЛА НА РОСТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ

© 2021 г. О. И. Теплякова¹, В. И. Евсеенко², А. В. Душкин², Н. Г. Власенко^{1,*}¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН
630501 Новосибирская обл., пгт. Краснообск, Россия²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН
630128 Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, Россия

*E-mail: vlas_nata@ngs.ru

Поступила в редакцию 12.05.2020 г.

После доработки 10.06.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В условиях лабораторного и полевых экспериментов (2018–2019 гг.) проведена сравнительная оценка ретардантного действия тебуконазола (ТБК) и его супрамолекулярных комплексов с глицирризиновой кислотой, динатриевой солью глицирризиновой кислоты (массовое соотношение 1 : 5) и экстрактом корней солодки (1 : 5 и 1 : 10), созданных методом механохимии для обработки семян яровой мягкой пшеницы. С целью изучения возможностей снижения количества действующего вещества на 1 т семян ТБК и его механокомплексы применяли в 2-х нормах расхода — 0.3 и 0.1 кг/т. Супрамолекулярные комплексы ТБК в условиях лабораторного эксперимента значительно слабее сдерживали процесс формирования проростков (скорость роста корней тормозилась на 5–9%; проростка — на 17.4–34.0%), чем чистый ТБК (на 24 и 52% соответственно). Сила ретардантного эффекта опытных фунгицидных комплексов зависела от нормы расхода и их состава. Лучшие результаты получены при использовании комплексов ТБК с экстрактом корней солодки, усиливших рост проростков (корней — на 33–50, проростков — на 42.2–82.0%) не только относительно варианта с применением ТБК, но и варианта без обработки семян фунгицидами (на 16–18%). Ростостимуляция пшеницы усиливалась с понижением нормы расхода фунгицидных комплексов и увеличением доли экстракта корней солодки в их составе. Этот эффект подтвержден результатами полевых исследований. Применение комплексов тебуконазола с экстрактом корней солодки в массовом соотношении 1 : 5 и 1 : 10 (норма расхода 0.3 и 0.15 кг/т) при предпосевной обработке семян усиливало рост и развитие пшеницы, повышала ее густоту стояния, продуктивную кустистость и урожайность — на 0.52–0.69 т/га. Более высокопродуктивные посевы яровой мягкой пшеницы формировались при использовании пониженных норм расхода и количества действующего вещества в составе фунгицидной композиции.

Ключевые слова: мягкая яровая пшеница, ростовые процессы, супрамолекулярные комплексы, тебуконазол, глицирризиновая кислота, натриевая соль глицирризиновой кислоты, экстракт корней солодки.

DOI: 10.31857/S0002188121010105

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим стартовым элементом технологии возделывания зерновых, позволяющим сохранить от 0.2 [1] до 0.3–0.4 т/га выращиваемой продукции [2] является контроль семенной инфекции. Для этой цели используют широкий ряд фунгицидов-протравителей [3]. Среди них велика доля препаратов на основе азолов, в частности тебуконазола (ТБК), которые эффективно подавляют возбудителей обыкновенной корневой гнили (возбудители *Bipolaris sorokiniana* Shoemaker, грибы *Fusarium* spp.) [4], и в то же время вызывают как ретардантный, так и стимулирующий эффекты [5]. Тебуконазолсодержащие препараты увеличивают содержание абсцизовой кислоты в рас-

тениях пшеницы, повышая их адаптацию к низким температурам [6]. Производные триазола, стимулирующие рост корневой системы многих растений, оказывают ретардантное действие на осевые органы зерновых, влияют на устойчивость растений к абиотическим стрессам [7, 8], могут вызывать значительное варьирование морфометрических параметров [9]. Прирост биомассы растений пшеницы зависит от препаративной формы тебуконазола [10], а фитотоксический эффект — от величины дозы. С ее увеличением усиливается угнетающее воздействие действующего вещества на всхожесть, длину корней, колеоптиля и побегов пшеницы [11–13]. В засушливых условиях тебуконазол способен тормозить прорастание се-

мян, снижать полевую всхожесть, но повышать продуктивную кустистость [4]. Ретардантный эффект триазолов, усиливающийся при неблагоприятных условиях роста и развития растений, может приводить к снижению полевой всхожести хлебных злаков на 25–30% [14].

С целью лучшего проникновения действующего вещества фунгицидов в растительные ткани, сокращения их норм расхода предлагаются новые модификации препаративных форм нанокомплексной природы [15–17]. К числу перспективных “вспомогательных” веществ относится глицирризиновая кислота и ее соли, которые содержатся в значительных количествах в корнях солодки уральской, широко произрастающей в восточной части РФ [18, 19]. Корни и корневища солодки помимо следов эфирного масла, витаминов, белков, горьких (до 4%) и смолистых (3–4%) веществ, липидов (≈4%), полисахаридов (4–6% пектиновых веществ и крахмала), моносахаридов и дисахаридов (всего до 20%) содержат более значимые с фармакологической точки зрения флавоноиды (3–4%) и тритерпеновые сапонины — глицирризиновую кислоту (≈20%). Вещества — тритерпеноидные соединения, флавоноиды и главным образом глицирризиновая кислота, содержащиеся в корнях солодки, биологически активны в отношении микроорганизмов [20]. Соли глицирризиновой кислоты обладают средней или достаточно высокой фунгицидной активностью по отношению к различным штаммам микроскопических грибов — *Alternaria alternata*, *Aspergillus niger*, *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum*, *Mucor* spp. *Penicillium lividum*, *Trichoderma viridae* [21]. В некоторых исследованиях установлено, что комплексные соединения глицирризиновой кислоты проявляют биостимулирующие и гормональные свойства, способствуя росту и развитию растений. Несмотря на явную биологическую активность препаратов на основе глицирризиновой кислоты, исследования по изучению кислоты и ее производных как биостимуляторов сельскохозяйственных растений почти не проводятся [22].

Полученные методами механохимии фунгицидные комплексы тебуконазола с глицирризиновой кислотой и ее натриевой солью улучшают растворимость действующего вещества и его проникновение во внутренний объем зерна (в 2.2 и 2.5 раза), что обеспечивает эффективное подавление семенных инфекций при значительном снижении норм расхода препарата [23].

Цель работы — изучить влияние обработки семян фунгицидными комплексами ТБК с глицирризиновой кислотой и ее производными на ростовые процессы растений яровой мягкой пшеницы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторном эксперименте по изучению ростовых процессов яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) под влиянием супрамолекулярных комплексов тебуконазола с глицирризиновой кислотой, динатриевой солью глицирризиновой кислоты (массовое соотношение 1 : 5) и экстрактом корней солодки (в соотношении 1 : 5 и 1 : 10) с нормами расхода 0.3 и 0.1 кг/т семян использовали зерно сорта Омская 36. Комплексы приготовлены по описанным ранее методикам [23, 24]. Эти варианты опыта сравнивали с контролем без обработки семян фунгицидами, и вариантами с обработкой семян тебуконазолом с нормами расхода 0.3 и 0.1 кг/т семян. Откалиброванные по размеру зерновки (масса 1000 зерен = 41.2 г) обрабатывали препаратами с увлажнением (10 л/т), выдерживали 1 сут в закрытых пластиковых сосудах, затем помещали в чашки Петри (10 шт./чашку × 4 повторения) на увлажненную фильтровальную бумагу. Проращивание проводили при температуре 20°C и естественном освещении. В фазе 1-го листа измеряли длину корней, высоту проростка, определяли воздушно-сухую массу.

Полевые опыты проведены в 2018–2019 гг. на опытном поле СибНИИЗиХ СФНЦ РАН, на черноземе выщелоченном среднесуглинистом, после парового предшественника. Использовали семена яровой пшеницы сорта Новосибирская 31. Посев осуществляли в начале 3-й декады мая с нормой высева 6.5 млн всхожих зерен/га. Схема опыта: 1 — контроль без обработки семян фунгицидами, 2 — обработка семян фунгицидом раксил, КС (д.в. тебуконазол, 60 г/л) с нормой расхода 0.5 л/т (30 г ТБК/т, рекомендованная норма применения), 3 — обработка семян фунгицидом раксил, КС с нормой расхода 0.25 л/т, 4 — обработка семян супрамолекулярным комплексом тебуконазола с растительными метаболитами — экстрактом корней солодки уральской, *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. в соотношении 1 : 10 по массе, ВМ 24 ч, норма расхода 0.3 кг/т, 5 — обработка семян супрамолекулярным комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки в соотношении 1 : 10 по массе, ВМ 24 ч; норма расхода 0.15 кг/т, 6 — обработка семян супрамолекулярным комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки в соотношении 1 : 5 по массе, ВМ 24 ч, норма расхода 0.15 кг/т, 7 — обработка семян супрамолекулярным комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки в соотношении 1 : 5 по массе, ВМ 24 ч, норма расхода 0.075 кг/т. Приготовление сухих композиций — комплексов тебуконазола с экстрактом корней солодки осуществляли по оригинальной механохимической технологии,

описанной ранее [24]. Протравливание проводили с увлажнением — 10 л/т семян. Площадь делянки в 2018 г. — 21.5, в 2019 г. — 10.2 м², повторность соответственно — четырех- и восьмикратная, размещение систематическое. Оценку влияния фунгицидных комплексов на ростовые процессы яровой мягкой пшеницы проводили в динамике. В каждом варианте отбирали по 100 растений (10 × 10 точек/делянка), определяли высоту растений, воздушно-сухую биомассу надземной части. В фазе восковой спелости зерна в каждой повторности опыта определяли густоту стояния растений, их продуктивную кустистость. Учет урожая проводили 5 и 3 сентября прямым комбайнированием. Статистическая обработка данных выполнена с помощью программ “СНЕДЕКОР” [25], Statistica 7.0 и Excel 13.

Годы исследования отличались по метеорологическим показателям. В 2018 г. температура воздуха в мае была ниже нормы на 3.3°C, осадки обильные, с превышением среднегодовых показателей в 2.3 раза. В июне температура воздуха превышала среднегодовые показатели на 2.4°C, осадки — в 1.2 раза. В июле температурный режим был близок к норме, со снижением (на 1.1 и 2.8°C) в 1-й и 3-й декадах и превышением (на 2.5°C) — во 2-й декаде. Осадки в июле выпадали в 3-й декаде, с превышением нормы в 2 раза. В 1-й декаде ощущался недостаток влаги (меньше нормы в 1.9 раза), во 2-й декаде дожди практически отсутствовали. В 1-й декаде августа температура воздуха относительно многолетних показателей была ниже на 2.1°C, во 2-й и 3-й декадах — превысила их на 2.4 и 2.0°C. Дефицит осадков (в 1.9 раза меньше нормы) наблюдали в 1-й и 2-й декадах, превышение (в 1.3 раза) — в 3-й декаде. В 2019 г. температура воздуха в мае практически соответствовала норме, незначительный недобор отмечен только во 2-й декаде — на 1.3°C. Выпавшие в 3-й декаде месяца обильные осадки обеспечили превышение показателя месячной нормы в 1.2 раза. Июнь и июль по температурному режиму оказались близки к среднегодовым показателям. Недобор тепла (на 1.2 и 0.7°C) отмечен в 3-й декаде июня и июля, превышение (на 0.7°C) — в 1-й и 2-й декадах июля. Количество выпавших осадков в период кущения пшеницы (июнь) составило 45% нормы, особенно дефицитными (в 2.0 и 7.4 раза меньше среднегодовых показателей) были 1-я и 3-я декады. В июле основные осадки, превысившие норму на 13.0 и 38.0 мм, выпали в 1-й и 2-й декадах. В августе на фоне пониженного увлажнения (в 15.0, 2.2 и 2.0 раза) подекадная температура воздуха превышала среднегодовые показатели на 3.1, 1.8 и 2.9°C.

РЕЗУЛЬТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение фунгицидных комплексов тебуконазола с глицирризиновой кислотой, ее динатриевой солью и веществами экстракта корней солодки в лабораторных условиях позволило выявить заметное влияние этих “вспомогательных” веществ на ростовые процессы яровой мягкой пшеницы (табл. 1).

Проращивание семян пшеницы в контролируемых условиях показало наличие сильного ингибирующего эффекта от их обработки тебуконазолом. Фунгицид в норме расхода 0.3 кг/т семян сдерживал рост как корней (на 23.6%), так и проростков (на 52.3%), сильнее ингибируя формирование последних. Это привело к существенному уменьшению биомассы корней и проростков пшеницы — на 18.6 и 46.6% соответственно. Снижение нормы расхода тебуконазола в 3 раза приводило к увеличению всех биометрических показателей относительно варианта с полной дозой препарата — длины корней (на 5.9%), высоты проростка (9.8%) и их биомассы (на 2.8 и 29.2%), однако и в этом случае наблюдался незначительный ретардантный эффект. Он существенно нивелировался, если тебуконазол применяли в комплексе с глицирризиновой кислотой (1 : 5). Усиленный рост и накопление биомассы проростками вызывала обработка семян комплексом с нормой расхода 0.3 кг/т. Длина корней и их биомасса увеличивались относительно варианта с тебуконазолом с соответствующей нормой расхода на 23.8 и 17.1%, высота проростков и их биомасса — на 42.2 и 37.5%. Понижение нормы расхода комплекса ослабляло ростостимуляцию корней до 19.0%, но усиливало развитие проростков, высота и биомасса которых увеличивалась на 73.2 и 79.2%. Ослабление ретардантного эффекта происходило и в случае обработки семян тебуконазолсодержащим комплексом с натриевой солью глицирризиновой кислоты (1 : 5), особенно со снижением нормы расхода препарата. Относительно вариантов с применением чистого тебуконазола с нормой расхода 3 кг/т семян интенсивность развития проростков увеличивалась на 22.6 и 42.8% (длина корней), 14.2 и 30.4% (биомасса корней), 39.4 и 70.4% (высота проростка), 29.1 и 50.3% (биомасса проростка) соответственно при нормах расхода комплекса 0.3 и 0.1 кг/т семян.

Более выраженный ростостимулирующий эффект наблюдали при обработке семян комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки в соотношениях 1 : 5 и 1 : 10. Рост корней усиливался не только относительно вариантов с применением тебуконазола с нормой расхода 0.3 кг/т семян на 33.3 и 52.4% в первом случае и на 50.0 и

Таблица 1. Влияние комплексов тебуконазола с глицирризиновой кислотой, ее натриевой солью и экстрактом корней солодки на ростовые процессы яровой мягкой пшеницы сорта Омская 36 (лабораторный опыт)

Вариант	Показатели роста			
	длина корней	высота роста	биомасса корней 1-го растения	биомасса 1-го проростка
	см		мг	
Контроль (без обработки семян фунгицидами)*	11.0 ± 0.1	14.9 ± 0.3	10.8 ± 0.5	11.3 ± 0.8
ТБК 0.3 кг/т**	8.4 ± 0.2	7.1 ± 0.2	8.8 ± 0.3	6.0 ± 0.4
ТБК 0.1 кг/т	8.9 ± 0.2	7.8 ± 0.3	9.0 ± 0.01	7.8 ± 0.5
ТБК : глицирризиновая кислота (1 : 5), ВМ, 4 ч, 0.3 кг/т	10.4 ± 0.1	10.1 ± 0.1	10.3 ± 0.5	8.3 ± 0.5
ТБК : глицирризиновая кислота (1 : 5), ВМ, 4 ч, 0.1 кг/т	10.0 ± 0.1	12.3 ± 0.2	9.0 ± 0.4	10.8 ± 0.5
ТБК : натриевая соль глицирризиновой кислоты (Na ₂ GA) (1 : 5), ВМ, 6 ч, 0.3 кг/т	10.3 ± 0.5	9.9 ± 0.1	10.0 ± 0.4	7.8 ± 0.3
ТБК : натриевая соль глицирризиновой кислоты (Na ₂ GA) (1 : 5), ВМ, 6 ч, 0.1 кг/т	12.0 ± 0.2	12.1 ± 0.1	11.4 ± 0.3	9.0 ± 0.4
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5), ВМ, 24 ч, 0.3 кг/т	11.2 ± 0.1	10.1 ± 0.1	7.5 ± 0.3	9.8 ± 0.6
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5), ВМ, 24 ч, 0.1 кг/т	12.8 ± 0.2	14.2 ± 0.3	11.8 ± 0.6	10.3 ± 0.5
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10), ВМ, 24 ч, 0.3 кг/т	12.6 ± 0.3	12.8 ± 0.2	8.5 ± 0.5	8.5 ± 0.3
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10), ВМ, 24 ч, 0.1 кг/т	13.0 ± 0.1	13.6 ± 0.1	9.5 ± 0.3	10.3 ± 0.8
*Степень влияния по Снедекору, %	98.7	99.4	88.0	90.9
**Степень влияния по Снедекору, %	98.8	99.3	88.1	90.8

54.8% — во втором, но и относительно чистого контроля — на 2.0 и 16.4%, 14.5 и 18.2% соответственно. Высота проростка приближалась к показателю чистого контроля лишь в варианте с применением комплекса тебуконазола с экстрактом корней солодки (1 : 5) с нормой расхода 0.1 кг/т семян. В остальных случаях она была меньше, чем в контроле, на 32.2, 14.1 и 8.7%. Но все же добавление экстракта корней солодки в значительной степени нивелировало ретардантный эффект тебуконазола, т.к. высота проростка пшеницы относительно варианта с этим препаратом увеличилась на 42.2 и 82.1% при обработке семян комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки (1 : 5) с нормой расхода 0.3 и 0.1 кг/т семян и на 80.2 и 74.4% при обработке семян комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки (1 : 10) с нормой расхода 0.3 и 0.1 кг/т семян. Таким образом, при пониженных нормах расхода фунгицидных комплексов и увеличении доли экстракта корней солодки в их составе стимуляция роста пшеницы была больше.

Комплексы тебуконазола с экстрактом корней солодки в полевых условиях. Они показали высокую эффективность против обыкновенной корневой гнили яровой пшеницы. В начале вегетации пшеницы во всех вариантах обработки семян препаратами с большей нормой расхода действующего вещества проявлялся и более высокий угнетающий рост растений эффект. Его проявление зависело от условий вегетационного периода (табл. 2). Разница ретардантного эффекта между вариантами с более высокой и сниженной в 2 раза нормой расхода препаратов была очень заметной при формировании первых 2-х листьев в условиях 2018 г.: высота растений во всех вариантах с более высокой нормой расхода снижалась на 23.0, 23.0 и 23.7%, с пониженной в 2 раза нормой расхода — на 9.3 (раксил, КС), 14.4 (тебуконазол с экстрактом корней солодки, 1 : 10) и 16.5% (тебуконазол с экстрактом корней солодки, 1 : 5). Аналогичной зависимости не отмечено в условиях 2019 г. Небольшое снижение роста растений (на 5.4, 4.8 и 7.8% соответственно вариантам) наблюдали при обработке семян препаратами с более высокой нормой расхода. Ретардантный эффект отразился

Таблица 2. Влияние обработки семян яровой мягкой пшеницы комплексами тебуконазола с экстрактом корней солодки на ее ростовые процессы в начале вегетации

Вариант	Высота растений, см				Воздушно-сухая биомасса надземной части 1-го растения, мг			
	2 листа		3 листа		2 листа		3 листа	
	2018 г.	2019 г.	2018 г.	2019 г.	2018 г.	2019 г.	2018 г.	2019 г.
Контроль	13.9	16.7	27.5	34.8	15.6	23.1	85.2	250
Раксил, КС 0.5 л/т	10.7	15.8	23.7	32.1	12.0	23.3	73.5	259
Раксил КС 0.25 л/т	12.6	16.7	25.7	35.3	14.6	24.5	75.8	292
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10) 0.3 кг/т	10.7	15.9	25.4	35.4	12.8	25.6	87.2	303
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10) 0.15 кг/т	11.9	16.7	26.0	37.4	13.1	26.0	88.1	325
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5) 0.15 кг/т	10.6	15.4	24.1	36.8	13.2	27.2	85.3	321
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5) 0.075 кг/т	11.6	17.1	28.4	37.4	14.4	28.0	107.0	339
<i>HCP</i> ₀₅	0.4	0.3	0.5	0.4	0.8	0.5	3.0	3.9
Степень влияния по Снедекору, %	95.0	87.3	96.1	97.9	83.0	96.8	96.5	99.4

($r = 0.88$) на формировании вегетативной массы. В условиях 2018 г. ни в одном из вариантов опыта растения не накопили биомассу, равную контролю. При ослаблении ретардантного эффекта у растений, сформировавшихся из семян, обработанных комплексами тебуконазола с экстрактом корней солодки в соотношении 1 : 10 с нормой расхода 0.15 кг/т и в соотношении 1 : 5 с нормой расхода 0.075 кг/т, накопление биомассы увеличивалось на 9.2 и 20.0% относительно варианта с раксилем в рекомендованной норме применения. Следует отметить, что обработка семян раксилем с пониженной в 2 раза нормой расхода также приводила к повышению биомассы растений на 21.6%. В 2019 г. при обработке семян комплексами тебуконазола с экстрактом корней солодки наблюдали усиление накопления биомассы растениями как относительно варианта с применением раксиле 0.5 кг/т семян — на 9.9–20.2%, так и чистого контроля — на 10.8–21.2%. В фазе начала кущения задержку роста растений в опытных вариантах наблюдали только в одном (2018 г.) из 2-х лет проведения полевых экспериментов. Во всех вариантах опыта высота растений была меньше чем в контроле (на 5.5–13.8%), за исключением варианта протравливания семян тебуконазолом с экстрактом корней солодки (1 : 5) с нормой расхода 0.075 кг/т, где ретардантный эффект не проявился. В этот период развития растений отмечена заметная разница во влиянии испытанных комплексов и химического контроля на накопле-

ние вегетативной массы растений. Ее показатель к фазе кущения пшеницы увеличивался у растений, защищенных тебуконазолом с экстрактом корней солодки (1 : 10) с нормой расхода 0.3 и 0.15 кг/т семян на 18.6 и 19.9%, а тебуконазолом с экстрактом корней солодки (1 : 5) с нормой расхода 0.15 и 0.075 кг/т — на 16.0 и 45.6% соответственно, в последнем случае растения накопили биомассу на 25.6% больше, чем в контроле.

В 2019 г. рост растений тормозился на 7.8% только в варианте с обработкой семян раксилем в рекомендуемой норме расхода. Протравливание комплексами тебуконазола с экстрактом корней солодки в соотношениях 1 : 10 и 1 : 5 положительно влияло на ростовой процесс пшеницы и к фазе кущения пшеницы высота растений превышала контроль на 1.7 и 7.5, 5.7 и 7.5% соответственно нормам расхода препаратов. Показатель накопленной вегетативной массы увеличился относительно чистого контроля на 21.1 и 29.7%, 28.2 и 35.5%, что вероятно, можно объяснить лучшим кущением растений.

К концу вегетации пшеницы во всех опытных вариантах достоверно увеличивалась высота растений: при применении раксиле — на 2.7 и 4.3% в 2018 г., на 0.8 и 2.0% в 2019 г., комплексов тебуконазола с экстрактом корней солодки — на 6.0–8.8 и 3.2–4.2% соответственно (табл. 3). В первый год эксперимента биомасса 1-го растения (без зерна) при обработке тебуконазолом с экстрактом корней солодки в соотношении 1 : 10 превосходила кон-

Таблица 3. Влияние обработки семян яровой мягкой пшеницы комплексами тебуконазола с экстрактом корней солодки на показатели роста растений в фазе восковой спелости зерна

Вариант	Высота растений, см		Воздушно-сухая биомасса надземной части 1-го растения, г	
	2018 г.	2019 г.	2018 г.	2019 г.
Контроль	95.8	99.4	1.65	2.44
Раксил, КС 0.5 л/т (30 г ТБК/т)	98.4	100	2.03	2.55
Раксил КС 0.25 л/т (15 г ТБК/т)	99.9	101	1.84	2.55
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10) 0.3 кг/т	102	103	2.28	2.67
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10) 0.15 кг/т	103	104	2.12	2.68
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5) 0.15 кг/т	103	103	2.15	2.66
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5) 0.075 кг/т	104	104	2.21	2.68
<i>HCP</i> ₀₅	1.4	0.3	0.18	0.04
Степень влияния по Снедекору, %	91.0	98.8	73.9	90.5

Таблица 4. Влияние комплексов тебуконазола с экстрактом корней солодки на густоту стояния, продуктивный стеблестой и урожайность мягкой яровой пшеницы

Вариант	Густота стояния растений		Число продуктивных стеблей		Урожайность, т/га	
	шт./м ²					
	2018 г.	2019 г.	2018 г.	2019 г.	2018 г.	2019 г.
Контроль	475	335	511	379	5.69	4.57
Раксил, КС 0.5 л/т (30 г ТБК/т)	544	390	608	462	5.89	4.86
Раксил КС 0.25 л/т (15 г ТБК/т)	542	409	660	494	6.09	5.02
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10) 0.3 кг/т	582	464	774	541	6.24	5.05
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 10) 0.15 кг/т	555	421	708	504	6.38	5.11
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5) 0.15 кг/т	573	426	766	510	6.35	5.09
ТБК : экстракт корней солодки (1 : 5) 0.075 кг/т	548	441	754	531	6.48	5.13
<i>HCP</i> ₀₅	29	7	22	11	0.13	0.07
Степень влияния по Снедекору, %	74.7	98.6	97.7	98.1	90.6	93.3

трольный показатель на 38.2 и 28.5%, в соотношении 1 : 5 — на 30.3 и 33.9%, при использовании раксил — на 23.0 и 11.5%. В 2019 г. биомасса растений увеличилась относительно контроля на 9.0–9.8%.

Предпосевная обработка семян пшеницы фунгицидными комплексами оказала существенное влияние на формирование плотности посева, продуктивную кустистость, что в конечном итоге привело к повышению зерновой продуктивности культуры (табл. 4). Густота стояния растений в вариантах применения фунгицидных комплексов тебуконазола с экстрактом корней солодки пре-

высила контроль на 22.5 и 16.8, 20.6 и 15.4% — в первый, на 38.5 и 25.7, 27.2 и 31.6% — во второй год проведения эксперимента. В оба года число растений в вариантах с протравливанием семян коммерческим препаратом раксил также превышало контроль на 14.5 и 14.1%, 16.4 и 22.1% соответственно при более высокой и пониженной нормой расхода препарата. Но еще более важный показатель, на который оказало влияние протравливание семян, — это количество продуктивных стеблей, которое увеличилось в вариантах протравливания семян фунгицидными комплексами

на 42.7 и 33.0, 34.6 и 40.1% в 2018 г. и на 51.5 и 38.6, 49.9 и 47.6% — 2019 г., что значительно больше аналогичных показателей в варианте применения раксил (21.9 и 30.3%, 19.0 и 29.2% соответственно).

Плотность посева определяла сбор зерна пшеницы ($r_{\text{шт. растений/кв. м}} \times \text{урожайность} = 0.75 \text{ и } 0.90$, $d = 0.56 \text{ и } 0.81$, $r_{\text{шт. продуктивных стеблей/растение}} \times \text{урожайность} = 0.92 \text{ и } 0.95$, $d = 0.85 \text{ и } 0.90$ соответственно в 2018 и 2019 гг.). Ее урожайность значительно превысила контроль и в случае обработки семян комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки (1 : 10) 0.3 и 0.15 кг/т — на 0.55 и 0.48 т/га, или на 9.7–10.5% в 2018 г., на 0.69 и 0.54 т/га, или на 12.1 и 11.8% в 2019 г., так и комплексом тебуконазола с экстрактом корней солодки (1 : 5) 0.15 и 0.075 кг/т — на 0.66 и 0.52 т/га, или на 11.6 и 11.4% и на 0.79 и 0.56 т/га, или на 13.9 и 12.3% соответственно. Сбор зерна в вариантах с обработкой семян препаратом раксил с нормами расхода 0.25 и 0.5 л/т повысился на 0.20 и 0.29 т/га, или на 3.5 и 6.3% и на 0.40 и 0.45 т/га, или на 7.0 и 9.8% относительно контроля, но оставался существенно меньше, чем при защите семенного материала от семенной и почвенной инфекции супрамолекулярными комплексами тебуконазола с экстрактом корней солодки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что супрамолекулярные комплексы тебуконазола с глицирризиновой кислотой, ее натриевой солью, компонентами экстракта корней солодки в значительной степени нивелировали ретардантное действие тебуконазола на этапе начального развития растений яровой пшеницы в контролируемых условиях. В полевых условиях применение комплекса тебуконазола с экстрактом корней солодки также существенно снижало подавляющий эффект тебуконазола на ростовые процессы растений пшеницы. Ростстимулирующие свойства экстракта корней солодки проявлялись по-разному в зависимости от метеоусловий периода вегетации. Протравливание семян яровой пшеницы супрамолекулярными комплексами тебуконазола с экстрактом корней солодки усилили интенсивность ее роста и развития, повысили густоту стояния растений в посевах, формирование продуктивных стеблей, и в итоге — урожайность. Это свидетельствовало о перспективности включения веществ экстракта корней солодки в комплексные фунгицидные протравители, которые обеспечивают усиление роста и развития растений яровой мягкой пшеницы при понижении норм расхода и количества действующего вещества в их составе. Это позволяет включать комплексы в экологизированные схемы за-

щиты растений с целью формирования высокопродуктивных экологически сбалансированных агроценозов мягкой яровой пшеницы в условиях лесостепи Западной Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кекало А.Ю., Немченко В.В. Технологии защиты яровой пшеницы от фитопатогенов // Аграрн. вестн. Урала. 2017. № 04(158). С. 26–30.
2. Говоров Д.Н., Живых А.В., Щетинин П.Б. Фитоэкспертиза и предпосевная обработка семян — важнейшие приемы технологии возделывания зерновых // Защита и карантин раст. 2018. № 8. С. 12–13.
3. Дымов Ю.А. Исследование биологической эффективности ряда перспективных протравителей в отношении корневых гнилей на яровой пшенице // Вестн. Орел ГАУ. 2016. № 4(61). С. 84–90. <https://doi.org/10.15217/4848>
4. Гришечкина Л.Д. Препараты на основе тебуконазола для защиты пшеницы яровой от семенной и почвенной инфекции // АгроXXI. 2014. № 1–3. С. 31–34.
5. Korsukova A.V., Borovik O.A., Grabelnykh O.I., Voinikov V.K. The Tebuconazole — based protectant of seeds “Bunker” induces the synthesis of dehydrins during cold hardening and increases the frostresistance of wheat seed lings // . Stress Physiol. Biochem. 2015. V. 11. № 4. P. 118–127.
6. Korsukova A.V., Gornostai T.G., Grabeinykh O.I., Dorofeev N.V., Pobezhimova T.P., Sokolova N.A., Dudareva L.V., Voinikov V.K. Tebuconazole regulates fatty acid composition of etiolated winter wheat seed lings // J. Stress Physiol. Biochem. 2016. V. 12. № 2. P. 72–79.
7. Побезимова Т.П., Корсукова А.В., Дорофеев Н.В., Грабелных О.И. Физиологические эффекты действия на растения фунгицидов триазольной природы // Изв. вузов. Прикл. хим. и биотехнол. 2019. Т. 9. № 3. С. 461–476. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476>
8. Корсукова А.В., Боровик О.А., Грабелных О.И., Дорофеев Н.В., Побезимова Т.П., Войников В.К. Повышение холодостойкости проростков яровой пшеницы при обработке семян тебуконазолом // Изв. вузов. Прикл. хим. и биотехнол. 2015. № 4(15). С. 30–36.
9. Чибис С.П., Кротова Л.А., Мухина Я.В. Результаты исследований влияния химических соединений на проростки пшеницы сорта Павлоградка // Вестн. ОмскГАУ. 2019. № 1(33). С. 61–68.
10. Volova T.G., Prudnikova S.V., Zhila N.O. Fungicidal activity of slow-release P(3HB)/TEB formulations in wheat plant communities infected by *Fusarium moniliforme* // Environ. Sci. Pollut. Res. 2018. № 25(1). P. 552–561. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0466-4>
11. Байбакова Е.В., Нефедьева Е.Э., Белопухов С.Л. Исследование влияния современных протравителей на всхожесть и рост проростков зерновых культур // Изв. вузов. Прикл. хим. и биотехнол. 2016. Т. 6. № 3. С. 57–64. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-3-57-64>

12. Павлюк Н.Т., Шенцев Г.Д. Влияние протравителей на посевные качества семян зерновых культур // Вестник. ВоронежГАУ. 2016. № 4(51). С. 21–25. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2016.4.21>
13. Демиденко Г.А. Влияние препарата “Бункер” на рост и развитие семян пшеницы Тулунская 12 // Вестн. КрасГАУ. 2014. № 3. С. 69–77.
14. Абеленцев В.И. Факторы, снижающие эффективность обеззараживания семян // Защита и карантин раст. 2007. № 3. С. 28–29.
15. Петрова Н.Г., Гуляева Е.И., Кунгурцева О.В. Нанофунгициды против комплекса листовых болезней яровой пшеницы // Защита и карантин раст. 2018. № 8. С. 19–21.
16. Asrar J., Ding Y., La Monica R.E., Ness L.C. Controlled release of tebuconazole from a polymer matrix micro-particle: release kinetics and length of efficacy // J. Agric. Food Chem. 2004. № 52. Р. 4814–4820. <https://doi.org/10.1021/jf0306385>
17. Массалимов И.А., Удовенко И.Ф., Киреева М.С., Ви-харева И.Н. Применение водных серосодержащих композиций в качестве средств защиты растений // Башкир. хим. журн. 2006. Т. 13. № 4. С. 97–100.
18. Толстиков Г.А., Балтина Л.А., Шульц Э.Э., Покров-ский А.Г. Глицерризиновая кислота // Биоорг. хи-мия. 1997. Т. 23. № 9. С. 691–709.
19. Абрамова Г.А., Палагина М.В. Солодка уральская и ее использование в пищевой и фармацевтической промышленности // Вестн. ТГЭУ. 2005. № 1. С. 77–87.
20. Хабибрахманова В.Р., Халед Ш.М., Габдрахманова А.Р., Сысоева М.А. Переработка шрота корня солодки. II. Тритерпеноидные и флавоноидные вещества этанольных экстрактов // Химия раст. сырья. 2016. № 2. С. 97–102. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2016021121s>
21. Дикусар Е.А., Поткин В.И., Козлов Н.Г., Гаджилы Р.А., Тлеженов Р.Т., Ювченко А.П., Желдакова Р.А. Син-тез и изучение фунгицидной активности амина-вых солей глицерризиновой кислоты // Химия раст. сырья. 2011. № 4. С. 53–56.
22. Исаев Ю.Т., Аскарлов И.Р., Рустамов С.А., Хожима-тов М.М. Получение комплексных соединений глицирама с биуретом и их биологическая актив-ность // Universum: хим. и биол. 2019. № 4(58). С. 15–18.
23. Душкин А.В., Метелева Е.С., Хомиченко Н.Н., Власенко Н.Г., Теплякова О.И. Халиков М.С., Ха-ликов С.С. Новый пестицидный препарат на осно-ве комплексов тебуконазола и производных глиц-ирризина // Усп. совр. естествознания. 2016. № 11. С. 296–300. / <https://doi.org/10.17513/use.36227>
24. Метелева Е.С., Евсеенко В.И., Теплякова О.И., Халиков С.С., Поляков Н.Э., Анапасенко И.Е., Душкин А.В., Власенко Н.Г. Нанопестициды на ос-нове супрамолекулярных комплексов тебуконазо-ла для обработки семян злаковых культур // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. № 3(26). С. 279–294. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-5-1>
25. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компью-тере. 2-е изд. Новосибирск, 2012. 282 с.

The Effect of Supramolecular Complexes of Tebuconazole on Growth Processes of Spring Soft Wheat

O. I. Teplyakova^a, V. I. Evseenko^b, A. V. Dushkin^b, and N. G. Vlasenko^{a, #}

^aSiberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences
r.p. Krasnoobsk, Novosibirsk region 630501, Russia

^bInstitute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of RAS
ul. Kutateladze 18, Novosibirsk 630128, Russia

[#]E-mail: vlas_nata@ngs.ru

In laboratory and field experiments (2018–2019), a comparative assessment of the retardant effect of tebuconazole (TBC) and its supramolecular complexes with glycyrrhizic acid, disodium salt of glycyrrhizic acid (mass ratio 1 : 5) and licorice root extract (1 : 5 and 1 : 10), created by the method of mechanochemistry for the treatment of seeds of spring soft wheat. In order to study the possibilities of reducing the amount of active substance per ton of seeds, TBC and its mechanical complexes were used in two consumption rates – 0.3 and 0.1 kg/t. Supramolecular complexes of TBC in the laboratory experiment significantly less restrained the process of seedlings formation (root growth rate was slowed down by 5–9%? sprout – by 17.4–34%) than pure TBC (by 24 and 52%, respectively). The strength of the retardant effect of experimental fungicide complexes depended on the rate of consumption and their composition. The best results were obtained when using TBC complexes with licorice root extract, which increased the growth of seedlings (roots by 33–50%, sprouts – by 42.2–82%), not only relative to the option with the use of TBC, but also the option without treatment of seeds with fungicides (by 16–18%). Wheat growth stimulation increased with a decrease in the rate of consumption of fungicide complexes and an increase in the proportion of licorice root extract in their composition. This effect is confirmed by the results of field research. The use of tebuconazole complexes with licorice root extract in a mass ratio of 1 : 5 and 1 : 10 (consumption rate of 0.3 and 0.15 kg/t) during pre-sowing seed treatment increased the growth and development of wheat, productive tillage capacity, density of planting and yield – by 0.52–0.69 t/ha. More highly productive crops of spring soft wheat were formed using lower consumption rates and the amount of active substance in the fungicidal composition.

Key words: soft spring wheat, growth processes, supramolecular complexes, tebuconazole, glycyrrhizic acid, sodium salt of glycyrrhizic acid, licorice root extra.

УДК 633.63:632.954

ПРОДУКТИВНОСТЬ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ, ПОВРЕЖДЕННОЙ ГЕРБИЦИДАМИ ГОРМОНОПОДОБНОГО ДЕЙСТВИЯ В СУБЛЕТАЛЬНЫХ И ИЗРЕЖИВАЮЩИХ ПОСЕВ ДОЗАХ

© 2021 г. Е. А. Дворянкин

*Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, п. ВНИИСС, 86, Россия*

E-mail: dvoryankin149@gmail.com

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

После доработки 06.04.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В многолетних полевых опытах изучали продуктивность сахарной свеклы в зависимости от остаточного содержания растворов гербицидов гормоноподобного действия в баке опрыскивателя после обработки зерновых культур, внесенных в посев в смеси с раствором гербицида бетанал Эксперт ОФ (БЭОФ). Показано, что гербициды гормоноподобного действия в малых дозах заметно тормозили нарастание массы растений и изреживали посев сахарной свеклы. Наличие примесей эстерона, дикамбы, агритокса при внесении гербицидов группы бетаналов заметно увеличивало токсичность смеси для растений. Приведены данные снижения показателей продуктивности сахарной свеклы в зависимости от дозы остатков гербицидов гормоноподобного действия в растворе с БЭОФ, 1.3 л/га.

Ключевые слова: сахарная свекла, гербициды, фитотоксичность, факторы среды, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188121010051

ВВЕДЕНИЕ

Рост и развитие сахарной свеклы отражают реакцию растений на условия возделывания [1]. Подавление ростовых процессов и, как следствие, слабое развитие листовой поверхности — это основная причина низкой ассимиляционной активности растений, подверженных воздействию сильных токсикантов [2–4]. Между силой воздействия поражающего фактора и активностью ростовых процессов растений существует тесная зависимость, которая корректируется погодными условиями [3–5]. Поэтому уровень первоначального воздействия гербицида и погодные условия определяют скорость адаптационного процесса и особенности формирования урожая культуры [6].

Одна из причин повреждения сахарной свеклы токсичными для нее гербицидами — снос препаратов ветром с соседнего поля во время запланированной обработки ими, например, зерновых культур. В отдельных случаях подобные происшествия заканчиваются гибелью растений сахарной свеклы [7].

Наиболее распространенной ошибкой, которая может быть фактором повреждения сахарной свеклы гербицидами зернового ряда, является пренебрежение санитарной обработкой опрыс-

кивателя или растворных узлов после использования токсичных для культуры гербицидов.

Цель работы — изучить влияние остатков раствора гербицидов гормоноподобного действия в баке опрыскивателя при внесении в смеси с гербицидами группы бетаналов на продуктивность сахарной свеклы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на опытном поле ВНИИСС в 2012–2019 гг. Объектом исследования служили растения сахарной свеклы в фазе семядолей— 2-х пар настоящих листьев и гербициды гормоноподобного действия в сублетальных и изреживающих посев дозах. Расчет сублетальных и изреживающих доз испытанных гербицидов осуществляли по ранее приведенной методике [8]. В опытах растения сахарной свеклы повреждали гербицидами гормоноподобного действия в дозах 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 и 8.0% от нормы применения на озимой пшенице (по каталогу). Норма расхода на пшенице гербицидов: эстерон, КЭ — 0.8 л/га, дикамба, ВР — 0.3 л/га, агритокс, ВК — 1.5 л/га. Почва опытного участка — чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый.

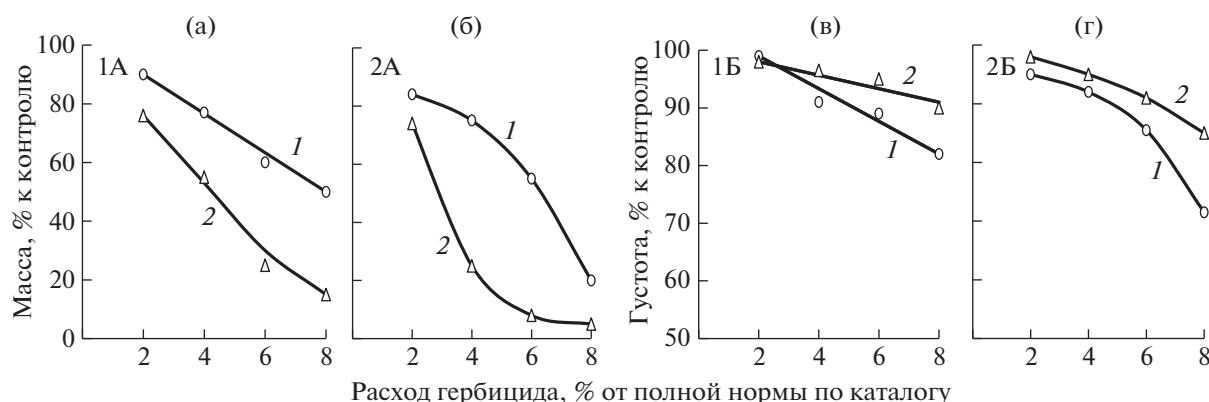


Рис. 1. Зависимость массы и густоты стояния растений сахарной свеклы от дозы гербицида, фазы развития растений и погодных условий: (а), (б) — масса растений через 12 сут после обработки Эстероном, (в), (г) — густота стояния растений сахарной свеклы через 30 сут после обработки эстероном; 1 — обработано в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев, 2 — в фазе 2-х пар настоящих листьев; 1А, 1Б — в условиях достаточной влаги в период обработок, 2А, 2Б — в условиях сухой жаркой погоды в период обработок.

Схема опыта имела 64 варианта (32 + 32 варианта, заложенных в посеве сахарной свеклы соответственно в фазе семядолей—начала развития 1-й пары настоящих листьев и в фазе развитых 2-х пар настоящих листьев) в трехкратной повторности. Площадь делянки 27 м², которую расщепляли пополам, затем на одной половине делянки вносили испытуемый гербицид, а на другой — испытуемый гербицид + бетанал Эксперт ОФ (БЭОФ) 1.3 л/га. Опыт включал контроль с ручной прополкой, контроль с обработкой растений БЭОФ 1.3 л/га, варианты с гербицидами гормоноподобного действия (ручная прополка), варианты с гербицидами гормоноподобного действия + БЭОФ 1.3 л/га (остаточные и прорастающие сорняки удаляли вручную). Площадь расщепленной делянки 13.5 м², учетной — 10.8 м². Размещение делянок в опыте рендомизированное.

В опытах проведено однократное внесение гербицидов на делянках. Гербициды вносили ранцевым опрыскивателем, оборудованным штангой с 6-ю распылителями на 6 рядков сахарной свеклы.

Сахарную свеклу возделывали в звене севооборота черный пар — озимая пшеница — сахарная свекла. Технология возделывания культур — общепринятая для ЦЧР.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гормоноподобные гербициды в сублетальных и изреживающих посев дозах заметно тормозили рост сахарной свеклы вплоть до временной его остановки при высоких (из испытуемых) дозах препарата и снижали массу растений, поврежденных гербицидом.

Торможение роста с характерными признаками повреждения сахарной свеклы гербицидом позднее сопровождалось частичной гибелью наиболее слабых растений, особенно поврежденных в фазе семядолей. Изреженность посева возрастала при поражении сахарной свеклы болезнями (корнеедом) и вредителями. Например, эстерон (в дозах 2—8% от полной нормы расхода на озимой пшенице) у растений сахарной свеклы, поврежденных гербицидом в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев, через 12 сут снижал нарастание массы на 10—51% и через 30 сут изреживал посев на 1.5—18% во влажных условиях произрастания (рис. 1а, б). У растений, поврежденных в фазе 2-х пар настоящих листьев, эстерон снижал массу на 25—83% и изреживал посев на 2—9% в сравнении с контролем.

В засушливых условиях погоды токсичность эстерона усиливалась до полной остановки роста растений, обработанных высокими дозами гербицида, а изреженность посева возрастала до 29% при повреждении гербицидом сахарной свеклы в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев. В посеве сахарной свеклы, поврежденной эстероном в фазе 2-х пар настоящих листьев, снижение густоты стояния растений достигало 16% (рис. 1в, г).

Оставшиеся растения постепенно восстанавливали свои функции: активизировались рост и развитие, заметно увеличивалась масса растений в изреженном посеве. Адаптационный процесс поврежденных эстероном растений в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев проходил быстрее, чем растений, поврежденных в фазе 2-х пар настоящих листьев. При условии достаточной влаги и периодических осадков в период адаптации к действию эстерона в дозе 2% от нормы расхода на озимой пшенице отмечали стиму-

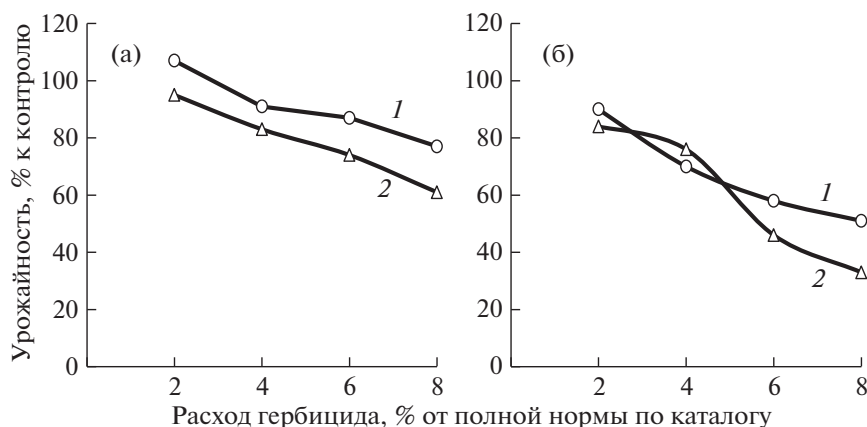


Рис. 2. Урожайность сахарной свеклы в зависимости от дозы эстерона, фазы развития растений и погодных условий: 1 — обработано в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев, 2 — в фазе 2-х пар настоящих листьев; (а) — в условиях достаточной влаги в период обработок, (б) — в условиях сухой жаркой погоды в период обработок.

ляцию роста сахарной свеклы и повышение урожайности корнеплодов на 5–8% в сравнении с контролем (без гербицидов). При воздействии на растения более высоких доз гербицида, если густота стояния сахарной свеклы, поврежденной в раннем возрасте, сохранялась в пределах 70–80 тыс. растений/га, то посев формировал урожайность с потерями 12–20% массы корнеплодов (рис. 2). В условиях сухой жаркой погоды с увеличением дозы гербицидов резко возрастал выпад всходов сахарной свеклы. Изреженные посевы сахарной свеклы имели более низкую продуктивность и качество корнеплодов.

Ключевым фактором при формировании урожайности сахарной свеклы, поврежденной в раннем возрасте, являлась густота стояния растений, тогда как для растений, поврежденных в фазе развитых 2-х пар настоящих листьев, определяющим фактором являлась способность к формированию продуктивного корнеплода. В фазе 2-х пар настоящих листьев растения сахарной свеклы были сильнее подвержены воздействию эстерона. При сращивании черешков и листьев уменьшалась площадь листового аппарата. Гербицид искривлял рост корнеплода (от 18 до 53% у растений на делянке при повреждении эстероном в дозах 4–8% от нормы расхода на озимой пшенице). Корнеплод вытягивался в длину, у него нарушалось формирование сосудистых пучков (рис. 3). Верхняя часть корнеплода сильнее выступала над поверхностью почвы, она зеленела, что заметно влияло на качество сырья. В засушливые годы повреждения корнеплодов часто прогрессировали, растения частично выпадали, а убранная продукция до 10–15% была поражена сосудистыми болезнями и корневыми гнилями, корнеплоды теряли товарное качество, плохо хранились.

Близкие результаты угнетения роста и развития сахарной свеклы были получены в вариантах с малыми дозами агритокса и дикамбы. По токсичности на растения сахарной свеклы гербициды расположились в ряд: эстерон > агритокс > дикамба. Наиболее яркие морфологические изменения растений сахарной свеклы (изгибы и искривления листьев и черешков, сращивание листьев и прочие деформации) проявлялись под действием эстерона.

Подтверждением этому служили урожайные данные, полученные в полевом опыте при обработке растений эстероном, агритоксом и дикамбой (табл. 1). Показано, что при обработке наиболее высокими (из испытуемых) дозами гербицидов, урожайность сахарной свеклы, поврежденной в фазе 2-х пар настоящих листьев, была меньше, чем в посеве, поврежденном в раннем возрасте растений.

На урожайность сахарной свеклы, поврежденной гербицидами, оказывали большое влияние погодные условия в период адаптации растений к гербицидам (табл. 2). В условиях достаточной влаги и периодически выпадающих осадков действие гербицидов было значительно мягче в сравнении с действием гербицидов в условиях недостатка влаги в почве и воздухе.

В производственных условиях свекловоды практически не наблюдают непосредственное (в чистом виде) действие на сахарную свеклу остатков токсичных гербицидов, оставшихся в баке опрыскивателя от предыдущих обработок на других культурах, т.к. их вносят в посев культуры в баковой смеси вместе со свекловичными гербицидами.

Более того, в полевых условиях растения сахарной свеклы часто подвержены комбинированному действию нескольких свекловичных гербицидов. Это обычная практика борьбы с сорняками в посевах сахарной свеклы. При взаимодействии

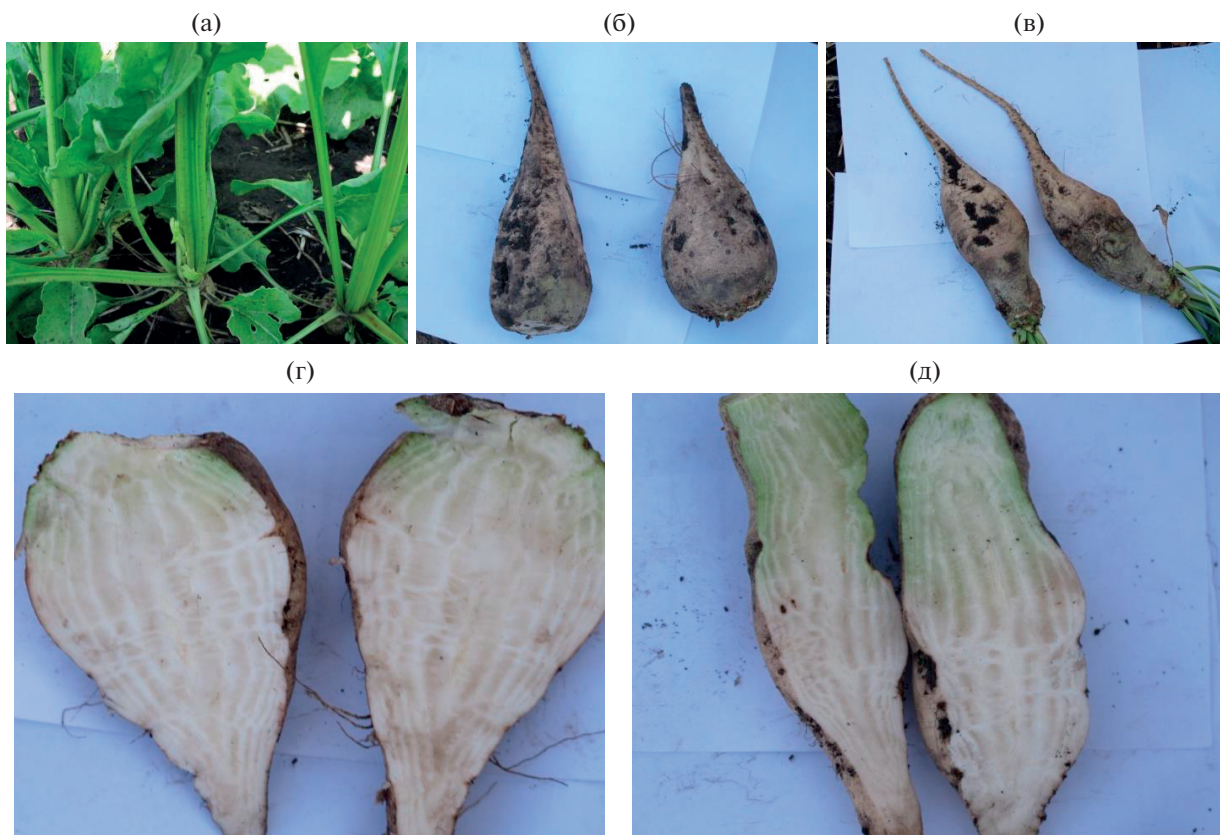


Рис. 3. Признаки воздействия эстерона на рост и развитие сахарной свеклы в конце вегетации растений: (а) — нарушение роста листового аппарата, (б) — форма корнеплода в контроле, (в) — форма корнеплода в опыте, (г) — сосудистые пучки корнеплода в контроле, (д) — сосудистые пучки корнеплода в опыте.

компонентов смеси между собой могут быть выделены эффекты суммирования действия препаратов (аддитивность) и усиления действия одного гербицида другим (синергизм). В первом случае комбинация гербицидов усиливает их действие на вредные объекты (сорняки), не затрагивая растения культуры, во втором — усиление действия

смеси гербицидов распространяется и на растения культуры [1]. Например, гербицид БЭОФ в нормированных для сахарной свеклы дозах не оказывал существенного влияния на растения сахарной свеклы, тогда как под действием смеси его с остатками в баке опрыскивателя гербицидов гормоноподобного действия, не применяемых на

Таблица 1. Влияние гербицидов гормоноподобного действия на урожайность сахарной свеклы (2016–2018 гг.), т/га

Гербицид	Варианты (% от нормы расхода на озимой пшенице)				
	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
Обработка в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев					
1. Контроль (без гербицидов)	44.8				
2. Эстерон (эфир 2,4-Д)	45.4	40.0	34.6	28.4	23.4
3. Агритокс (МЦПА)	42.7	42.8	36.2	30.8	27.2
4. Дикамба	43.6	41.6	38.6	33.7	30.9
Обработка в фазе 2-х пар настоящих листьев					
1. Контроль (без гербицидов)	44.8				
2. Эстерон (эфир 2,4-Д)	40.8	37.6	30.2	23.6	18.0
3. Агритокс (МЦПА)	40.4	38.3	34.6	27.0	24.4
4. Дикамба	42.9	40.6	35.8	30.4	24.6
НСР ₀₅	3.2				

Таблица 2. Влияние погодных условий и гербицидов эстерона и дикамбы на урожайность сахарной свеклы

Вариант (% от нормы расхода на озимой пшенице)	Урожайность		Сахаристость		Сбор сахара	
	т/га	% к контролю	%	% к контролю	т/га	% к контролю
В условиях недостатка влаги, 2014–2015 гг.						
1. Контроль (без гербицидов)	32.6	100	19.6	100	6.4	100
2. Эстерон 3%	27.8	85.3	19.3	98.5	5.4	84.4
3. Дикамба 3%	28.7	88.0	19.5	99.5	5.6	87.5
4. Эстерон 6%	21.4	65.6	18.4	93.8	3.9	60.9
5. Дикамба 6%	24.7	75.8	19.0	96.9	4.7	73.4
<i>HCP</i> ₀₅	2.9		0.4			
В условиях достаточной влаги и периодических осадков, 2012–2013 гг.						
1. Контроль (без гербицидов)	58.2	100	16.2	100	9.4	100
2. Эстерон, 3%	54.4	93.5	15.9	98.1	8.6	91.5
3. Дикамба, 3%	55.8	95.9	16.0	98.8	8.9	94.6
4. Эстерон, 6%	48.5	83.3	15.7	96.9	7.6	80.9
5. Дикамба, 6%	51.2	87.9	15.9	98.1	8.1	86.2
<i>HCP</i> ₀₅	4.2		0.3			

Таблица 3. Снижение продуктивности сахарной свеклы (% к контролю) в зависимости от фитотоксичности смеси БЭОФ 1.3 л/га с остатками различных гербицидов в баке опрыскивателя (гербициды вносили в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, 2017–2019 гг.)

Гербицид, % от полной нормы по каталогу	Без применения БЭОФ (на фоне с ручной прополкой)			С применением БЭОФ (на фоне с ручной прополкой остаточной засоренности)		
	1	2	3	1	2	3
Контроль с ручной прополкой БЭОФ 1.3 л/га (на фоне с ручной прополкой остаточной засоренности)	55.4	15.2	8.4	0.5	0.7	1.0
БЭОФ 1.3 л/га + эстерон 2.0%	2.8	2.0	4.5	8.2	2.6	10.5
БЭОФ 1.3 л/га + дикамба 2.0%	3.6	1.3	4.6	5.6	2.0	7.3
БЭОФ 1.3 л/га + агритокс 2.0%	4.1	2.2	5.8	7.6	3.3	10.4
БЭОФ 1.3 л/га + эстерон 4.0%	10.7	2.6	13.1	14.8	3.3	17.4
БЭОФ 1.3 л/га + дикамба 4.0%	7.8	3.3	10.6	11.5	4.0	14.9
БЭОФ 1.3 л/га + агритокс 4.0%	9.2	3.3	11.9	12.2	4.4	15.8
<i>HCP</i> ₀₅ , %	6.5	2.2	6.1	6.5	2.2	6.1

Примечания. 1. В графе 1 – урожайность, 2 – сахаристость, 3 – сбор сахара. 2. В контроле – абсолютные показатели продуктивности сахарной свеклы, в графе 1 – т/га, 2 – %, 3 – т/га.

сахарной свекле, наблюдали более сильное угнетение растений сахарной свеклы. Возрастала доля необратимых повреждений, от которых растения были не способны восстановиться. При этом уровень отрицательного действия остатков инородных гербицидов в смеси с БЭОФ на продуктивность сахарной свеклы заметно возрастал в сравнении с действием только инородных остатков в баке опрыскивателя после полной заправки емкости водой (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гербицид эстерон (в дозах 2–8% от нормы расхода на озимой пшенице – 0.8 л/га) у растений сахарной свеклы, поврежденных гербицидом в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, через 12 сут снижал нарастание массы на 10–51% и через 30 сут изреживал посев на 1.5–18% во влажных условиях произрастания. У растений, поврежденных в фазе 2-х пар настоящих листьев, эстерон снижал массу на 25–83% и густоту посева на 2–9% в сравнении с контролем.

В засушливых условиях погоды токсичность эстерона усиливалась до полной остановки роста растений при высоких (из испытуемых) дозах гербицида, а изреженность посева возрастала до 29% при повреждении гербицидом сахарной свеклы в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев и до 16% при повреждении в фазе 2-х пар настоящих листьев.

Во влажных условиях погоды эстерон в дозах 2% (от полной нормы расхода на озимой пшенице) повышал урожайность сахарной свеклы, обработанной гербицидом в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев, на 5–8% к контролю. При дальнейшем увеличении дозы гербицида урожайность корнеплодов снижалась на 11–22%. В засушливых условиях стимуляция урожайности сахарной свеклы под влиянием малых доз эстерона не отмечена. В этих условиях по мере возрастания дозы эстерона урожайность корнеплодов снижалась от 12 до 48%.

Токсичность эстерона для растений сахарной свеклы в фазе 2-х пар настоящих листьев заметно возрастала. С нарастанием дозы гербицида урожайность корнеплодов снижалась на 7–39% в условиях влажной погоды и на 18–67% — в условиях засушливой погоды.

Эстерон в дозах 4–8% от нормы расхода на озимой пшенице деформировал форму корнеплода у 18–53% растений сахарной свеклы. Корнеплод вытягивался в длину, нарушалось формирование сосудистых пучков. В засушливые годы повреждения у корнеплодов часто прогрессировали.

Гербициды гормоноподобного действия снижали урожайность сахарной свеклы в зависимости от токсичности препаратов в ряду: эстерон > агритокс > дикамба.

Эстерон и дикамба в дозах 3 и 6% от нормы применения на озимой пшенице снижали урожайность, сахаристость и расчетный сбор сахара в зависимости от погодных условий. Эстерон сни-

жал расчетный сбор сахара на 15.6 и 39.1%, дикамба — на 12.5 и 26.6% в засушливых условиях погоды. В условиях достаточной влаги и периодических осадков потери расчетного сбора сахара под действием эстерона составляли 8.5 и 19.1%, дикамбы — 5.4 и 13.8%.

Наличие остатков раствора эстерона или агритокса, или дикамбы в баке опрыскивателя при обработке посева сахарной свеклы БЭОФ 1.3 л/га увеличивало потери расчетного сбора сахара культуры. При повреждении растений сахарной свеклы в фазе семядолей—1-й пары настоящих листьев гербицидами гормоноподобного действия в дозе 2% (от применяемой на озимой пшенице) в смеси с БЭОФ потери расчетного сбора сахара составили 7.3–10.5% относительно контроля. Гербициды гормоноподобного действия в дозе 4% от применяемой на озимой пшенице при совместном внесении с БЭОФ увеличивали потери расчетного сбора сахара до 14.9–17.4% к контролю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высш. шк., 2006. 742 с.
2. Альберт Э. Избирательная токсичность. М.: Мир, 1971. 421 с.
3. Кошкин Е.И. Патофизиология сельскохозяйственных культур. М.: Проспект, 2016. 359 с.
4. Яковец О.Г. Фитофизиология стресса. Курс лекций. Минск: БГУ, 2009. 101 с.
5. Федтке К. Биохимия и физиология действия гербицидов. М.: Агропромиздат, 1985. 222 с.
6. Чкаников Д.И., Соколов М.С. Гербицидное действие 2,4-Д и других галоидфеноксикислот. М.: Наука, 1973. 216 с.
7. Баздырев Г.И., Зотов Л.И., Полин В.Д. Сорные растения и меры борьбы с ними в современном земледелии. М.: МСХА, 2004. 288 с.
8. Дворянkin Е.А. Методология оценки повреждений сахарной свеклы токсичными гербицидами, применяемыми на других культурах // Сахар. 2019. № 12. С. 32–35.

Productivity of Sugar Beet Damaged by Hormone-Like Herbicides in Sublethal and Thinning Doses

E. A. Dvoryankin

A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar
p. VNIISS 86, Ramon district, Voronezh region 396030, Russia
E-mail: dvoryankin149@gmail.com

In many year field experiments, there was investigated influence of hormone-like herbicide solutions' residual left in a sprayer tank after treatment of grain-crops on productivity of sugar beet being treated with Betanal Expert OF. It was shown that small doses of hormone-like herbicides considerably inhibited plant mass increasing and thinned sugar beet plant stand. Presence of Esteron, Dikamba and Agritoks impurities, when applying herbicides of Betanal group, increased the mixture toxicity of the crop plants 1.4–1.9-fold. Data on decrease of sugar beet productivity indices depending on a dose of the hormone-like herbicide residual in the solution with Betanal Expert OF are presented.

Key words: sugar beet, herbicides, phytotoxicity, environment factors, productivity.

УДК 631.416.4:631.445.24:631.82

МИГРАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ Al, Mn И Fe В МЕЛИОРИРОВАННЫХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ¹

© 2021 г. А. В. Литвинович^{1,*}, О. Ю. Павлова¹, А. В. Лаврищев², А. А. Белимов³¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия³ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии
196608 С.-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: a.v.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.04.2020 г.

После доработки 05.05.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В лабораторных опытах на колонках, проведенных на дерново-подзолистых почвах, мелиорируемых различными по размеру частицами доломита в научно обоснованной дозе ($1.0 H_r$) и конверсионным мелом (КМ) в заведомо завышенной дозе ($2.5 H_r$), изучен состав органо-минеральных комплексов (ОМК), мигрирующих из пахотного горизонта. Вне зависимости от количества и состава известкового материала, использованного в опытах, содержание углерода в ОМК менялось от 5.5 до 5.7%. Показатель оптической плотности ($E_{с}^{мг/мл}$) изменялся в диапазоне величин, характерных для фульвокислот (ФК) от 2.7 до 3.1. Усредненные основаниями ФК сохраняли способность оказывать разрушительное влияние на почвенные минералы, переводя в раствор значительное количество Al, Mn и Fe. Подзолаобразование в мелиорируемых почвах не прекращалось. По способности к миграции в составе ОМК, осаждаемых щелочью, изученные элементы в опыте с доломитовыми частицами выстраивались в следующий по убыванию ряд: $Mn > Al > Fe$, в опыте с КМ, примененном в заведомо завышенной дозе: $Al > Mn > Fe$. Количество мигрирующего марганца в опыте с доломитовыми частицами было в 15.8–32.1 раза больше, чем алюминия и в 7.7–8.0 раза больше, чем железа. В опыте с КМ количество мигрирующего алюминия превосходило содержание мигрирующих железа и марганца соответственно в 2.8 и 1.9 раза.

Ключевые слова: известкование почв, миграция, алюминий, марганец, железо, органо-минеральные комплексы, кислотный гидролиз минералов, подзолаобразование.

DOI: 10.31857/S0002188121010075

ВВЕДЕНИЕ

Водорастворимые органические вещества (ВОВ) — неотъемлемая часть почвы. ВОВ диагностируются в корневых выделениях растений, активно формируются при разложении корневых и пожнивных остатков, являются одной из форм превращения гумусовых веществ. В составе гумуса доля ВОВ меняется от 0.05 до 1% [1].

Экспериментально установлено, что ВОВ дерново-подзолистых почв представлены фульвокислотами (ФК) с различной молекулярной массой, веществами фенольной или полифенольной природы, низкомолекулярными органическими

кислотами, полисахаридами, аминокислотами [2]. На долю ФК приходится до 80% всех ВОВ [3].

Многочисленные данные литературы свидетельствуют о способности ВОВ образовывать с ионами алюминия, марганца и железа устойчивые соединения комплексной природы. Между кислотностью почв и мобилизацией алюминия и железа из кристаллической решетки минералов существует тесная корреляционная связь [4].

Образование устойчивых к разложению водорастворимых органо-минеральных соединений, наряду с систематическим промачиванием почвенной толщи атмосферными осадками, играет решающую роль в развитии элювиально-иллювиального профиля почв подзолистого типа. Глав-

¹ Анализ содержания элементов в осадках выполнен при поддержке Российского Научного Фонда (грант 19-16-00097).

ная роль в миграционных процессах, происходящих в подзолистых почвах, принадлежит соединениям фульвокислотной природы, которые активно участвуют в перемещении алюминия, марганца и железа в их профиле. Передвижение алюминия и железа в форме молекулярно-растворимых комплексных органо-минеральных соединений в работе [5] считали основной формой миграции при подзолообразовании.

В почвах подзолистого типа **ФК** представлены двумя большими группами: кислоторастворимой фракцией, переходящей в раствор разбавленной H_2SO_4 (или HCl) – фракция **1a (ФК-1a)** по И.В. Тюрину [6]. Другая фракция (**ФК-1**) непосредственно в кислотах не растворяется. Она переходит в раствор 0.1 н. $NaOH$ вместе с гуминовыми кислотами (**ГК**) и остается в кислотном фильтрате при осаждении **ГК**.

При избытке оснований в почвенном растворе и доведении последнего до щелочной реакции ($pH > 10$) в осадок выпадают **ОМК** с **ФК-1** [6, 7]. Показано, что масштаб миграции оснований Ca , Mg и Sr в составе **ОМК** мелиорируемой отсевом доломита дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы весьма значителен. Элювиальные потери зависели от размера частиц мелиоранта [8].

В исследованиях [9] за один год вынос углерода **ФК** из пахотного горизонта дерново-подзолистой почвы мощностью 13 см достигал 280–310 кг/га, а **ФК** прочно связывали до 51.4% внесенных катионов Ca в растворимые кальций-фульватные соединения, способные к миграции по профилю почвы.

Известкование оказывает длительное и всестороннее влияние на все компоненты почвы. Снижается уровень реакции, уменьшается содержание легкоподвижных форм алюминия, марганца и железа, увеличиваются запасы катионов кальция и магния [10–13].

С увеличением pH почвенного раствора за счет известкования растет и емкость катионного обмена (**ЕКО**) почвы. По мнению авторов работы [14], при доведении pH почвенных растворов до 6.0–7.0 в составе гумусовых кислот могут активизироваться все новые реактивные группы, которые до этого были блокированы внутренними химическими связями или не могли быть активированы при более низких величинах pH растворов. В опытах [12] при однократном внесении извести по 1 H_r за счет вовлечения в процессы обмена слабокислотных позиций **ОВ** почвы емкость катионного обмена возросла на 10–15%, при периодическом известковании по 1 H_r – на 23–29%. По данным авторов, в результате известкования **ЕКО** может возрастать до 48%.

Это создает возможность для взаимодействия “свободных” функциональных групп гумусовых кислот известкованных почв с другими типоморфными элементами. В лабораторном опыте [14] установлено, что после усреднения кальцием части функциональных групп **ФК** они способны принимать участие в разложении силикатных минералов и вступать во взаимодействие с железом и алюминием. Однако степень разложения силикатных минералов **ФК**, усредненных кальцием, по сравнению со “свободными” **ФК**, снижается в 5 раз.

Согласно [12], в известкованных почвах реально существуют не **ФК**, а их соли, у которых ≈85–90% кислых функциональных групп замещено щелочноземельными основаниями и другими металлами. Исследования, направленные на установление подвижности типоморфных элементов алюминия, марганца и железа в составе **ОМК** почв, известкованных нетрадиционными мелиорантами, нам неизвестны.

Цель работы – в лабораторных опытах на колонках установить масштабы миграции Al , Mn и Fe в составе **ОМК** дерново-подзолистых почв, мелиорированных отходами промышленного производства.

В задачи исследования входило: установить содержание углерода в **ОМК**, удаляемых при промывании известкованных почв, определить оптическую плотность растворов **ОМК**, выпадавших в осадок при доведении pH элюатов до 13 ед., провести ранжирование типоморфных элементов по их способности вступать в соединения с **ВОВ**, мигрирующих в мелиорируемых почвах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения поставленной цели были проведены 2 лабораторных опыта. Образцы для выполнения лабораторных опытов отбирали пробы почвы на делянках микрополевого опыта (опыт 1) и из сосудов вегетационного опыта (опыт 2).

Образцы мелиорированных почв высушивали, размалывали, просеивали через сито с отверстиями 1 мм и помещали в полиэтиленовые колонки диаметром 65 мм. Масса почвы в колонке 800 г. Высота почвенного слоя 18 см. Плотность набивки 1.0–1.1 г/см³. Повторность шестикратная. Почву в колонках насыщали деионизированной водой до первой капли просочившейся влаги. Далее проводили промывание, используя 400 мл воды. Фильтрат после промывания собирали в колбу.

В элюаты добавляли 0.1 н. $NaOH$, доводя pH до 13 ед. При достижении заданной величины pH в осадок выпадали бурые хлопья **ОМК**, которые от-

Таблица 1. Валовой химический состав почв, использованных в опыте, % на бескарбонатную и безгумусную навеску

Образец	Потеря при прокаливании	SiO ₂	R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO
Почва опыта 1	5.12	81.2	10.6	2.31	8.96	0.37	0.39	0.09	0.63	0.52
Почва опыта 2	6.15	81.1	9.3	1.19	7.97	0.44	0.47	0.11	0.51	1.50

деляли от надосадочной жидкости, высушивали и анализировали, устанавливая содержание $C_{орг}$, $E_c^{мг/мл}$ и наличие Al, Mn и Fe.

Образцы почвы для проведения опыта 1 отбирали на делянках микрополевого опыта спустя 1 год после известкования после уборки гороха (*Pisum sativum*). Опыт заложен в 2015 г. с целью установления мелиоративных свойств отсева доломита, используемого для дорожного строительства. Размер частиц доломита 5–7 и 7–10 мм. Методика проведения исследований подробно описана в работах [15–17]. Повторность четырехкратная. Схема опыта приведена в табл. 1. Доза применения мелиоранта рассчитана по гидролитической кислотности. В качестве варианта сравнения использовали доломитовую муку (ДМ), приготовленную из отсева, пропущенного сквозь сито с отверстиями 0.25 мм. Дополнительно в схему опыта включен вариант с естественной смесью частиц отсева (ЕСМ). Гранулометрический состав отсева приведен в работе [16]. В составе доломита содержание $CaCO_3$ – 46.1, $MgCO_3$ – 38.4%.

В опыте использовали дерново-подзолистую легкосуглинистую почву: pH_{KCl} 4.6, H_T – 4.9 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 2.18%. Содержание частиц <0.01 мм – 21.4%. Валовой химический состав почвы приведен в табл. 1.

В опыте 2 устанавливали состав ОМК, мигрирующих из кислой дерново-подзолистой супесчаной почвы, мелиорированной конверсионным мелом (КМ), в количестве, соответствующем 2.5 H_T . Содержание $CaCO_3$ в меле равно 90%. Образцы почвы отбирали из сосудов вегетационного опыта спустя 5 лет после мелиорации. Для проведения вегетационного опыта использовали кислую дерново-подзолистую почву: pH_{KCl} 4.1, H_T – 5.4 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 3.02%. Содержание частиц <0.01 мм – 18.6%. Валовой химический состав почвы приведен в табл. 1. Условия проведения эксперимента подробно описаны в работах [18–21].

Определение углерода в составе осадков проводили по методу Тюрина, основанном на окислении гумуса серно-хромовой смесью в соотношении 1 : 1. Оптическую плотность ОМК измеряли на ФЭК, предварительно растворяя осадок в

0.1 н. NaOH. Использовали методику Плотниковой–Пономаревой [22]. Длина волны 430 нм, толщина кюветы 1 см.

Содержание Al, Mn и Fe в осадках устанавливали с помощью эмиссионного спектрофотометра ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) по методике производителя. Для этого образцы измельчали и озоляли в смеси концентрированных HNO_3 и 38% H_2O_2 (1 : 1) при 70°C с использованием системы DigiBlock (LabTech, Италия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что известкование привело к снижению pH_{KCl} почвы в опыте 1 уже в год известкования (табл. 2). Максимальный эффект от применения был достигнут в вариантах опыта с использованием ДМ, естественной смеси фракций доломита и частиц размером 7–10 мм. Существенных различий величины pH_{KCl} в этих вариантах выявлено не было (pH_{KCl} установился на уровне 5.6–5.7 ед.). Почва в результате мелиорации перешла из категории “среднекислой” в категорию “близкой к нейтральной”. Эффект от использования частиц размером 5–7 мм был меньше (pH_{KCl} 5.3). Почва характеризовалась как “слабокислая”.

Считается установленным, что при равных дозах применения известкового материала мелиоративный эффект зависит от размера частиц [23]. Чем мельче гранулы и больше площадь поверхности соприкосновения их с почвой, тем мелиоративный эффект больше. Растворение крупных частиц происходит за счет контактного обмена их внешних слоев и почвы.

В наших исследованиях использование частиц доломита размером 7–10 мм в год применения оказалось эффективнее, чем фракции размером 5–7 мм. Вероятно, в данном случае решающую роль оказала различная степень выветрелости поверхности частиц размером 5–7 и 7–10 мм. Длительное нахождение в отвалах способствовало ослаблению кристаллизационных связей между молекулами доломита, расположенными на внешней поверхности частиц. Под действием климатических факторов поверхность частиц приобрела определенную рыхлость. При попадании в почву рыхлые внешние слои энергично рас-

Таблица 2. Состав органо-минеральных комплексов, вымываемых из мелиорируемых Umbric Albeluvisol Abruptic

Вариант	pH _{KCl}	C _{общ} , %	E _c ^{мг/мл}	Содержание металлов, мг/кг			
				Al	Fe	Mn	Сумма
Опыт 1 (мелиорант — доломитовая крошка)							
1. НРК (фон) + + Доломит (Д) < < 0.25 мм (1 H _г)	5.7 ± 0.1 b	5.60 ± 0.04 b	3.1 ± 0.3 a	1330 ± 40 b	167 ± 3 a	2640 ± 4 b	4140 ± 40 b
2. Ф _{ОН} + Д 5—7 мм (1 H _г)	5.3 ± 0.1 a	5.69 ± 0.01 c	2.7 ± 0.1 a	3970 ± 10 e	496 ± 3 d	18716 ± 95 e	2320 ± 90 a
3. Ф _{ОН} + Д 7—10 мм (1 H _г)	5.6 ± 0.1 b	5.59 ± 0.01 b	2.9 ± 0.1 a	3250 ± 10 d	424 ± 4 c	13635 ± 23 d	17400 ± 30 d
4. Ф _{ОН} + ЕСМ (1 H _г)	5.7 ± 0.1 b	5.51 ± 0.01 a	2.8 ± 0.1 a	1860 ± 4 c	359 ± 6 b	4356 ± 10 c	6580 ± 6 c
Опыт 2 (мелиорант — конверсионный мел)							
1. НРК (фон) + КМ (2.5 H _г)	6.3 ± 0.1 c	5.50 ± 0.02 a	3.0 ± 0.3 a	1690 ± 10 a	605 ± e	903 ± 7 a	3200 ± 30

Примечания. 1. Указаны средние величины и (±) – стандартные ошибки средних ($n = 3$). 2. Разные латинские буквы указывают на достоверные различия между вариантами по критерию наименьшей средней разницы (НСР) Фишера ($P < 0.01$).

творялись. Причем скорость взаимодействия частиц с почвой будет определяться степенью выветрелости, которая, вероятно, и обусловила различия в мелиоративном эффекте от применения частиц различного размера. Для более точного ответа на этот вопрос нужны микроморфологические исследования поверхности гранул.

В опыте 2 спустя 5 лет после известкования и помещения в колонки рН_{KCl} почвы был близок к нейтральному (рН_{KCl} 6.3). Следовательно, использованные в опытах отходы промышленности обладали значительным мелиоративным эффектом.

Содержание C_{орг}, мигрирующего в мелиорированной частицами доломита почве в составе ОМК (опыт 1), изменялось в зависимости от варианта опыта – от 5.5 до 5.7%. Размер частиц доломита не повлиял на миграционную подвижность C_{орг}. Отличия между вариантами опыта были недостоверными. В опыте с применением КМ количество C_{орг} в составе ОМК практически не отличалось от количества C_{орг} в составе ОМК опыта с доломитовой крошкой (C_{орг} = 5.5%). Таким образом, удаляемые при промывании ОМК содержали равное количество C_{орг}.

Физико-химический смысл показателя E_c^{мг/мл} (оптической плотности) можно определить как интенсивность окрашивания щелочного раствора органических веществ на единицу углерода. Чем более темную окраску имеет раствор, тем больше в нем содержится C_{орг}. При равной концентрации C_{орг} показатель E_c^{мг/мл} зависит от глубины гумификации (ароматизации) находящихся в растворе гумусовых веществ.

Установлено, что оптическая плотность ФК укладывалась в диапазон от 1 до 4 ед. [24]. В наших исследованиях величина E_c^{мг/мл} ОМК в опыте с частицами доломита менялась от 2.7 до 3.1 ед. В опыте с КМ E_c^{мг/мл} = 3. Это целиком соответствовало величине оптической плотности ФК. Таким образом, можно считать установленным, что ОМК, мигрирующие при промывании мелиорируемых почв и способные осаждаться при щелочной реакции, представлены ФК.

Доказано, что подвижность алюминия в почвах при химической мелиорации уменьшается вследствие осаждения алюминия в виде малоподвижного гидроксида алюминия. В опытах [12] известкование дозой извести, эквивалентной 1 H_r, привело к возрастанию рН_{KCl} до 5.5–5.6 и снижению содержания подвижного алюминия почти до нуля. В наших исследованиях при известковании доломитовыми частицами и доведении рН_{KCl} почвы опыта 1 до 5.3–5.7 ед. и рН_{KCl} 6.3 ед. При известковании КМ почвы опыта 2 алюминий активно перемещался в составе ОМК. Масштаб миграции в опыте 1 зависел от размера частиц. По количеству алюминия, удаляемого при миграции ОМК, все изученные варианты можно выстроить в следующий по убыванию ряд: частицы размером 5–7 мм > 7–10 мм > ЕСМ > частицы < 0.25 мм. По сравнению с вариантами, мелиорированными доломитовой крошкой размером 5–7 и 7–10 мм, применение тонко измельченного доломита (< 0.25 мм) снижало миграционную подвижность алюминия в 2.98 и 2.44 раза соответственно. При использовании доломитовой крошки без разделения на фракции

элювиальные потери алюминия по сравнению с вариантом, мелиорированным ДМ, возросли в 1.4 раза. Количество мигрирующего алюминия в составе ОМК опыта 2 с КМ было больше, чем в варианте с доломитовой мукой, и меньше, чем в варианте с ЕСМ в опыте 1. Следовательно, вне зависимости от вида мелиоранта, дозы его применения и тонины помола определенное количество кислых функциональных групп гумусовых кислот мелиорированных дерново-подзолистых почв остается не усредненной и способно связывать алюминий в составе ОМК.

Подзолистые и дерново-подзолистые почвы Северо-Запада России характеризуются очень большими валовыми запасами марганца. По данным [25], оно изменяется от 0.03 до 0.5% от массы почвы. В зависимости от гранулометрического состава, степени выветрелости минералов в легкоподвижные (доступные для растений формы) переходит от 0.1 до 1% валового содержания этого элемента. При кислой реакции подвижность марганца в почвах возрастает и происходит более интенсивное поглощение этого элемента растениями. В литературе встречаются многочисленные свидетельства об изменении содержания подвижных форм этого элемента под действием химической мелиорации почв [26, 27]. В отличие от алюминия максимальное снижение подвижности марганца отмечено при более высоких показателях pH_{KCl} 6.5–7.2 [12].

Из всех типоморфных элементов, изученных в наших опытах, количество марганца, мигрирующего в составе ОМК, было наибольшим. В зависимости от варианта опыта изменения составили от 2640 до 18700 мг/кг. Это в 1.98–4.71 раза больше количества алюминия, связанного в составе ОМК и удаляемого при промачивании мелиорируемой почвы в опыте 1. Количество мигрирующего марганца в опыте 2 было в 1.88 раза меньше, чем алюминия.

Минимальное количество марганца установлено в составе ОМК, мигрирующих в варианте с применением ДМ, максимальное – в варианте с применением частиц размером 5–7 мм. Разница составила 7.1 раза. Следовательно, тонина помола также оказывает существенное влияние на масштаб миграции марганца из почвы, мелиорируемой равными дозами доломита. При этом влияние степени измельчения доломита на количестве связанного в составе ОМК марганца сказывалось значительно сильнее, чем алюминия. По количеству мигрирующего марганца изученные варианты можно выстроить в следующий по убыванию ряд: частицы размером 5–7 мм > 7–10 мм > ЕСМ > частицы размером <0.25 мм. Выявленная картина с точностью повторила законо-

мерность, установленную при анализе данных о содержании мигрирующего в составе ОМК алюминия.

Верхние горизонты подзолистых и дерново-подзолистых почв Северо-Запада Нечерноземной зоны России содержат очень большое количество валового железа. Оно меняется от 0.7 до 5.0% и больше к массе почвы. В зависимости от минералогического состава, степень разрушенности почвенных минералов в легкоподвижные (доступные для растений формы) переходит от 0.01 до 1% общего содержания этого элемента [12].

Состояние железа в почвах изучено достаточно полно [27–30]. Подвижность железа возрастает от почв с щелочной реакцией к нейтральной и далее к кислым почвам. Известкование приводит к уменьшению концентрации подвижного железа в почвах. Максимальное снижение подвижности этого элемента отмечено при pH_{KCl} 6.5–7.2 [12].

Мигрирующие ОМК из всех изученных в наших опытах элементов содержали наименьшее количество железа. В зависимости от варианта опыта это количество было в 7.7–8.0 раза меньше, чем алюминия, и в 15.8–32.1 раза меньше, чем марганца. Тонина помола доломита также повлияла на масштаб миграции железа. В опыте 1 количество вымытого железа изменялось от 167 (вариант с ДМ), до 496 мг/кг (вариант с частицами размером 5–7 мм). Разница составила 2.97 раза.

По количеству удаляемого железа все изученные варианты выстраивались в следующий по убыванию ряд: частицы размером 5–7 мм > 7–10 мм > смесь фракций > частицы размером <0.25 мм, т.е. целиком повторяли закономерности, выявленные при анализе данных содержания Al и Mn, мигрирующих в составе ОМК.

Вне зависимости от варианта опыта 1 мигрирующие типоморфные элементы образовывали следующий по убыванию ряд: Mn > Al > Fe. В опыте 2 содержание вымытого в ОМК Al превосходило содержание Fe и Mn соответственно в 2.8 и 1.87 раза.

В работе [8] установлено, что ФК, мигрирующие в составе ОМК мелиорированных дерново-подзолистых почв, связывают большое количество Ca, Mg и Sr. Чем тонина помола доломита меньше, тем больше щелочноземельных металлов мигрировало в составе ОМК. В зависимости от варианта опыта (опыт 1 настоящего исследования) изменения их суммарного содержания составили от 191 до 319 г/кг осадка. Проведенное исследование показало, что усредненные основаниями ФК сохраняют “агрессивность” по отношению к почвенным минералам, переводя в раствор значительное количество Al, Mn и Fe. Чем больше размер частиц мелиоранта, меньше вы-

ветрелость поверхности их частиц и меньше оснований Са, Mg и Sr содержат ОМК, тем “агрессивность” ФК больше. Связь между общим количеством вымываемых Са, Mg и Sr в составе ОМК и суммой Al, Mn и Fe, мигрировавших в опыте 1, была слабая отрицательная: $r = -0.2$. При этом даже применение заведомо завышенной дозы КМ ($2.5 H_r$) и доведение pH_{KCl} почвы практически до нейтрального уровня (pH_{KCl} 6.3) не устраняло разрушения минералов.

Следовательно, процессы кислотного гидролиза (подзолообразования) в мелиорируемых почвах не прекращаются. Известкование не устраняет влияние природно-климатических факторов на процессы формирования гумуса. Образующиеся гумусовые кислоты остаются кислыми и даже после нейтрализации известковыми мелиорантами части функциональных групп оказывают разрушительное действие на почвенные минералы.

ВЫВОДЫ

1. Содержание углерода, мигрирующего в составе ОМК в дерново-подзолистых мелиорированных почвах, менялось от 5.5 до 5.7%. Показатели величины оптической плотности ОМК укладывались в диапазон, характерный для фульвокислот ($E_{\epsilon}^{mg/ml} = 2.7-3.1$).

2. Процессы кислотного гидролиза минералов в известкованных почвах не прекращаются. Суммарное количество вымываемых Al, Mn и Fe в составе ОМК зависело от размера частиц мелиоранта, выветрелости поверхности его частиц и содержания в ОМК щелочноземельных металлов. Связь между общим количеством вымываемых Са, Mg и Sr в составе ОМК и суммой Al, Mn и Fe, мигрировавших в опыте 1, была слабая отрицательная: $r = -0.2$. Изменения суммарного содержания типоморфных элементов в составе ОМК в различных вариантах опыта с доломитовыми частицами составили от 2320 до 13400 мг/кг. В опыте с КМ они были равны 3200 мг/кг.

3. Вне зависимости от варианта опыта с доломитовыми частицами мигрирующие типоморфные элементы образовывали следующий по убыванию ряд: $Mn > Al > Fe$. Содержание элювируемого марганца в 7.7–8.0 раза превосходило количество вымываемого алюминия и в 15.8–32.1 раза — количество мигрирующего железа. В опыте с КМ содержание вымытого алюминия в составе ОМК превосходило содержание Fe и Mn в 2.8–1.87 раза соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalbitz K., Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008. V. 171. № 1. P. 52–60.
2. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.П., Евсеева Р.М. О содержании и формах водорастворимых соединений алюминия в почвенных растворах // Почвоведение. 1969. № 9. С. 68–78.
3. Фокин А.Д., Аргунова В.А., Кауричев И.С., Яшин И.М. Состав органического вещества, состояние полуторных окислов и фосфатов в водах, дренирующих подзолистые почвы // Изв. ТСХА. 1973. Вып. 2. С. 99–105.
4. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.П. Условия образования и масштабы миграции органо-минеральных соединений в почвах таежно-лесной зоны // Изв. ТСХА. 1969. Вып. 3. С. 103–110.
5. Вильямс В.Р. Почвоведение. М.: Сельхозгиз, 1946. 459 с.
6. Тюрин И.В. К методике анализа для сравнительного изучения состава почвенного перегноя или гумуса // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева АН СССР. 1951. Т. 38. С. 5–21.
7. Пономарева В.В. О реакциях взаимодействия группы креновой и апокреновой кислот (фульвокислот) с гидроокисями оснований // Почвоведение. 1949. № 11. С. 638–651.
8. Павлова О.Ю., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Шевченко Е.Е., Салаев И.В., Белимов А.А. Изучение почвенных растворов, вымываемых из мелиорируемых дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2018. № 12. С. 69–76.
9. Яшин И.М. Взаимодействие гидроксида железа, препаратов гуминовых кислот и доломита с водорастворимыми органическими веществами подзолистых почв // Изв. ТСХА. 1991. Вып. 5. С. 46–61.
10. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Маслова А.И. Динамика почвенной кислотности и содержание подвижных форм соединений алюминия, марганца и железа в почвах при известковании конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 6. С. 23–27.
11. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // Агрохимия. 2010. № 10. С. 3–10.
12. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв. СПб., 2010. 254 с.
13. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Динамика содержания обменных катионов кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита (эмпирические модели процесса подкисления) // Агрохимия. 2018. № 3. С. 50–61.
14. Пономарева В.В., Рагим-Заде А.И. Сравнительное изучение фульвокислот и гуминовых кислот как агентов разложения силикатных минералов // Почвоведение. 1969. № 3. С. 26–36.
15. Салаев И.В., Литвинович А.В., Шевченко Е.Е. Влияние крупных фракций отсева щебеночного производства на содержание гумуса в дерново-подзолистой суглинистой почве, урожай и химический со-

- став растений гороха // *Агрофизика*. 2016. № 3. С. 7–14.
16. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Ковлева А.О. Мелиоративные свойства, удобрительная ценность и скорость растворения в почвах различных по размеру фракций отсева доломита, используемого для дорожного строительства // *Агрохимия*. 2016. № 2. С. 31–41.
 17. Litvinovich A.V., Salaev I.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M., Saljnikov E. Utilization of large-sized dolomite by-product particles and losses of cations from acidic soil // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2019. T. 50. № 7. С. 1–9.
 18. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2001. № 2. С. 74–78.
 19. Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // *Агрохимия*. № 4. 2002. С. 81–87.
 20. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Последствия применения конверсионного мела для мелиорации кислых почв: стронций в системе дерново-подзолистая почва–растение // *Почвоведение*. 2013. № 9. С. 1138–1150.
 21. Лаврищев А.В., Литвинович А.В. Стабильный стронций в агроэкосистемах. СПб.: Лань, 2019. 192 с.
 22. Плотникова Т.А., Пономарева В.В. Упрощенный вариант метода определения оптической плотности гумусовых веществ с одним светофильтром // *Почвоведение*. 1967. № 7. С. 73–85.
 23. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия мелиорантов в почвах и эффективность известкования // *Агрохимия*. 2012. № 10. С. 79–94.
 24. Бакина Л.Г. Роль фракций гумусовых веществ в почвенно-экологических процессах: Дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2012. 381 с.
 25. Пестряков В.К. Окультуривание почв Северо-Запада. Л.: Колос, 1977. 273 с.
 26. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В. Динамика содержания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита // *Агрохимия*. 2018. № 8. С. 52–63.
 27. Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю. Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2015. № 5. С. 61–68.
 28. Зонн С.В. Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 207 с.
 29. Водяницкий Ю.Н. Химия и минералогия почвенного железа. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 238 с.
 30. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Изучение динамики изменения содержания подвижного железа в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой доломитом // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 44–53.

Migration Mobility of Al, Mn and Fe in Reclaimed Sod-Podzolic Soils

A. V. Litvinovich^{a, #}, O. Yu. Pavlova^a, A. V. Lavrishchev^b, and A. A. Belimov^c

^aAgrophysical Research Institute
Grazhdansky prosp., 14, St. Petersburg 195220, Russia

^bSankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg—Pushkin 196601, Russia

^cThe Russian Research Institute of Agricultural Microbiology
shosse Podbelsky 3, St. Petersburg—Pushkin 196608, Russia

[#]E-mail: a.v.lavrishchev@yandex.ru

The composition of organo-mineral complexes (OMC) migrating from the arable horizon was studied in laboratory experiments on columns conducted on sod-podzolic soils reclaimed by different-sized dolomite particles at a scientifically justified dose (1.0 H_a) and conversion chalk (CC) at a deliberately inflated dose (2.5 H_a). Regardless of the amount and composition of the lime material used in the experiments, the carbon content in the OMC varied from 5.5 to 5.7%. The optical density index ($E^{cmg/ml}$) varied in the range of values typical for fulvic acids (FC) from 2.7 to 3.1. The FC averaged by the bases retained the ability to have a destructive effect on soil minerals, transferring a significant amount of Al, Mn, and Fe to the solution. Podzol formation in reclaimed soils did not stop. According to the ability to migrate in the composition of OMC deposited with alkali, the studied elements in the experiment with dolomite particles were arranged in the following descending order: Mn > Al > Fe, in the experiment with CC, used in a deliberately inflated dose: Al > Mn > Fe. The amount of migrating manganese in the experiment with dolomite particles was 15.8–32.1 times more than aluminum and 7.7–8.0 times more than iron. In the experiment with CC, the amount of migrating aluminum exceeded the content of migrating iron and manganese by 2.8 and 1.9 times, respectively.

Key words: soil liming, migration of aluminum, manganese and iron, organo-mineral complexes, acid hydrolysis of minerals, podzol formation.

УДК 632.4:631.51(470.45)

ДИНАМИКА ДОМИНИРУЮЩИХ ФАКУЛЬТАТИВНЫХ ПАРАЗИТОВ ГРИБНОЙ ПРИРОДЫ В ПОЛЕВЫХ АГРОЦЕНОЗАХ С МИНИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОЧВЫ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2021 г. Н. И. Будынков^{1,*}, С. Н. Михалева¹, А. В. Проскурин²

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

² ООО «ИНБИОЛАБ.АГРО»
115035 Москва, 1-й Кадашевский п., 11/5, стр. 1, офис 4, Россия

*E-mail: oranzar@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.02.2020 г.

После доработки 21.05.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В период 2017–2019 гг., когда происходило внедрение на полях технологических схем контроля болезней озимой пшеницы после различных предшественников, основанных на мониторинге опасных микроорганизмов и последующих рекомендациях применения эффективных фунгицидов и биопрепаратов, после предшественника яровой пшеницы было отмечено снижение уровня колонизации растений сильными патогенами в фазе кушения в 3.1 раза, растительных остатков — в 4.7 раза. Было достаточно 10%-ной колонизации растительных остатков яровой пшеницы сильными патогенами, как источника инфекции, для 22.3%-ной колонизации растений последующей культуры. После предшественника нута с 2018 по 2019 г. отмечено снижение уровня колонизации озимой пшеницы патогенами этой группы в 3.9 раза, растительных остатков — с 39.4% до практически нулевой колонизации. Очевидно, нут может быть хорошим предшественником озимой пшеницы только при условии надежного контроля факультативных паразитов грибной природы в полевых агроценозах. После предшественника горчицы на семена показатель колонизации растений пшеницы с 2018 по 2019 г. снизился в 3.6 раза, колонизация растительных остатков с 42.0% — до нулевой. После всех предшественников в годы проведения исследования выявлен сезонный рост колонизации узла кушения опасными патогенами. Кроме этого, в фазе выметывания флаг-листа на пшенице после черного пара отмечена значительная колонизация стебля сильными патогенами. В посевах озимой пшеницы после залежи, нута, горчицы, где происходило применение биопрепаратов как на растениях, так и на растительных остатках, эффективность защитно-профилактических мероприятий оказалась очень высокой (3.6–7.0-кратной). В посевах пшеницы после черного пара растительные остатки практических отсутствовали, как и соответствующая инфекция, поэтому совмещенные химико-биологические обработки дали очень высокий (8.9-кратный) эффект. В посеве озимой пшеницы после химического пара, примененного в поле яровой пшеницы, растительные остатки после гербицидной обработки оставались мощным накопителем и источником опасной инфекции, поэтому химико-биологическая обработка в кушение обеспечила лишь 1.4-кратный эффект снижения встречаемости сильных патогенов. Это свидетельствовало о высоком уровне опасности для посевов инфекции факультативных паразитических грибов, развивающихся на растительных остатках культур-предшественников, а также о необходимости своевременного проведения микробиологической санации растительных остатков с помощью эффективных биопрепаратов.

Ключевые слова: озимая пшеница, культура-предшественник, доминирующие факультативные паразиты грибной природы, колонизация, сильные патогены, слабые патогены, возбудители болезней, севооборот, агроценоз.

DOI: 10.31857/S0002188121010038

ВВЕДЕНИЕ

Болезни зерновых культур являются существенным фактором снижения урожайности пшеницы, ячменя, кукурузы на юге России, значительного ухудшения качества продукции — зерна продоволь-

ственного, семенного, фуражного. По этой причине контроль болезней зерновых культур должен быть одним из важнейшим звеньев растениеводства.

Значительная часть полей России в данный момент переведена на беспашотные технологии

возделывания сельскохозяйственных культур. Это было связано с эрозией почв и сносом плодородного слоя, массового появления в стране новой импортной техники для беспашотного земледелия, а также с вопросами экономики. Однако ожидаемые преимущества минимализированных технологий выращивания полевых культур в сравнении с традиционными — пахотными оказались далеко не всегда реальными.

Незапаханная в почву масса растительных остатков стала субстратом для размножения и накопления в агроценозах возбудителей болезней и токсикозов растений — факультативных паразитов грибной природы [1]. На неперепаханных полях активизировались возбудители листовых пятнистостей, корневых и прикорневых гнилей, сосудистых заболеваний. Их накопление приводило к снижению урожая и качества получаемой продукции, деградации агроценозов [1, 2]. Обусловленное перечисленным стрессовое состояние растений делает их восприимчивыми ко многим патогенам, и любые просчеты в контроле болезней оборачиваются серьезным ущербом. В хозяйствах со значительной долей кукурузы в севообороте стало проблемой эпифитотийное развитие пузырчатой головни, хламидоспоры которой разлетаясь на несколько километров при обмолоте зерна, оседают на почве, растительных остатках, сохраняя в течение нескольких лет жизнеспособность, особенно если растительные остатки не заделывают в почву, создают высокий эпифитотийный потенциал. Размножающаяся на растительных остатках кукурузы сумчатая стадия гриба *Gibberella zae* (Schwein.) Petch 1936 в 2014, 2016, 2017 гг. становилась источником эпифитотий фузариоза колоса озимой пшеницы, вызываемой конидиальной стадией гриба *Fusarium graminearum* Schwabe, 1839, на Северном Кавказе, сопровождающихся значительным недобором урожая, накоплением в зерне микотоксина дезоксиниваленола.

На беспашотных полях с середины 1990-х гг. возникли масштабные проблемы с фитофагами, переносчиками возбудителей болезней и, как следствие — периодические очаговые вспышки вирусных болезней. Наиболее вредоносные эпифитотии вирусных болезней озимой пшеницы охватили в 2019 г. Краснодарский и Ставропольский края, Ростовскую и Волгоградскую обл.

Как показывает практика, для полноценного контроля болезней необходим мониторинг сезонной динамики доминирующих (в основном патогенных) микроорганизмов сельскохозяйственных культур, изучение влияния культур предшественников на количественный и качественный состав

микробиоты звеньев севооборота, подбор адекватных химических и биологических препаратов для защиты растений и профилактики заболеваний. Идентификация доминирующих патогенов должна быть основой системы контроля болезней сельскохозяйственных культур, формирования комплекса защитно-профилактических мероприятий, с применением соответствующих видовому составу патогенной микрофлоры фунгицидов, биопрепаратов, агрохимикатов [3].

Цель работы — мониторинг качественного и количественного состава доминирующих возбудителей болезней в полевых образцах озимой пшеницы в различные периоды вегетации для оценки органо-тропной локализации опасных микроорганизмов, их сезонной динамики, влияния на эту динамику культур-предшественников, выработка потенциальных направлений контроля негативных последствий жизнедеятельности патогенов и токсикантов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на образцах, взятых на производственных полях озимой пшеницы хозяйств Волгоградской обл. в лаборатории ВНИИФ в 2017–2019 гг. Выращивание культур на опытных полях производили по технологиям на основе прямого посева. Контроль болезней озимой пшеницы с 2017 г. осуществляли на основе мониторинга патогенной микробиоты, применения в соответствии с его результатами эффективных химических и биологических средств защиты растений, а также микробиологической санации растительных остатков с помощью биопрепаратов. Ассортимент фунгицидов, рекомендованных для защиты от болезней озимой пшеницы, включал однокомпонентные препараты на основе бензимидазолов — кредо, СК, феразим, КС, казим, КС, топсин М, КС; на основе триазолов — импакт, КС, рекс С, КС, колоссаль, КС, фоликур, КЭ и др.; многокомпонентные — прозаро, КЭ, солигор, КЭ, амистар Трио, КЭ, альто Супер, КЭ, абакус Ультра, СЭ, осирис, КЭ, титул Дуо, ККР и др. В качестве биопрепарата для обработки вегетирующих растений, семян и растительных остатков применяли бактериальное удобрение ИНБИО-ФИТ — полиродовой бактериальный консорциум видов *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Lactobacillus*, *Bacillus*, продуцируемые ими биологически активные вещества с добавлением гуматов, экстракта биогумуса и др.

Образцы растений и растительных остатков отбирали в полевых условиях в различные периоды вегетации, а также при заболеваниях. Микробиологические анализы в условиях лаборатории

ВНИИФ проводили по методике с использованием искусственной питательной среды Чапека [3]. На питательную среду закладывали без дезинфекции фрагменты растений, растительных остатков с целью учета их колонизации микроорганизмами грибной природы [1, 4].

Анализ видового состава микробиоты, колонизирующей эксплантаты, проводили на 7-е сут инкубации. Видовую принадлежность образующихся на питательной среде колоний микромицетов определяли по форме органов споруляции (конидиеносцев, конидий, асков, спор и др.) под микроскопом.

При анализе образцов озимой пшеницы оценивали встречаемость видов микромицетов на различных частях растений, а также в растительных остатках. В данной статье приведены данные микромицетной колонизации узла кушения и стебля вегетирующих растений.

Проводили подсчет количества колоний микроорганизмов разных видов, выделенных *in vitro*, далее вычисляли долю (в %) каждого вида выделенного микроорганизма относительно числа нанесений растительных объектов (в данном случае фрагментов растений, растительных остатков) на питательную среду; проводили также подсчет доли растений с колонизацией тем или иным микроорганизмом.

Микромицеты *Fusarium moniliforme*, *F. culmorum*, *F. cerealis*, *Bipolaris sorokiniana* относили к группе сильных патогенов в связи с их высокой вредоносностью на пшенице; к этой группе можно отнести также *F. pseudograminearum* [5], который встречается в восточных регионах России. Виды *F. solani*, *F. semitectum*, *F. oxysporum* отнесли к группе слабых патогенов пшеницы [6, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лабораторная оценка встречаемости грибных патогенов на вегетирующих растениях озимой пшеницы в период активного весеннего кушения в хозяйствах Волгоградской обл. в 2017–2019 гг. показала следующее (табл. 1). После предшественника яровой пшеницы в 2017 г. в фазе весеннего кушения была отмечена колонизация 31.6% растений озимой пшеницы сильными (в основном грибом *Fusarium moniliforme*) и 16.6% — слабыми патогенами. К весне 2018 г., после начала использования элементов системы контроля болезней, доля колонизированных сильными патогенами растений пшеницы в данном звене снизилась до 22.3%, колонизированных слабыми патогенами — несколько увеличилась (до 21.0%).

Комплекс контролирующих мероприятий, направленных на подавление сильных патогенов, к весне 2019 г. обусловил снижение доли колонизи-

рованных ими растений до 10.1%; при этом встречаемость слабых патогенов достигла в этот период 20.3%. В сравнении с 2017–2018 гг. на полях с предшественником яровой пшеницы к 2019 г. произошло 3.1-кратное снижение уровня колонизации озимой пшеницы сильными патогенами. Подобные результаты уровня колонизации растений озимой пшеницы сильными и слабыми патогенами были получены ранее [6, 7] в Курской, Волгоградской обл. и Ставропольском крае.

Наблюдала также стабильное снижение накопления сильных патогенов на растительных остатках (одного из главных источников опасных инфекций полевых культур): с 32% в 2017 г. до 6.7% — в 2019 г. Встречаемость слабых патогенов и на растениях, и на растительных остатках в звене яровая пшеница — озимая пшеница была в зависимости от года неоднозначной, выявить закономерности изменения их численности пока не удалось. Следует отметить также, что в 2017 г. между встречаемостью сильных патогенов на растительных остатках и на растениях во время весеннего кушения различия были незначительными, а для 22.3%-ной колонизации посевов озимой пшеницы сильными патогенами в 2018 г. оказалось достаточно 10%-ной колонизации растительных остатков предшественника яровой пшеницы. Это свидетельствовало о высоком инфекционном потенциале растительных остатков для звеньев с родственными культурами в севообороте.

В мониторинговых хозяйствах в течение 2017–2019 гг. происходило увеличение площадей под озимой пшеницей и ее бессменного посева, что было не самым благоприятным вариантом чередования культур в севообороте, поэтому данные мониторинга грибных инфекций получили на опытных полях только в 2019 г., после комплекса контролирующих мероприятий. Частота встречаемости сильных патогенов на узле кушения весной составила в этом случае 14.0% — это было больше, чем после яровой пшеницы в этом же году; встречаемость слабых патогенов составила в данном звене 17.0%. Частота встречаемости сильных патогенов на растительных остатках достигала 6.9, слабых — 14.2%.

После предшественника нута в 2018 г. в фазе весеннего кушения была отмечена колонизация 43% растений озимой пшеницы сильными патогенами, что было значительно больше, чем в это же время после предшественников яровой пшеницы и химического пара, и 20% растений — слабыми патогенами. В 2019 г. этот показатель для сильных патогенов снизился в 3.9 раза, для слабых — возрос в 1.3 раза. На растительных остатках нута за счет биопрепаратной санации биопрепаратами удалось снизить уровень колонизации сильными патогенами с 39.4% в 2018 г. до практи-

Таблица 1. Встречаемость грибных патогенов на вегетирующих растениях озимой пшеницы и растительных остатках (Волгоградская обл., апрель 2017–2019 гг.)

Предшественник	Год	Тип патогенов	Частота встречаемости патогенов, %	
			на растительных остатках предшественника	на узле кущения растений пшеницы
Яровая пшеница	2017	Сильный	32.0	31.6
		Слабый	11.0	16.6
	2018	Сильный	10.0	22.3
		Слабый	5.0	21.0
	2019	Сильный	6.7	10.1
		Слабый	13.4	20.3
Озимая пшеница	2019	Сильный	6.9	14.0
		Слабый	14.2	17.0
Нут	2018	Сильный	39.4	43.0
		Слабый	21.1	20.0
	2019	Сильный	0.0	11.0
		Слабый	49.0	27.0
Горчица на семена	2018	Сильный	42.0	58.0
		Слабый	10.0	0.0
	2019	Сильный	0.0	16.0
		Слабый	21.0	7.0
Химический пар в посеве яровой пшеницы	2018	Сильный	28.8	19.0
		Слабый	10.9	23.0

чески нулевого в 2019 г.; уровень их колонизации слабыми патогенами в это время возрос в 2.3 раза, что для растений пшеницы с полноценным иммунитетом было не опасным. Нут по сложившейся традиции считается хорошим предшественником для зерновых культур [8]. Представленные результаты показали, что при прямом посеве культур это было не всегда так: в контрольном варианте отмечен очень высокий уровень колонизации растений озимой пшеницы и растительных остатков нута опасными факультативными паразитами. С помощью комплексного химико-биологического контроля этот уровень удалось уменьшить до достаточно низких показателей. То есть, чтобы нут был хорошим предшественником при прямом посеве, необходим комплекс защитно-профилактических мероприятий с постоянным мониторингом патогенной микробиоты как в посеве нута, так и на последующих культурах, и адекватным применением средств защиты от болезней растений и для их профилактики.

После предшественника горчицы в 2018 г. на озимой пшенице в период весеннего кущения отмечена 58%-ная колонизация растений сильными патогенами при практическом отсутствии слабых патогенов. К 2019 г. данный показатель для сильных патогенов снизился в 3.6 раза, колониза-

ция слабыми патогенами была невысокой – 7.0%. На растительных остатках (горчицы и сохранившихся на полях остатков культур предшествующих лет) колонизация пшеницы сильными патогенами была в 2018 г. также высокой – 42%, слабыми патогенами – 10%. К 2019 г. после микробиологической санации сильные патогены перестали выявляться на растительных остатках, уровень колонизации слабыми составил 21.0%. Горчица считается одним из лучших культур-предшественников для большинства сельскохозяйственных растений, культурой-фитосанитаром. В то же время отмечены микробиологические результаты, сильно противоречащие данному мнению. Горчицу из предшествующего звена севооборота высевали не как сидерат, а как культуру для получения семян; после цветения растения всех культур начинают терять иммунитет и активнее колонизироваться факультативными паразитами, что в этом случае и было отмечено. Кроме того, горчицу высевали, судя по многолетним наблюдениям, на полях, где течение болезней всех культур было малоуправляемым по причине накопления за несколько лет очень большого количества опасной инфекции.

Если предшественником озимой пшеницы был химический пар в посеве яровой пшеницы,

Таблица 2. Встречаемость грибных патогенов на узле кушения вегетирующих растений озимой пшеницы в фазах весеннего кушения и флагового листа (Волгоградская обл., апрель—июнь 2017–2018 гг.)

Предшественник	Год	Тип патогенов	Частота встречаемости патогенов на узле кушения, %	
			апрель	июнь
Черный пар	2017	Сильный	31.6	43.2
		Слабый	16.6	28.1
	2018	Сильный	22.3	52.3
		Слабый	21.0	13.0
Химический пар в посеве яровой пшеницы	2018	Сильный	28.8	58.5
		Слабый	10.9	10.0
Нут	2018	Сильный	39.4	49.0
		Слабый	21.1	40.8

то по причине их генетического родства и общности колонизирующей сапротрофной и патогенной микробиоты, следовало ожидать высокого уровня колонизации и растений, и растительных остатков общими сильными патогенами. Показано, что 19%-ный уровень колонизации озимой пшеницы после химического пара в посеве яровой пшеницы был самым негативным в 2019 г. на фоне всех рассмотренных предшественников. Колонизация растительных остатков также оказалась высокой — 28.8%. Очевидно, что сразу после уборки урожая культуры необходимо незамедлительное проведение фитосанитарных мероприятий, препятствующих накоплению инфекции на растительных остатках, не дожидаясь накопления опасных микроорганизмов. Количество слабых патогенов в варианте химического пара мало отличалось от более благополучных вариантов.

Приведенные результаты показали, что при выращивании озимой пшеницы после таких предшественников как яровая пшеница, озимая пшеница, нут, горчица при прямом посеве в агроценозах происходило накопление опасной инфекции, сопровождавшееся колонизацией значительной доли выращиваемых растений; эффективность против накопления опасной микробиоты проявил, судя по результатам 2017–2019 гг., комплекс защитно-профилактических мероприятий с использованием химических и биологических средств защиты растений на основе многократного мониторинга опасных микроорганизмов.

Развитие как сапротрофов, эпифитных микроорганизмов, так и факультативных паразитов на растениях пшеницы продолжается в течение всей вегетации. Оно проявляется увеличением как количества колонизируемых растений, так и интенсивности их колонизации [10]. Химические обработки позволяют замедлить этот процесс, но получить в фазе выхода флаг-листа меньший уро-

вень колонизации узла кушения, чем во время весеннего кушения, практически никогда не удастся. Оценки уровня колонизации узла кушения озимой пшеницы после паров и нута в фазах весеннего кушения и выхода флаг-листа приведены в табл. 2.

На озимой пшенице опытных полей после черного пара в 2017 г. с апреля по июнь произошло увеличение доли растений, колонизированных сильными патогенами в 1.4 раза, слабыми патогенами — в 1.7 раза. В 2018 г. колонизация пшеницы сильными патогенами возросла в 2.3 раза, слабыми патогенами — снизилась в 1.6 раза. Таким образом, черный пар как самостоятельный фитосанитарный элемент не обеспечил в условиях прямого посева супрессивного подавления высокопатогенных для озимой пшеницы форм возбудителей сосудистых заболеваний ни в 2017, ни в 2018 г.

В звене севооборота озимая пшеница после химического пара в 2018 г. от весеннего кушения до выметывания флаг-листа произошло двукратное увеличение числа растений пшеницы, колонизированных сильными патогенами; заметных изменений уровня колонизации слабыми патогенами за этот период не отмечено. В звене севооборота озимая пшеница после нута в 2018 г. от весеннего кушения до выметывания флаг-листа произошло увеличение уровня колонизации пшеницы опасными патогенами в 1.2 раза, слабыми патогенами — в 1.9 раза.

В фазе выметывания флаг-листа на полях озимой пшеницы после 3-х перечисленных предшественников частота колонизации посевов сильными патогенами находилась в диапазоне 43.2–58.5%. Однозначной была во всех представленных вариантах необходимость проведения в течение периода налива зерна защитных мероприятий не только против листовых болезней, но и

Таблица 3. Встречаемость грибных патогенов на узле кушения и в стебле вегетирующих растений озимой пшеницы в фазах весеннего кушения и флагового листа (Волгоградская обл., апрель—июнь 2017–2018 гг.)

Предшественник	Год	Тип патогена	Частота встречаемости патогенов, %	
			на узле кушения	в стебле
Черный пар	2017	Сильный	43.2	15.0
		Слабый	28.1	10.9
	2018	Сильный	52.3	2.5
		Слабый	13.0	2.5
Химический пар в посеве яровой пшеницы	2018	Сильный	28.8	0.0
		Слабый	10.9	0.0
Нут	2018	Сильный	39.4	0.0
		Слабый	21.1	0.0

против факультативных паразитов грибной природы, не ограничиваясь в защите от них бензимидазольной обработкой в фазе кушения. Полевая микробиологическая оценка уровня колонизации факультативными паразитами позволила выявлять поля, на которых необходима защита от комплексов листовых и сосудистых заболеваний. На остальных полях комплексную фунгицидную обработку проводить не следовало, чтобы не наносить их агроценозам экологического ущерба без необходимости.

Развитие патогенной микробиоты вегетирующих растений отмечено не только на узле кушения, образованном в осенний период, но и в стебле (соломине), формирование которой визуальное наблюдали (без вскрытия) после фазы трубкования в весенне-летний период (табл. 3).

На это обращали внимание в работе [9]. Сильных патогенов на момент появления флаг-листа, на узле кушения озимой пшеницы обычно было больше, чем в стебле, хотя и в стебле их встречаемость в условиях региона проводимых исследований нередко вызывает опасения. Например, в 2017 г. на полях после черного пара отмечали 15%-ную колонизацию стеблей озимой пшеницы сильными патогенами: за почти полуторамесячный период налива зерна при применении некорневых азотных подкормок вегетирующих растений этот показатель заметно возрастал, обуславливая снижение качества зерна, заражение его микотоксинами. В 2018 г. уровень патогенной колонизации оказался в том же звене севооборота на уровне 2.5%. На полях после химического пара и нута ни сильных, ни слабых патогенов в период выбрасывания флаг-листа в стеблях пшеницы выявлено не было, что было гораздо лучше, чем после черного пара в 2017 г. На рис. 1 приведены результаты сравнительного анализа колонизации

сильными патогенами в фазе кушения озимой пшеницы после различных предшественников.

Во всех вариантах за счет использования системы контроля факультативных паразитов озимой пшеницы на основе мониторинга патогенной микробиоты, применения в соответствии с этим эффективных химических и биологических средств защиты растений, а также микробиологической санации растительных остатков с помощью биопрепаратов отмечено заметное снижение уровня колонизации растений опасными микроорганизмами. Снижение данного показателя на пшенице после черного пара было 8.9-кратным, после залежи — 7-кратным, после нута — 3.9-кратным, после горчицы — 3.6-кратным, после химического пара — 1.4-кратным. После черного пара, залежи, нута и горчицы эффективность примененных мероприятий оказалась высокой, после химического пара она была значительно меньше.

На полях озимой пшеницы после залежи, нута, горчицы, где применяли биопрепараты как на растениях, так и на растительных остатках, эффективность защитно-профилактических мероприятий оказалась очень высокой (3.6–7.0-кратной). На полях пшеницы после черного пара растительные остатки практически отсутствовали, как и соответствующая инфекция, поэтому совмещенная химико-биологическая обработка дала в этом случае очень высокий (8.9-кратный) эффект. На поле озимой пшеницы после химического пара в посеве яровой пшеницы растительные остатки после гербицидной обработки оставались мощным накопителем и источником опасной инфекции, поэтому химико-биологическая обработка в фазе кушения обеспечила лишь 1.4-кратный эффект снижения встречаемости сильных патогенов. Это свидетельствовало о высоком уровне опасности для посевов инфекции факультативных паразитических грибов, разви-

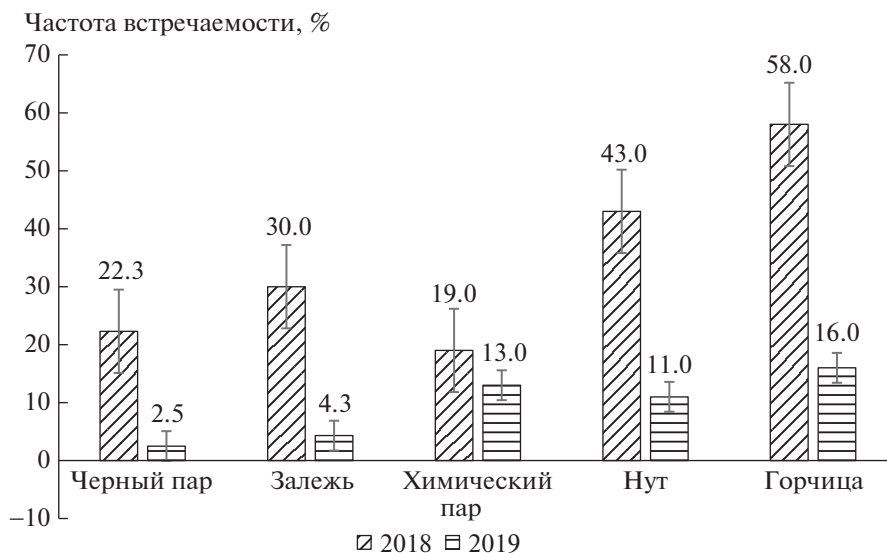


Рис. 1. Встречаемость сильных грибных патогенов на узле кушения озимой пшеницы в фазе весеннего кушения (Волгоградская обл., 2018–2019 гг.).

вающихся на растительных остатках культур-предшественников, а также о необходимости своевременного проведения микробиологической санации растительных остатков с помощью эффективных биопрепаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За период 2017–2019 гг., когда происходило внедрение на полях технологических схем контроля болезней озимой пшеницы после различных предшественников, основанных на мониторинге опасных микроорганизмов и последующих рекомендациях применения эффективных фунгицидов и биопрепаратов, было отмечено после предшественника яровой пшеницы снижение уровня колонизации растений сильными патогенами в фазе кушения в 3.1 раза, растительных остатков — в 4.7 раза. 10%-ной колонизации растительных остатков яровой пшеницы сильными патогенами, как источника инфекции, оказалось достаточно для 22.3%-ной колонизации растений последующей культуры. После предшественника нута с 2018 по 2019 г. отмечено снижение уровня колонизации озимой пшеницы в 3.9 раза, растительных остатков — с 39.4% до практически нулевых показателей. Очевидно, нут может быть хорошим предшественником озимой пшеницы только при условии надежного контроля в полевых агроценозах факультативных паразитов грибной природы. После предшественника горчицы на семена показатель колонизации растений озимой пшеницы с 2018 по 2019 г. снизился в 3.6 раза,

уровень колонизации растительных остатков — с 42.0% до нуля.

После всех предшественников в годы проведения исследования наблюдали сезонный рост колонизации узла кушения опасными патогенами. Кроме того, в фазе выметывания флаг-листа на пшенице после черного пара отмечена значительная колонизация стебля сильными патогенами.

На полях озимой пшеницы после залежи, нута, горчицы, где происходило применение биопрепаратов как на растениях, так и на растительных остатках, эффективность защитно-профилактических мероприятий оказалась очень высокой (3.6–7.0-кратной). На полях пшеницы после черного пара растительные остатки практически отсутствовали, как и соответствующая инфекция, поэтому совмещенная химико-биологическая обработка дала в этом случае очень высокий (8.9-кратный) эффект. На поле озимой пшеницы после химического пара в посеве яровой пшеницы растительные остатки после гербицидной обработки оставались мощным накопителем и источником опасной инфекции, поэтому химико-биологическая обработка в кушение обеспечила лишь 1.4-кратный эффект снижения встречаемости сильных патогенов. Это свидетельствовало о высоком уровне опасности для посевов инфекции факультативных паразитических грибов, развивающихся на растительных остатках культур-предшественников, а также о необходимости своевременного проведения микробиологической санации растительных остатков с помощью эффективных биопрепаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будынков Н.И., Михалева С.Н., Проскурин А.В. Микробиологическая деградация агроценозов и возможность ее предотвращения. Растительные остатки // Эволюция и деградация почвенного покрова. Сб. научн. статей по мат-лам V Международ. научн. конф. 19–22 сентября 2017 г. Ставрополь ГАУ. Ставрополь, 2017. С. 10–13.
2. Kotasthane S.R., Khare M.N., Gupta O. Surveying *Fusarium* of chickpea in Madhya Pradesh // India. Inter. Chickpea Newslet. 1987. V. 17. P. 21–23.
3. Будынков Н.И., Михалева С.Н. Возбудители болезней нута на полях Черноземной зоны и Нижнего Поволжья // Агрохимия. 2019. № 11. С. 63–71.
4. Наумова Н.А. Анализ семян на грибную и бактериальную инфекцию. М., 1951. 140 с.
5. Tunali B., Obanor F., Erginbas G., Westcott R.A., Nicol J., Chakraborty S. Fitness of three *Fusarium* pathogens of wheat // FEMS Microbiol. Ecol. V. 81. P. 596–609.
6. Будынков Н.И., Михалева С.Н. Динамика факультативных паразитов грибной природы в растениях озимой пшеницы хозяйств Курской области и Ставропольского края // Защита зерновых культур от болезней, вредителей и сорняков: достижения и проблемы. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Большие Вяземы Московской обл., ВНИИФ, 5–9 декабря 2016 г. Большие Вяземы. 2016. С. 57–66.
7. Будынков Н.И., Михалева С.Н. Факультативные паразиты — возбудители болезней озимой пшеницы в условиях Волгоградской области // Эпидемии болезней растений: мониторинг, прогноз, контроль. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Большие Вяземы Московской обл., ВНИИФ, 13–17 ноября 2017 г. Большие Вяземы, 2017. С. 114–119.
8. Вавилов П.П., Гриценко В.В., Кузнецов В.С., Лукьянюк В.И., Третьяков Н.И., Шатилов И.С. Растениеводство. М.: Колос, 1979. 520 с.
9. Covarellia L., Beccaria G., Steedband A., Nicholson P. Colonization of soft wheat following infection of the stem base by *Fusarium culmorum* and translocation of deoxynivalenol to the head // Plant Pathol. 2012. V. 61. P. 1121–1129.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2012.02600.x>
10. Мишустин Е.Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия. М.: Наука, 1972, 344 с.

Dynamics of Dominant Facultative Parasites of Fungal Nature in Field Agroecosystems with Minimal Soil Treatment in the Western Part of the Volgograd Region

N. I. Budynkov^{a, #}, S. N. Mikhaleva^a, and A. V. Proskurin^b

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

^b LLC "BIOLAB.AGRO"
1st Kadashevsky p. 11/5, bld. 1, office 4, Moscow 115035, Russia

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

During the period of 2017–2019, when technological schemes for controlling winter wheat diseases for various precursors were introduced in the fields, based on monitoring of dangerous microorganisms and subsequent recommendations for the use of effective fungicides and biological products, a decrease in the level of colonization of plants by strong pathogens in the tillering phase was noted by 3.1 times, and plant residues by 4.7 times. 10% colonization of plant residues of spring wheat by strong pathogens as a source of infection was sufficient for 22.3% colonization of plants of the subsequent culture. According to the predecessor of nut, from 2018 to 2019, the level of colonization of winter wheat decreased by 3.9 times, and plant residues—from 39.4% to almost zero values. Obviously, chickpeas can be a good precursor of winter wheat only if they are reliably controlled in field agroecosystems by facultative parasites of a fungal nature. According to the predecessor mustard for seeds, the indicator of colonization of wheat plants from 2018 to 2019 decreased by 3.6 times, the level of colonization of plant residues from 42.0% to zero values. For all predecessors, during the years of research, there was a seasonal increase in the colonization of the tillage node by dangerous pathogens. In addition, significant colonization of the stem by strong pathogens was observed in the phase of flag-leaf sweeping on wheat by black steam. The effectiveness of protective and preventive measures was very high (7.0–3.6 times) in the fields of winter wheat for deposits, chickpeas, and mustard, where biological preparations were used both on plants and on plant residues. In the fields of wheat on black steam, plant residues were almost absent, as well as the corresponding infection, so the combined chemical and biological treatment gave a very high (8.9-fold) effect here. In the field of winter wheat for spring wheat, plant residues after herbicide treatment remained a powerful accumulator and a source of dangerous infection, so chemical and biological treatment in tillering provided only a 1.4-fold effect of reducing the incidence of strong pathogens. This indicates a high level of danger for crops of infection of facultative parasitic fungi that develop on the plant residues of precursor crops, as well as the need for timely microbiological sanitation of plant residues using effective biological products.

Key words: winter wheat, precursor crop, optional parasites of fungal nature, colonization, strong pathogens, weak pathogens, dominant pathogens, crop rotation.

УДК 631.811.9:546.23:633.491

ФИТОТОКСИЧНОСТЬ НАНОКОМПОЗИТОВ СЕЛЕНА В ПРИРОДНЫХ МАТРИЦАХ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ *in vitro*

© 2021 г. А. И. Перфильева^{1,*}, О. А. Ножкина¹, И. А. Граскова¹,
Н. С. Забанова^{1,2}, Б. Г. Сухов³

¹ Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Россия

² Иркутский государственный университет
664003 Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия

³ Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского Сибирского отделения РАН
664033 Иркутск, ул. Фаворского, 1, Россия

*E-mail: alla.light@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2020 г.

После доработки 08.06.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В качестве потенциальных агентов, используемых для оздоровления культурных растений, исследовали наноконпозиты (НК) селена, инкапсулированные в природные матричные оболочки арабиногалактана, крахмала и каррагинана. Представлены данные по фитотоксичности НК на рост и развитие *in vitro* растений картофеля различных сортов по устойчивости к кольцевой гнили и данные по содержанию селена в растительных тканях при обработке НК. Показано отсутствие негативного воздействия НК селена и арабиногалактана (НК Se/Ag) и НК селена и каррагинана (НК Se/Кар) на растения в концентрации 0.000625% селена. НК селена и крахмала (НК Se/Кр) угнетал растения. Наличие стресса у растений подтверждено увеличенным содержанием диеновых конъюгатов в их тканях и повышенной активностью пероксидазы. Содержание селена в тканях картофеля, культивируемого с НК Se, было минимальным. НК Se/Ag и НК Se/Кр в концентрации, увеличенной в 10 раз, оказывали губительное воздействие на картофель, наблюдаемое через 4–8 ч после обработки. При этом содержание селена в тканях растений было в 2 раза больше по сравнению с вариантом обработки картофеля селеном в концентрации 0.000625%. НК Se/Кар оказывал слабо выраженное негативное воздействие на растения картофеля, однако содержание селена в таких пробах было максимальным и составляло 0.15%.

Ключевые слова: фитотоксичность, картофель, наноконпозиты, селен, арабиногалактан, крахмал, каррагинан, пероксидаза, диеновые конъюгаты, стресс.

DOI: 10.31857/S0002188121010087

ВВЕДЕНИЕ

Мировое сельское хозяйство при производстве продукции активно использует пестициды. Эти вещества являются незаменимыми в целях защиты сельскохозяйственных культур как на этапе до, так и после сбора урожая. Пестициды применяют в качестве регуляторов роста микроорганизмов, насекомых или растений, дефолиантов, осушителей, агентов для предотвращения преждевременного опадения плодов. Кроме того, пестициды используют в качестве веществ, наносимых на плоды для их защиты от порчи во время хранения и транспортировки [1–3]. Действующие вещества большей части пестицидов относятся к хлорорганическим соединениям, органо-

фосфатам, карбонатам и пиретроидам [4]. Хотя пестициды распыляются непосредственно на растения и почву, только ≈1% распыленного агента доставляется к цели [5]. Некоторые из них, например, хлорорганические пестициды остаются в окружающей среде более 30 лет [6]. Пестициды накапливаются в семенах и плодах культурных растений [7, 8], загрязняют водоемы [9, 10] и почву [11, 12], оказывая негативное влияние на почвенные организмы [13, 14]. Пестициды даже приводят к гибели людей, работающих с ними и потребляющих продукцию, содержащую пестициды в большом количестве [15–18]. Таким образом, накопление и аккумуляция действующих веществ пестицидов

в тканях культурных растений является серьезной проблемой используемых препаратов [19].

В настоящее время является актуальным поиск экологически безопасных агентов, способных ограничить распространение заболеваний картофеля, в том числе, бактериозов [20]. Важно разработать химические агенты, обладающие высоким бактерицидным эффектом, при этом не оказывающие негативного воздействия на окружающую среду. Для решения этой задачи рассматривается возможность применения нановеществ [21]. Для применения в агрохимии особый интерес вызывает селен. Селен (Se) — ультрамикрэлемент, участвующий в важных биохимических реакциях клетки, процессах повышения стрессоустойчивости растений [22–24], при этом он токсичен при высоких концентрациях [25, 26]. Кроме того, селен принимает участие в синтезе токоферолов, токотриенолов, убихинонов, хлорофилла и трикарбоновых кислот, в метаболизме длинноцепочечных жирных кислот [27]. В последнее время во многих регионах мира отмечен дефицит Se в почве и его нехватка для растений [28–30]. Кроме того, удобрения, включающие в свой состав Se, часто не оказывают должного эффекта, поскольку Se переходит в нерастворимые соединения [31, 32].

При избытке селена отмечают аналогичную закономерность, как и при его недостатке — рост и цветение растения задерживаются, отмечается хлороз листьев, потеря тургора тканей стеблей и, как следствие, вилт, растения теряют устойчивость к изменяющимся факторам среды. На биохимическом уровне в различных ферментах происходит замена серы на селен благодаря сходству строения их атомов — подобному строению внешних электронных оболочек. В результате этого отмечается накопление свободных растворимых аминокислот и торможение синтеза белка, возникающего вследствие замещения цистеина и метионина их аналогами, содержащими селен, селеноцистеином и селенометионином [24–27].

Большинство имеющихся работ, посвященных действию наноселена на растения, свидетельствуют о его положительном влиянии на растения. Например, показано, что экзогенное опрыскивание наноселеном базилика *Ocimum basilicum* L. повышает его антиоксидантный потенциал [28], усиливает рост растений табака *Nicotiana tabacum* L. [29], и арахиса *Arachis hypogaea* L. [30]. Предполагают, что увеличение роста высших растений после воздействия на них наночастиц (НЧ) селена происходит благодаря повышению продуктивности фотосинтеза [31]. Показано

также изменение жирнокислотного профиля в клетках растений под влиянием НЧ селена [30].

В качестве потенциальных соединений для оздоровления картофеля от бактериальных заболеваний могут быть перспективными наноконпозиты (НК) селена в полимерных матрицах природного происхождения. Благодаря своему строению такие НК обеспечивают адресную доставку токсичных агентов в бактериальную клетку, не вредя растениям. Обработка НК бактериального патогена, вызывающего кольцевую гниль, а также зараженных растений картофеля показала положительный эффект, при котором отмечали массовую гибель патогена и отсутствие негативного эффекта на растения [37–41]. При этом влияние НК в повышенной концентрации, которое можно наблюдать при накоплении НК в окружающей среде после обработки ими растений, на рост и развитие здоровых растений картофеля не изучали.

Цель работы — исследование влияния повышенной концентрации НК селена в природных матрицах на развитие картофеля *in vitro* и накопление селена в его тканях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали НК трех видов, различающиеся по типу полимера матрицы, в которую были упакованы НЧ селена:

1 — НК селена и арабиногалактана (НК Se/Ag), содержание селена составило 6.4%;

2 — НК селена и крахмала (НК Se/Kp), содержание селена — 12%;

3 — НК селена и каррагинана (НК Se/Kap), содержание селена — 2%.

Синтез наноконпозита селена с арабиногалактаном (НК Se/Ag) проводили окислением бис(2-фенилэтил)фосфинодиселенофосфината натрия пероксидом водорода в водном растворе арабиногалактана. Подробно процесс синтеза описан ранее [38]. Синтез наноконпозита селена с крахмалом (НК Se/Kp) осуществляли на основе готового препарата крахмала (Sigma-Aldrich, США). Подробно процесс синтеза описан ранее [42]. Для создания наноконпозита селена и каррагинана (НК Se/Kap) использовали каррагинан марки WR (1800 кДа) (CP Celko, Дания). К раствору 1 г каррагинана в 30 мл воды при перемешивании добавляли 6 мл водного раствора 0.025 г SeO₂ и затем 0.01 г NaBH₄ в 1 мл воды. Продолжительность реакции 10 мин. Наноконпозит осаждали этанолом. Осадок отфильтровывали и высушивали при комнатной температуре и атмосферном давлении. Выход составлял 94% [43].

Для экспериментов использовали растворы НК, в которых содержание селена нормировали до 0.000625% (концентрация подобранная ранее, при которой отмечен антибактериальный эффект на фитопатогенные бактерии и отсутствие негативного эффекта на растения) и в увеличенной концентрации в 10 раз (0.00625%).

Эксперименты проводили на растениях картофеля *in vitro* двух сортов, контрастных по устойчивости к патогенам: Луговской — устойчивый и Лукьяновский — восприимчивый [44]. Растения размножали с помощью черенкования и выращивали на готовой питательной среде Мурасиге—Скуга (Sigma-Aldrich, США). Картофель культивировали в агаризованной среде в течение 20 сут при 26°C и освещенности 5–6 кЛк. Далее переносили в жидкую среду культивирования и вносили водные растворы НК.

Для изучения фитотоксичности наноконпози- тов растения картофеля сорта Лукьяновский и сорта Луговской *in vitro* помещали в емкости со средой культивирования (жидкой питательной средой Мурасиге—Скуга). В эксперименте использовали следующие варианты для каждого сорта картофеля: 1 — контроль, 2 — растения, обработанные НК Se/Ag (инкубировали в среде с добавлением НК Se/Ag (0.000625% селена) — вариант НК Se/Ag, 3 — растения, обработанные НК Se/Кр (инкубировали в среде с добавлением НК Se/Кр (0.000625% селена) — вариант НК Se/Кр, 4 — растения, обработанные НК Se/Кар (инкубировали в среде с добавлением НК Se/Кар (0.000625% селена) — вариант НК Se/Кар, 5 — растения, обработанные НК Se/Ag повышенной концентрации (инкубировали в среде с добавлением НК Se/Ag (0.00625% селена) — вариант НК Se/Ag*10, 6 — растения, обработанные НК Se/Кр (инкубировали в среде с добавлением НК Se/Кр (0.00625% селена) — вариант НК Se/Кр*10, 7 — растения, обработанные НК Se/Кар (инкубировались в среде с добавлением НК Se/Кар (0.00625% селена) — вариант НК Se/Кар*10. В течение первых суток через каждые 2 ч фиксировали число завядших листьев (0, 2, 4, 6 и 8 ч). Опыт продолжали 4 сут. В конце эксперимента определяли накопление селена в изученных растениях картофеля.

Определение содержания первичных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) — диеновых конъюгатов в тканях картофеля проводили по методике [45] с использованием гексана и изопропанола спустя 60 мин после внесения раствора НК в среду роста картофеля *in vitro*. Активность гваяколзависимой пероксидазы определя-

ли по методу Бояркина [46] спустя 3 ч коинкубации растений с НК.

Накопление селена изучали на 4-е сут в тканях растений после обработки картофеля НК при помощи стандартной методики рентгеновского спектрального энергодисперсионного микроанализа (РСЭДМА). Пробы, полученные из растертой и слегка подсушенной растительной ткани, наклеивали на электропроводный клей и помещали в камеру для съемки при помощи электронного сканирующего микроскопа “Hitachi TM 3000” с X-детектором SDD Xflash 4304, где они подвергались электронному удару. С помощью пучка электронов атомы исследуемого образца возбуждались, испуская характерное для каждого химического элемента рентгеновское излучение. Исследуя энергетический спектр такого излучения, делали выводы о качественном и количественном составе образца.

Полученные данные обработали с помощью методов математической статистики с использованием программы MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В литературе встречаются исследования фитотоксичности НЧ и их комплексов, но при этом стандартизированной методики для подобных исследований нет. Имеются результаты как о положительном влиянии НЧ на рост и развитие растений, так и о негативном эффекте НЧ на жизнеспособность растительного организма [47, 48]. Была проверена токсичность НК на рост и развитие картофеля *in vitro* 2-х сортов как в концентрации селена 0.000625%, которая токсична для возбудителя кольцевой гнили, и в концентрации в 10 раз выше (0.00625% селена).

На начальном этапе для выявления наличия состояния стресса у растения под воздействием НК было исследовано изменение активности пероксидазы и содержание продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в тканях картофеля, подвергнутого обработке НК.

При стрессе в клетках растений высвобождается большое количество активных форм кислорода (АФК), которое способно спровоцировать биохимическое повреждение клеток продуктами ПОЛ [49]. Содержание продуктов ПОЛ является одним из показателей оценки степени повреждения клеток растений при стрессе [50]. Было исследовано влияние НК на содержание диеновых конъюгатов (ДК) в тканях корня и листьев картофеля (рис. 1). Обнаружено, что все обработки НК, кроме НК Se/Кар*10, вызывали повышение содержания ДК в тканях картофеля восприимчи-

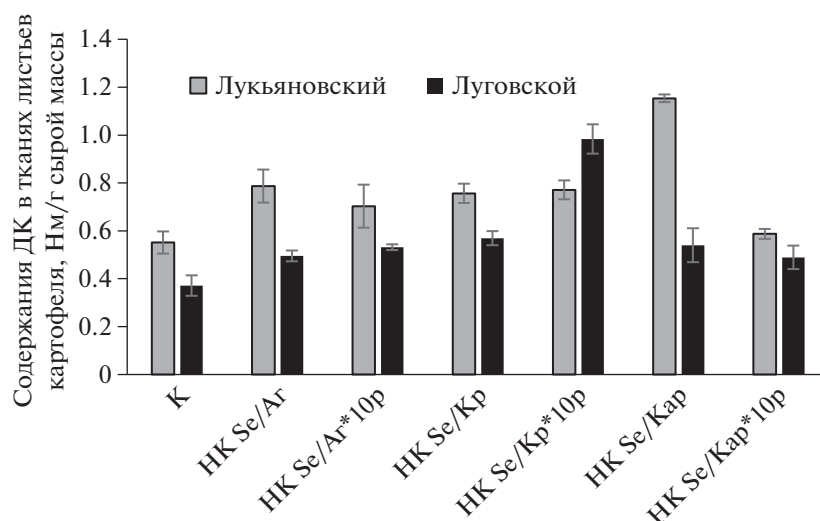


Рис. 1. Влияние НК на содержание диеновых конъюгатов (ДК) в тканях листьев картофеля сортов Луговской и Лукьяновский *in vitro*.

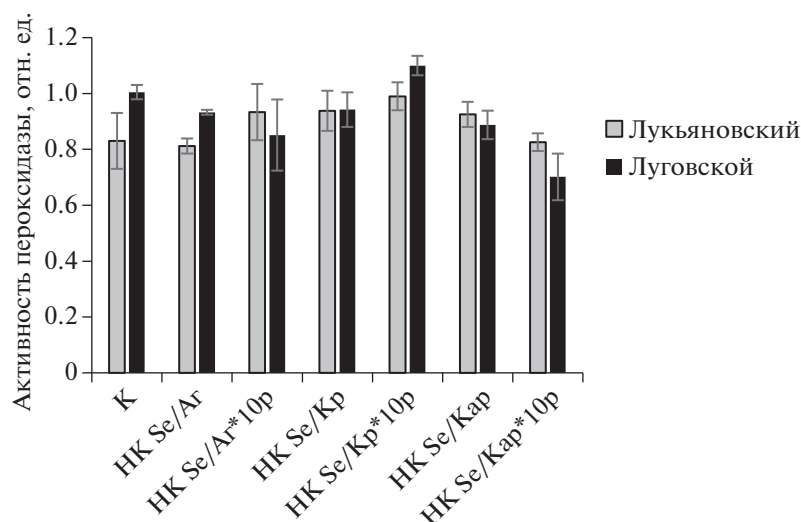


Рис. 2. Влияние НК на активность пероксидазы в тканях листьев картофеля сортов Луговской и Лукьяновский *in vitro*.

вого сорта Лукьяновский. Количество ДК в тканях растений сорта Луговской увеличивалось при внесении в среду культивирования НК Se/Ag, НК Se/Ag*10, НК Se/Kp и НК Se/Kp*10. Обработка картофеля сорта Луговской НК Se/Kap и НК Se/Kap*10 не оказывала влияния на содержание продуктов ПОЛ в тканях листьев. Изменение содержания ДК в тканях листьев картофеля восприимчивого сорта проявлялось в большей степени по сравнению с изменениями содержания ДК в тканях устойчивого сорта. Наблюдаемые сортовые различия являются логичными, т.к. растения восприимчивого сорта более ярко реагировали на любые стрессовые воздействия в отличие от растений устойчивого сорта.

Представлены результаты воздействия НК на активность пероксидазы в тканях листьев картофеля (рис. 2). Пероксидаза является очень чувствительным ферментом к различным стрессовым факторам, поэтому часто изменение активности этого фермента можно применять для оценки устойчивости организма к стрессу [51–53].

Обнаружено, что в контрольных растениях активность фермента была выше в тканях картофеля устойчивого сорта Луговской по сравнению с активностью фермента в тканях растений восприимчивого сорта Лукьяновский. Обработка растений НК Se/Ag, НК Se/Ag*10, НК Se/Kp и НК Se/Kap не оказывала влияния на активность пероксидазы обоих сортов. Воздействие НК

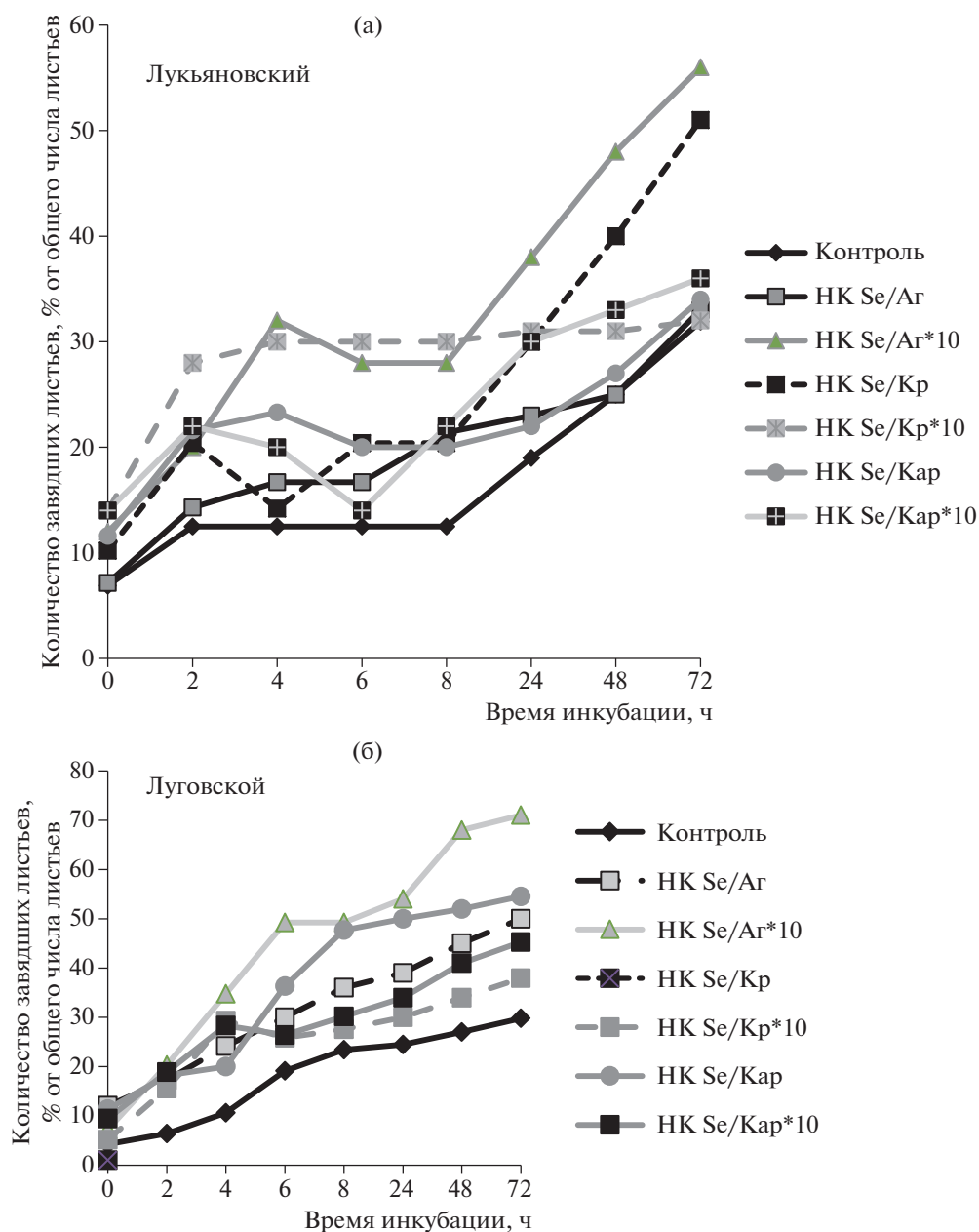


Рис. 3. Влияние НК на количество завядших листьев картофеля сортов Лукьяновский (а) и Луговской (б) *in vitro*.

Se/Kp*10 вызывало достоверное повышение активности фермента в тканях картофеля обоих сортов, что свидетельствовало о стрессовом состоянии растений. Обработка растений НК Se/Kap*10 приводила к снижению активности пероксидазы в тканях картофеля устойчивого сорта Луговской.

Таким образом, проведенные исследования биохимических показателей растений картофеля свидетельствовали о наличии стрессового состояния растений картофеля обоих сортов при их обработке НК Se/Kp*10. В этом варианте наблюдали повышение содержания ДК и активности перок-

сидазы в тканях листьев картофеля. Обработка растений НК Se/Kap*10 не свидетельствовала о наличии стресса у растений.

Также визуально отслеживали состояние растений в течение 4 сут инкубации, производили подсчет завядших листьев. Обнаружено, что у растений картофеля сорта Лукьяновский, восприимчивого к патогенам, первые признаки увядания листьев отмечались уже через 2–6 ч в первые сутки наблюдений во всех вариантах с 10-кратным превышением концентрации селена (рис. 3а). Растения картофеля, обработанные НК с концентрацией

селена 0.000625%, сохраняли жизнеспособность на этом этапе наблюдения.

В опытах с растениями сорта Луговской, устойчивого к фитопатогенам, только спустя 6 ч появлялись первые увядающие растения в вариантах с 10-кратным превышением концентрации селена (рис. 36). При этом все контрольные растения и растения, подвергнутые обработке НК в концентрации 0.000625% селена, сохраняли жизнеспособность, их листья не увядали.

На 2-е сут было отмечено, что растения, подвергнутые обработкам НК Se/Ag*10, НК Se/Kp, НК Se/Kp*10 и НК Se/Kap*10 имели множество завядших листьев, стебли таких растений теряли тургор. Контрольные растения также имели завядшие листья, но их количество было значительно меньше, чем во всех опытных вариантах, кроме обработок НК Se/Ag и НК Se/Kap.

На 4-е сут наблюдений контрольные растения сорта Лукьяновский сохраняли жизнеспособность. Отсутствие вилта стеблей и пожелтения листьев отмечали в вариантах НК Se/Ag и НК Se/Kap, при этом завядшие листья наблюдали. На этом этапе картофель, подвергнутый воздействию НК Se/Kp, практически полностью погиб, был отмечен вилт, скручивание, пожелтение листьев. В вариантах с увеличенной концентрацией селена наблюдали иную закономерность: растения в вариантах НК Se/Ag*10 и НК Se/Kp*10 погибали, их стебли истончались, теряли тургор, листья желтели и отпадали.

В следующие сутки наблюдений отмечено, что наибольшую жизнеспособность сохраняли растения, обработанные НК в концентрации селена 0.000625% (рис. 3а). Картофель, подвергнутый обработке НК Se/Ag, НК Se/Ag*10 и НК Se/Kap, на этом этапе культивирования начал погибать, отмечали активное завядание листьев, потерю тургора тканей стеблей.

Картофель сорта Луговской, обработанный НК в концентрации селена 0.000625%, сохранял жизнеспособность как на 2-е, так и на 4-е сут наблюдений. На 2-е сут наблюдений растения в вариантах НК Se/Ag*10 и НК Se/Kp*10 начали погибать, на 4-е сут отмечено усиление этого процесса. При этом сохранялась жизнеспособность растений в варианте НК Se/Kap*10 (рис. 3б). В конце периода наблюдения, на 4-е сут, отмечено повышенное завядание и скручивание листьев растений, подвергнутых обработке НК в повышенной концентрации. Максимальное количество погибших листьев отмечено в варианте НК Se/Ag*10 у обоих сортов картофеля.

Таким образом, диагностика жизнеспособности в динамике показала отсутствие токсичного эффекта НК Se/Ag и НК Se/Kap с концентрацией селена 0.000625% на растения картофеля обоих сортов в течение всего периода наблюдения. НК Se/Kp оказывал негативное влияние на жизнеспособность картофеля сорта Лукьяновский на 2-е сут эксперимента. Увеличенная в 10 раз концентрация НК Se/Ag и НК Se/Kp проявила губительное воздействие на картофель сорта Лукьяновский уже через 2–6 ч и через 6 ч – картофеля сорта Луговской, что приводило к завяданию большей части листьев и потери тургора стеблей в конце периода наблюдения. В варианте НК Se/Kap*10 растения выглядели значительно лучше, чем в других вариантах с увеличенным внесением НК.

Исследованные растения картофеля также были проанализированы на содержание селена с помощью метода рентгеновского спектрального энергодисперсионного микроанализа по окончании опыта. Не было выявлено наличие селена как в тканях растений картофеля обработанного и не обработанного НК Se/Ag (0.000625% селена). Обработка картофеля НК Se/Kp и НК Se/Kap концентрации селена 0.000625% приводила к накоплению селена в незначительных количествах (0.03 и 0.07% соответственно). 10-кратное увеличение концентрации всех 3-х НК повышало содержание селена в 2 раза по сравнению с этим показателем в тканях растений картофеля по сравнению с концентрацией 0.000625% селена. Следует отметить, что обработка 10-кратно увеличенной концентрацией НК не приводила к значительному накоплению селена в тканях картофеля. Наибольшее содержание селена было выявлено в варианте НК Se/Kap*10 и составило всего 0.15% от общего количества исследованных химических элементов в пробе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано отсутствие выраженного негативного воздействия НК Se/Kap и НК Se/Ag в концентрации 0.000625% селена на рост и развитие растений картофеля обоих сортов *in vitro*. Выявлено отсутствие накопления селена в тканях таких растений картофеля. Обработка НК Se/Kp угнетала растения, при этом накопление селена в тканях составляло 0.03% от всех химических элементов. Увеличенная в 10 раз концентрация НК Se/Ag и НК Se/Kp оказывала губительное воздействие на картофель, регистрируемое в первые часы после обработки, что подтверждено высокой активностью стрессового фермента пероксидазы и повышенным содержанием ДК. Содержание селена в тканях растений в этих случаях удваивалось по

сравнению с вариантами обработки растений НК с концентрацией селена 0.000625%. Повышенная концентрация НК Se/Аг вызвала максимальное пожелтение и отмирание листьев растений сорта Лукьяновский. НК Se/Кар в увеличенной дозе не вызывал стрессового состояния растений, что также подтверждено низким содержанием ДК и пониженной активностью пероксидазы в тканях листьев таких растений. Тем не менее, содержание селена в таких пробах было максимальным и составляло 0.15%. Полученные результаты свидетельствовали о том, что повышенная концентрация НК приводит к избытку селена в тканях растения картофеля, что вызывает гибель растения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Storck V., Karpouzas D.G., Martin-Laurent F.* Towards a better pesticide policy for the European Union // *Sci. Total. Environ.* 2017. V. 575. P. 1027–1033.
2. *Захаренко В.А.* Мониторинг фитосанитарного состояния агроэкосистем в связи с прогнозированием площадей обработок пестицидами в Российской Федерации // *Агрохимия*. 2018. № 12. С. 3–26.
3. *Захаренко В.А.* Использование пестицидов в аграрном секторе России в контексте развития глобальных рынков средств защиты растений // *Агрохимия*. 2020. № 3. С. 43–48.
4. *Kumar J., Melo J.S.* Overview on biosensors for detection of organophosphate pesticides // *Curr. Trends Biomed. Eng. Biosci.* 2017. V. 5. P. 555–663.
5. *Kumar P., Kim K.-H., Deep A.* Recent advancements in sensing techniques based on functional materials for organophosphate pesticides // *Biosens. Bioelectron.* 2015. V. 70. P. 469–481.
6. *Liu S., Zheng Z., Li X.* Advances in pesticide biosensors: current status, challenges, and future perspectives // *Anal. Bioanal. Chem.* 2013. V. 405. P. 63–90.
7. *El-Mehdawi A.F., Pilon-Smits E.A.H.* Ecological aspects of plant selenium hyperaccumulation // *Plant Biol.* 2012. V. 14. P. 1–10.
8. *Bempah C.K., Donkor A., Yeboah P.O., Dubey B., Osei-fosu P.* A preliminary assessment of consumer's exposure to organochlorine pesticides in fruits and vegetables and the potential health risk in Accra Metropolis, Ghana // *Food Chem.* 2011. V. 128. P. 1058–1065.
9. *Hijosa-Valsero M., Bécáres E., Fernández-Aláez C., Fernández-Aláez M., Mayo R., Jiménez J.J.* Chemical pollution in inland shallow lakes in the Mediterranean region (NW Spain): PAHs, insecticides and herbicides in water and sediments // *Sci. Total. Environ.* 2016. V. 544. P. 797–810.
10. *Горбатов В.С., Астайкина А.А., Антикаев Р.С., Тихонов В.В.* Сравнительная оценка опасности и риска пестицидов для водных организмов // *Агрохимия*. 2019. № 11. С. 17–26.
11. *Ukalska-Jaruga A., Smreczak B., Siebielec G.* Assessment of pesticide residue content in polish agricultural soils // *Molecules*. 2020. V. 25. № 3. P. 587.
12. *Zhang F., He J., Yao Y., Hou D., Jiang C., Zhang X., Di C., Otgonbayar K.* Spatial and seasonal variations of pesticide contamination in agricultural soils and crops sample from an intensive horticulture area of Hohhot, North-West China // *Environ. Monit. Assess.* 2013. V. 185(8). P. 6893–6908.
13. *Baćmaga M., Wyszowska J., Kucharski J.* The influence of chlorothalonil on the activity of soil microorganisms and enzymes // *Ecotoxicology*. 2018. V. 27(9). P. 1188–1202.
14. *Иванцова Е.А.* Влияние пестицидов на микрофлору почвы и полезную биоту // *Вестн. Волгоград. гос. ун-та. Сер. 11. Естеств. науки*. 2013. № 1(5). С. 35–40.
15. *Курдиль Н.В., Иващенко О.В., Струк В.Ф., Богомол А.В.* Особенности острых отравлений пестицидами в условиях города: карбаматы, пиретроиды, неоникотиноиды // *Медицина неотложных состояний*. 2015. № 4(67). С. 51–57.
16. *Mew E.J., Padmanathan P., Konradsen F., Eddleston M., Chang S.S., Phillips M., Gunnell D.* The global burden of fatal self-poisoning with pesticides 2006–15: systematic review // *Affect. Disord.* 2017. V. 219. P. 93–104.
17. *Chowdhury F.R., Dewan G., Verma V.R., Knipe D.W., Isha I.T., Faiz M.A., Gunnell D.J., Eddleston M.* Bans of who class I pesticides in Bangladesh-suicide prevention without hampering agricultural output // *Inter. J. Epidemiol.* 2018. V. 47(1). P. 175–184.
18. *Bonvoisin T., Utyasheva L., Knipe D., Gunnell D., Eddleston M.* Suicide by pesticide poisoning in India: a review of pesticide regulations and their impact on suicide trends // *BMC Public. Health*. 2020. V. 20(251). P. 389–394.
19. *Schiavon M., Pilon-Smits E.A.H.* The fascinating facets of plant selenium accumulation – biochemistry, physiology, evolution and ecology // *New Phytol.* 2017. V. 213. P. 1582–1596.
20. *Анисимов Б.В., Белов Г.Л., Варицев Ю.А., Еланский С.Н., Журомский Г.К., Завриев С.К., Зейрук В.Н., Иванюк В.Г., Кузнецова М.А., Пляхневич М.П., Пшеченков К.А., Симаков Е.А., Склярова Н.П., Сташевски З., Усков А.И., Яшина И.М.* Защита картофеля от болезней, вредителей и сорняков. М.: Картофелевод, 2009. 272 с.
21. *Жемчужин С.Г., Спиридонов Ю.Я., Клейменова И.Ю., Босак Г.С.* Нанотехнологии и пестициды (дайджест публикаций за 2011–2017 гг.) // *Агрохимия*. 2019. № 5. С. 89–96.
22. *Барабой В.А., Шестакова Е.Н.* Селен: биологическая роль и антиоксидантная активность // *Укр. биохим. журн.* 2004. Т. 76. № 1. С. 23–32.
23. *Вихрева В.А., Блинохватов А.А., Клейменова Т.В.* Селен в жизни растений: монография. Пенза: РИО ПГСХА, 2012. 222 с.
24. *White P.J.* Selenium metabolism in plants // *Biochim. Biophys. Acta Gen. Subj.* 2018. pii: S0. V. 4165(18). P. 30138–7. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.05.006>
25. *Kolbert Z., Molnár Á., Feigl G., Van Hoewyk D.* Plant selenium toxicity: Proteome in the crosshairs // *J. Plant Physiol.* 2019. V. 232. P. 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.11.003>
26. *Pilon-Smits E.A.H.* On the ecology of selenium accumulation in plants // *Plants (Basel)*. 2019. V. 8(7). pii:

- E197.
<https://doi.org/10.3390/plants8070197>
27. Gupta M., Gupta S. An Overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants // Front Plant Sci. 2017. V. 7. P. 1–14.
28. Вихрева В.А., Лебедева Т.Б. Содержание селена в почвах и растения лесостепи среднего Поволжья // Молодой ученый. 2010. № 11(22). Т. 2. С. 195–198.
29. Шеуджен А.Х., Лебедевский И.А., Бондарева Т.Н. Биогеохимия и агрохимия селена // Научн. журн. КубГАУ. 2013. № 92(08).
30. Голубкина Н.А., Кекина Е.Г., Надежкин С.М. Перспективы обогащения сельскохозяйственных растений йодом и селеном (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2015. Вып. 16(3). С. 12–19.
31. Mechora Š. Selenium as a protective agent against pests: A Review // Plants (Basel). 2019. V. 8(8). pii: E262.
<https://doi.org/10.3390/plants8080262>
32. Кирюшина А.П. Актуальность и экологические риски использования селеновых удобрений // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2018. № 2(154). С. 33–35.
33. Ardebili Z.O., Ardebili N.O., Jalili S., Safiallah S. The modified qualities of basil plants by selenium and/or ascorbic acid // Turk. J. Bot. 2015. V. 39. P. 401–407.
34. Jiang C., Zu C., Shen J., Shao F., Li T. Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) // Acta Soc. Bot. Pol. 2015. V. 84. P. 71–77.
35. Hussein H.A., Darwesh O.M., Mekki B.B., El-Hallouty S.M. Evaluation of cytotoxicity, biochemical profile and yield components of groundnut plants treated with nano-selenium // Biotechnol. Rep. (Amst). 2019. V. 12(24). P. 1–7.
36. Feng T., Chen S., Gao D., Liu G., Bai H., Li A., Peng L., Ren Z. Selenium improves photosynthesis and protects photosystem II in pear (*Pyrus bretschneideri*), grape (*Vitis vinifera*), and peach (*Prunus persica*) // Photosynthetica. 2015. V. 53. P. 609–612.
37. Perfilova A.I., Moty'leva S.M., Klimenkov I.V., Graskova I.A., Skhov B.G., Trofimov B.A. Development of antimicrobial nano-selenium biocomposite for protecting potatoes from bacterial phytopathogens // Nanotechnol. Russia. 2017. V. 12. № 9/10. P. 553–558.
38. Perfilova A.I., Ножкина О.А., Граскова И.А., Сидоров А.В., Лесничая М.В., Александрова Г.П., Долмаа Г., Клименков И.В., Сухов Б.Г. Синтез нанобиоконкомпозитов селена и серебра и их влияние на фитопатогенную бактерию *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* // Изв. РАН. Сер. хим. 2018. № 1. С. 157–163.
39. Perfilova A.I., Ножкина О.А., Граскова И.А., Дьякова А.В., Павлова А.Г., Александрова Г.П., Клименков И.В., Сухов Б.Г., Трофимов Б.А. Наноконкомпозиты селена с полисахаридными матрицами стимулируют рост картофеля *in vitro*, инфицированного возбудителем кольцевой гнили // Докл. АН. 2019. Т. 489. № 3. С. 325–330.
40. Граскова И.А., Perfilova A.I., Ножкина О.А., Дьякова А.В., Нурминский В.Н., Клименков И.В., Судаков Н.П., Бородин Т.Н., Александрова Г.П., Лесничая М.В., Сухов Б.Г., Трофимов Б.А. Воздействие наноразмерного селена на возбудитель кольцевой гнили и картофель *in vitro* // Химия раст. сырья. 2019. № 3. С. 345–354.
41. Ножкина О.А., Perfilova A.I., Граскова И.А., Дьякова А.В., Нурминский В.Н., Клименков И.В., Бородин Т.Н., Александрова Г.П., Сухов Б.Г., Трофимов Б.А. Биологическая активность наноконкомпозита селена, инкапсулированного в макромолекулы каррагинана, по отношению к возбудителю кольцевой гнили и растениям картофеля *in vitro* // Рос. нанотехнол. 2019. Т. 14. № 3. С. 79–86.
42. Карпова Е.А., Сухов Б.Г., Колесникова Л.И., Власов Б.Я., Ильина О.П., Артемьев А.В., Лесничая М.В., Погодаева Н.Н., Сайванова С.А., Кузнецов С.В., Трофимов Б.А. Антиоксидантное средство с гепатопротекторным эффектом на основе наноструктурированного селена и способы его получения и применения: Пат. 2557992, РФ // Б.И. 2015. № 21. С. 14.
43. Lesnichaya M.V., Shendrik R., Sukhov B.G. Relation between excitation dependent luminescence and particle size distributions for the selenium nanoparticles in κ-carrageenan shell // J. Lumin. 2019. V. 211. P. 305–313.
44. Romanenko A.S., Riffel A.A., Graskova I.A., Rachenko M.A. The role of extracellular pH-homeostasis in potato resistance to ringrot pathogen // J. Phytopathol. 1999. V. 147(11–12). P. 679–688.
45. Владимиров Ю.А., Арчаков А.И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М.: Наука, 1972. 252 с.
46. Бояркин А.Н. Быстрый метод определения активности пероксидазы // Биохимия. 1951. Т. 16. С. 352.
47. Ruttkay-Nedecky B., Krystofova O., Nejdil L., Adam V. Nanoparticles based on essential metals and their phytotoxicity // J. Nanobiotechnol. 2017. V. 15. № 33.
48. Siddiqi K.S., Husen A. Plant response to engineered metal oxide nanoparticles // Res. Lett. 2017. V. 12. № 92. P. 1–18.
49. Курганова Л.Н. Перекисное окисление липидов — одна из возможных компонент быстрой реакции на стресс // СОЖ. 2001. № 6. С. 76–78.
50. Петухов А.С., Христов Н.А., Петухова Г.А. Перекисное окисление липидов в клетках растений в условиях городской среды // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 82–90.
<https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-82-90>
51. Huang Y., Bie Z., Liu Z., Zhen A., Wang W. Protective role of proline against salt stress is partially related to the improvement of water status and peroxidase enzyme activity in cucumber // Soil Sci. Plant Nutr. 2009. V. 55. P. 698–704.
52. Baysal Furtana G., Tipirdamaz R. Physiological and antioxidant response of three cultivars of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to salinity // Turk. J. Biol. 2010. V. 34. P. 287–296.
53. Олешук Е.Н., Гриц А.Н., Попов Е.Г., Янчевская Т.Г. Экспресс-оценка стрессоустойчивости интродуцируемых сортов винограда (*Vitis*) по активности окислительно-восстановительных ферментов // Proceed. Nation. Acad. Sci. Belarus. Biol. Ser. 2016. № 4. P. 33–41.

Phytotoxicity of Selenium Nanocomposites in Natural Matrices on Potato Plant Development *in vitro*

A. I. Perfileva^{a, #}, O. A. Nozhkina^a, I. A. Graskova^a, N. S. Zabanova^{a, b}, and B. G. Sukhov^c

^a*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of RAS
ul. Lermontova 132, Irkutsk 664033, Russia*

^b*Irkutsk State University ul. Karla Marxa 1, Irkutsk 664003, Russia*

^c*A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of RAS
ul. Favorskogo 1, Irkutsk 664033, Russia*

[#]*E-mail: alla.light@mail.ru*

Selenium nanocomposites (NC) encapsulated in natural matrix shells of arabinogalactan, starch, and carrageenan were studied as potential agents used for the improvement of cultivated plants. Data on the phytotoxicity of NC on the growth and development *in vitro* of potato plants of various varieties for resistance to ring rot and data on the content of selenium in plant tissues during the treatment of NC are presented. The absence of negative effects of selenium and arabinogalactan (SE/AG) and selenium and carrageenan (Se/Car) on plants at a concentration of 0.000625% selenium was shown. Selenium and starch NC (Se/CR NC) inhibited plants. The presence of stress in plants is confirmed by an increased content of diene conjugates in their tissues and increased peroxidase activity. The selenium content in the tissues of potatoes cultivated with NC Se was minimal. NC Se/AG and NC Se/CR in concentrations increased by 10 times had a detrimental effect on potatoes, observed 4–8 hours after processing. At the same time, the selenium content in plant tissues was 2 times higher compared to the variant of processing potatoes with selenium with a concentration of 0.000625%. NC Se/Kar had a weak negative effect on potato plants, but the selenium content in such samples was maximum and was 0.15%.

Key words: phytotoxicity, potato, nanocomposites, selenium, arabinogalactan, starch, carrageenan, peroxidase, diene conjugates, stress.

УДК 632:551.583

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСТЕНИЙ И ФИТОФАГОВ В АГРОЦЕНОЗАХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

© 2021 г. Е. И. Кошкин¹, И. В. Андреева^{1,*}, Г. Г. Гусейнов²,
К. Г. Гусейнов³, Ф. С.-У. Джалилов¹, И. М. Митюшев¹

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

² Группа компаний HH group
AZ1102 Баку, шоссе Хырдалан-Бинагади 34Н, Азербайджанская Республика

³ Институт защиты растений и технических культур
AZ1100 Гянджа, ул. Азиза Алиева, 91, Азербайджанская Республика

*E-mail: i.andreeva@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 07.09.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В обзоре рассмотрено влияние факторов глобального изменения климата (температура, концентрация углекислого газа и озона, влагообеспеченность) в разных сочетаниях на трансформацию взаимосвязей между растениями и вредителями в агроценозах. Проанализированы возможные пути адаптации технологий защиты растений от вредителей к изменению климата.

Ключевые слова: изменения климата, вредители, защита посевов от вредителей, инсектициды, вторичные метаболиты растений, биогенные газообразные вещества.

DOI: 10.31857/S0002188121010063

ВВЕДЕНИЕ

По данным, опубликованным Росгидрометом в “Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации в 2019 году”, средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории России за период с 1976 по 2019 гг. составила 0.47°C за 10 лет, что более чем в 2.5 раза выше скорости роста глобальной температуры за тот же период [1]. Очевидным положительным последствием подобных температурных аномалий для аграрной отрасли нашей страны можно было бы назвать рост сумм активных температур и увеличение продолжительности вегетационного периода. Однако прогнозируемая урожайность зерновых в центральных и южных регионах Европейской части России ниже среднепогодных показателей на 15–20% из-за возросшего риска возникновения летних засух и других неблагоприятных погодных явлений, а также ожидаемого расширения ареала распространения вредных организмов и роста их активности. Настоящим сообщением мы завершаем цикл обзоров [2–4], посвященных рассмотрению реакции сельскохозяйственных культур, сорных растений, фитопатогенов и, наконец, насекомых-вредителей — на изменения основных пара-

метров климата и повышенный азотный фон, которые могут трансформировать взаимосвязи между растениями и вредителями путем воздействия на химические процессы в системе “растение—насекомое—фитофаг”, а также многовидовых взаимодействиях.

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Реакцию вредителей на вариацию параметров изменения климата можно охарактеризовать, по меньшей мере, четырьмя показателями [5]: географическим ареалом их распространения [6], особенностями жизненного цикла [7], динамикой популяций [8] и трофическими связями [9], причем каждый из этих показателей может вносить значительный вклад в суммарный ущерб от данного вредителя. При оценке реакции 31 насекомого-фитофага удалось идентифицировать, по меньшей мере, влияние одного из четырех указанных выше параметров, зависящих от потепления и усиливающих вредоносность насекомых-фитофагов [10]. Из 29 вредителей, проявивших ту или иную реакцию, 26 (90%), 18 (62%), 16 (55%) и 4 (14%) обнаружили соответственно изменения ареала распространения, динамики популяции,

особенностей жизненного цикла и трофических связей; у 59% из изученных вредителей (17 из 29), реагирующих на повышение температуры, реакция различалась количественно в зависимости от специфики региона в пределах географического ареала распространения. Например, колорадский жук *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae) в прошлые десятилетия распространялся на север Европы, в то время как плотность популяции возрастала в Центральной Европе. В зонах, где по состоянию на 2010 г. развивалось 1 поколение *L. decemlineata* за год, к 2050 г. прогнозируется развитие 2–3-х поколений [11]. В России, на протяжении всего XXI века, прогнозируется расширение ареала *L. decemlineata* в северном, северо-восточном и восточном направлениях.

В условиях глобального изменения климата значительно расширяется вторичный ареал и усиливается вредоносность инвазивных видов вредных насекомых. Зеленый овощной клоп *Nezara viridula* (L.) (Hemiptera: Pentatomidae), происходящий из Восточной Африки, с 1960 года широко распространился в северном широтном направлении в Японии и Европе, из-за возросшей выживаемости в условиях повышения температуры зимой [12]. Среди опасных инвазивных вредителей растений, распространившихся в последнее десятилетие в России и Азербайджанской Республике, можно указать южноамериканскую томатную моль *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), в настоящее время наносящую серьезный вред томату в обеих странах [13].

Ареал зимней пяденицы *Operophtera brumata* (L.) (Lepidoptera: Geometridae) сместился в северные широты и возвышенные участки рельефа континентальной зоны Северной Европы. При этом вспышки размножения этого вредителя отмечены здесь не на основных, а на второстепенных кормовых растениях. Примечательно, что вредители однолетних полевых культур демонстрировали сходный тип реакции на потепление, что и вредители древесных культур, с меньшим ущербом для сельскохозяйственных культур. Например, западный кукурузный жук *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte (Coleoptera: Chrysomelidae) потенциально может нанести серьезный вред, являясь вектором вируса хлоротической пятнистости кукурузы, который может распространиться на нескольких дикорастущих видах растений — хозяев в окружающих поля экосистемах. Поскольку вредители в течение части сезона находятся в состоянии покоя или диапаузы, особенно в северных широтах [14, 15], даже небольшие фенологические несоответствия между растением-хозяином и основными жизненными циклами вредителя в условиях потепления, как у зимней

пяденицы, приводят к серьезным негативным последствиям для растений. Вместе с тем не исключена параллельная эволюция как вредителя, так и его растения-хозяина [16]. В последнее время связям между скоростью расширения ареала распространения вредителей, потеплением климата и процессам эволюции уделяется большое внимание [17, 18]. Однако эффекты совершенствования агротехнических мероприятий и эволюции рассматривались исследователями преимущественно отдельно, особенно в контексте изменения климата [5, 19]. Например, климатические изменения на территории Азербайджанской Республики вызвали адаптивные ответы колорадского жука, жизненный цикл которого характеризуется значительной растянутостью и перекрыванием фаз развития, связанных со сравнительно длительным периодом появления с зимовки и размножения. Это осложняет выбор оптимальных сроков обработок вегетирующих растений и понижает их эффективность. По результатам многолетних наблюдений, в Гянджа-Газахском экономическом районе Азербайджанской Республики, выход жуков из мест зимовки за последние 4 года ускорился на 2 декады по сравнению со средними сроками за предыдущие 14 лет. В теплые зимы этого периода жуки диапаузировали в почве на глубине 15–35 см вместо обычных 20–60 см, что обеспечивало ранний старт их активности [20].

По результатам наблюдений, проводимых с 1964 г. на Ротамстедтской опытной станции, при повышении среднесуточной температуры января и февраля на 1°C сроки заселения посевов сельскохозяйственных культур тлей (Hemiptera: Aphididae) сместились на 2 нед раньше, следствием чего явилось увеличение скорости роста или более раннее проявление активности после зимнего покоя, а также сохранение активности в течение более длительного периода с увеличением числа потомства [21]. По результатам 20-летних наблюдений, даже небольшое (на 1°C) повышение среднесуточной температуры в Великобритании в зимний период привело к более ранней (на 19 сут) миграции тли [21]. Диапазон вариации дневной температуры также влиял на скорость появления насекомых, обуславливая более раннее появление взрослых особей и увеличивая число поколений с возрастанием температуры [22].

Увеличение количества поколений вредителей, развивающихся за вегетационный сезон, приведет к необходимости разработки новых систем защиты растений, с акцентом на антирезистентные программы применения пестицидов, в связи с необходимостью увеличения количества обработок [23]. Например, в США повышение температуры в южных штатах привело к более

значительному увеличению популяции насекомых, чем в более прохладных условиях умеренных широт. В результате число обработок пестицидами против чешуекрылых вредителей в посевах сахарной кукурузы во Флориде было намного больше (15–32 обработки за вегетационный период), чем в Делавере (4–8) или Нью-Йорке (0–5) [24]. Подобные мероприятия оказывают существенное влияние на экологическую обстановку и здоровье населения [25]. Повышение температуры снижало эффективность отдельных пестицидов, например, токсичность двух пиретроидов (лямбда-цигалотрин и бифентрин) и спиносина (спиносада) против кукурузного мотылька *Ostrinia nubilalis* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae) [26]. В некоторых случаях обработка сублетальными концентрациями инсектицидов приводила к возрастанию устойчивости вредителя к повышенной температуре и инсектицидам, как, например, в случае с бурой рисовой цикадкой *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae), повреждающей рис в Азии [27]. Обработка посевов риса против данного вредителя инсектицидом триазофос в концентрации 40 ppm при температуре 40°C снижала смертность цикадок до 50%, в течение 48 ч, в сравнении с 94%-ной смертностью в контроле при той же температуре.

Если пестициды станут триггерами индуцированной термотолерантности (жароустойчивости), вредители смогут выживать при более высокой температуре и нанесут больший ущерб чувствительным культурам.

Между тем затраты на борьбу с насекомыми-вредителями в мире растут. Например, только на борьбу с капустной молью *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae) ежегодно тратится 4–5 млрд долларов [28]. Учитывая, что многие сельскохозяйственные и лесные вредители относятся к инвазивным видам, затраты на борьбу с ними оцениваются в почти 77 млрд долларов в год [29]. Ситуация осложняется тем, что защита посевов от вредителей может вносить существенный вклад в концентрацию парниковых газов в атмосфере. По оценкам, производство и транспортировка инсектицидов против соевой тли *Aphis glycines* Matsumura (Hemiptera: Aphididae), включая обработку ими посевов, только в США приводили к дополнительной эмиссии в атмосферу ежегодно от 6 до 40 тыс. т парниковых газов в CO₂-эквиваленте. Ограничение внесения пестицидов с использованием критерия “экономический порог вредоносности” может привести к снижению эмиссии парниковых газов примерно на 300 тыс. т в год в CO₂-эквиваленте [30]. Природные враги тли, в частности, божьи коровки (Coleoptera: Coccinellidae), способны уменьшить плотность популяции тли на более чем половине площадей сои в

США, снизив таким образом ежегодную эмиссию более, чем на 200 тыс. т в эквиваленте CO₂. Эти примеры показывают, что, хотя на производство и применение пестицидов приходится только 9% от общих энергозатрат на выращивание культур [31], возможности снижения количества парниковых газов при их рациональном использовании могут быть значительными. Однако вопрос о том, является ли итоговый баланс парниковых газов в защите растений позитивным или негативным, окончательно не решен [32], особенно при химическом способе защиты.

Наряду с использованием химических средств популяции насекомых в агрофитоценозе контролируют с помощью их естественных врагов (паразитоидов и хищников) [33]. Сдвиги в межвидовых и внутривидовых взаимодействиях среди насекомых, обусловленные потеплением климата, могут неоднозначно влиять на эффективность естественных врагов насекомых-вредителей [34]. Даже незначительное изменение температурных условий влияло на эффективность действия паразитоидов против насекомых-фитофагов [35], как и на защиту последних от личинок паразитоидов [36]. При повышенной концентрации CO₂ численность популяции наездника *Diaeretiella rapae* (McIntosh) (Hymenoptera: Braconidae), паразитоида тли, снижалась почти вдвое, сокращалось время жизни взрослых особей [37]. Наездник *Cotesia melanoscela* (Ratzeburg) (Hymenoptera: Braconidae), развивающийся на гусеницах непарного шелкопряда *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptera: Erebididae), в этих же условиях демонстрировал высокую смертность личинок и куколок, развитие преимагинальных стадий замедлялось [38]. В то же время активность некоторых естественных врагов в условиях изменения климата может возрасти. Например, повышенная концентрация CO₂ приводила к сокращению периода развития паразитоида тли *Lysiphlebus japonicus* Ashmead (Hymenoptera: Braconidae) [39] и паразитоида капустной моли *Cotesia plutellae* (Kurdjumov) (Hymenoptera: Braconidae) [40]. Вместе с тем в Новой Зеландии в естественных травянистых ландшафтах паразитоиды практически не реагировали на повышение температуры на фоне увеличения популяции вредителей [41].

Со снижением азотного фона рост гусениц хлопковой совки *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) тормозился, и их легко поедал хищный клоп-щитник *Oechalia schellenbergii* (Guérin) (Hemiptera: Pentatomidae) [42]. Показано, что при повышенной концентрации CO₂ хищники-универсалы оказались более эффективны в борьбе с вредителями, чем специализированные хищники. Азиатская божья коровка хармония изменчивая *Harmonia axyridis* Pallas

(Coleoptera: Coccinellidae) в этих условиях потребляла больше хлопковой тли на растениях хлопчатника [43]. Вместе с тем при повышенной концентрации CO_2 хищник *H. axyridis* не поедал больше особей большой злаковой тли *Sitobion avenae* Fabricius (Hemiptera: Aphididae) в отличие от паразитоида бракониды *Aphidius picipes* (Nees) (Hemiptera: Braconidae) [44]. Синхронизация фаз развития в системе “фитофаг–паразитоид” играет ключевую роль в эффективности последнего против насекомых фитофагов, что показано, в частности, на конском каштане [45]. Более раннее появление бездействующих паразитоидов каштановой минирующей моли в отсутствие насекомого-хозяина приводило к низкому уровню паразитизма.

Модели изменения климата очень редко оценивают эффекты, оказываемые на урожайность полевых культур как непосредственно питанием вредителей, так и косвенно — пестицидами, применяемыми для снижения их ущерба урожаю [10]. Вместе с тем разные виды вредителей будут реагировать неодинаково на изменение климата в зависимости от региона и выращиваемой культуры. В связи с этим интересна количественная оценка глобального влияния вредителей в будущем на урожайность и валовый сбор зерна 3-х культур — кукурузы, риса и пшеницы, обеспечивающих население планеты 42% калорий, потребляемых с пищей. При этом повышение температуры влияет, по меньшей мере, на 2 параметра насекомых-вредителей — скорость метаболизма и связанное с этим потребление ими растительной пищи [46], а также на динамику роста численности популяций насекомых. При повышении средней температуры воздуха на 2°C среднее снижение валового сбора урожая пшеницы, риса и кукурузы в мире от вредителей практически по всем моделям изменения климата составляет примерно 59, 92 и 62 млн т, или 48, 19 и 31% соответственно [47]. Поскольку эти 3 культуры выращивают в разных климатических условиях, где потепление зачастую может обусловить противоположные изменения скорости роста популяций насекомых, выживание в диапаузе может вызвать неодинаковые потери их урожая. Потепление для пшеницы, выращиваемой обычно в более прохладных климатических условиях, будет означать рост популяций насекомых в посевах и их выживаемость при перезимовке. У риса, выращиваемого в условиях относительно теплого тропического климата, дальнейшее потепление, напротив, будет снижать скорость роста популяций насекомых и таким образом частично противостоять увеличению потерь урожая из-за повышения скорости метаболизма насекомых. Однако повышение температуры воздуха на 3°C и больше резко уве-

личивает потери урожая риса аналогично пшенице. Что касается кукурузы, рост численности популяций вредителей практически не оказывает итоговый негативный эффект на валовый сбор зерна в мире, поскольку в одних регионах скорость роста популяций увеличивается, а в других — примерно в такой же степени снижается. В соответствии с моделями наибольшее снижение урожайности из-за потепления климата и, соответственно, увеличения вредоносности насекомых, предсказывают для кукурузы во Франции, Китае и США, для пшеницы и риса соответственно — во Франции и Китае, в которых в настоящий момент достигнута максимальная урожайность этих культур.

Таким образом, глобальное потепление может ускорить рост популяций вредителей, увеличить вероятность вспышек, расширить географию их распространения, что, в конечном итоге, приведет к значительному увеличению экономических потерь и снижению продовольственной безопасности [14, 48]. Однако в имеющихся моделях корректно не оценена вероятность одновременного изменения, кроме температуры, целого ряда абиотических факторов, например, влагообеспеченности, которые способны оказать существенное влияние на поведение вредителей в посевах и, в конечном итоге, их вредоносность. Например, в условиях дефицита влаги растения оказались более чувствительными к вредителям и болезням [49]. Из-за экстремальной засухи в Словакии в мае 1993 г. паразитоида трихограмму *Trichogramma evanescens* Westwood (Hymenoptera: Trichogrammatidae) не удалось эффективно использовать против кукурузного мотылька [50]. На северо-востоке США в 2015–2016 гг. вслед за экстремальной засухой впервые за 30 лет наблюдали вспышку размножения непарного шелкопряда [51]. При выпадении избыточного количества осадков 10 стран в Западной и Северной Африке в 2004 г. подверглись нашествию пустынной саранчи *Schistocerca gregaria* (Forsskal) (Orthoptera: Acrididae) [52]. Эти тенденции необходимо учитывать сельхозтоваропроизводителям Европейской части России, на севере которой в последние годы фиксируется значительный избыток осадков, а на юге — их острый дефицит [1]. На юге России расширяется ареал и возрастает вредоносность отдельных стадных видов саранчовых: например, в 2012 г. впервые были зарегистрированы миграции марокканской саранчи *Locustotaurus maroccanus* (Thunberg) (Orthoptera: Acrididae) на территорию Ставропольского края, а в 2016 г. — на территорию Краснодарского края [53].

Последствия непосредственного влияния повышенной концентрации CO_2 на насекомых-вредителей не так очевидны, как на метаболизм рас-

тения-хозяина. Последние включают повышение соотношения концентрации $C : N$, снижение содержания белка, а также изменение содержания вторичных метаболитов как защитных компонентов [2, 54].

РЕАКЦИЯ РАСТЕНИЙ НА ПОВРЕЖДЕНИЕ ЛИСТЬЕВ

Грызущие вредители, питаясь листьями, вызывают у растений целый ряд ответных физиологических реакций. В результате исследования более чем в 50% систем “растение – фитофаг” было отмечено снижение фотосинтетической активности листового аппарата. Например, порог вредности хлебной полосатой блошки *Phyllotreta vittula* (Redtenbacher) (Coleoptera: Chrysomelidae) для яровой пшеницы – уничтожение не менее 50% поверхности ее первого листа. Меньшее повреждение несущественно и во многих случаях даже стимулирует рост. В США посевы сои в севообороте с кукурузой сильно повреждаются японским жуком *Popillia japonica* Newman (Coleoptera: Scarabaeidae) [55]. Соя устойчива к данному вредителю в фазе вегетативного развития. Из-за более мягкой зимы и весны вредитель появляется раньше именно в указанную фазу, но повреждения при этом оказывают лишь слабое влияние на конечную урожайность. Соевая тля использует сою в качестве промежуточного хозяина и на ней появляется позже – в фазе генеративного развития: усыхание 60% площади листьев в этот период снижает урожайность на 20%. Но если из-за потепления соевая тля покинет своего основного хозяина – крушину раньше и переместится на посевы сои в фазе вегетативного развития, потери урожая при подобном снижении площади фотосинтезирующих листьев будут минимальными.

Вместе с тем некоторые вредители могут снижать ассимиляцию CO_2 в большей мере, чем непосредственно уменьшение площади листьев. Например, вызванное поеданием гусеницами снижение площади отдельного листа дикого пастернака даже на 5% снижает фотосинтез оставшегося листового покрова на 20% [56, 57]. Согласно другим данным, потеря части листа может как не влиять на его фотосинтетическую способность [58], так и снижать [59] или даже повышать ее. В последнем случае имеет место классический пример автокомпенсации, что может быть обусловлено повышением спроса на ассимилянты со стороны акцептора. Вместе с тем независимо от того, какую специализированную ткань – флоэму, ксилему или стебель поражает открыто (закрыто) живущий фитофаг, фотосинтез, как правило, снижается [60, 61].

Уничтожение (поедание) части ткани листа вредителем представляет собой пример прямого снижения фотоассимиляционной способности растения. Наряду с этим может быть косвенное влияние, например, путем повреждения сосудистой системы, влияющей на фотосинтез за счет изменения скорости транспорта воды, элементов питания, фотоассимилятов, что может изменить скорость метаболических процессов. Последствия повреждения жилкования, например, могут длиться неделями и, в конечном итоге, привести к высыханию листа [62]. Сочетание сосудистых повреждений и поедания части листа, как, например, у сои, усиливает снижение фотосинтеза оставшейся части листа и двух соседних листьев (у сои тройчатый лист) [63]. Скелетирование листьев сои японским жуком резко увеличивало потерю воды из объединенных краев листа. Повреждение межжилковой ткани не оказывало влияния на интенсивность фотосинтеза, но повысило интенсивность транспирации на 150% в течение четырех суток после повреждения.

Известно, что растения используют достаточно много ресурсов на защиту от вредителей путем синтеза вторичных метаболитов [64]; многие из этих соединений достаточно токсичны. Например, ряд видов растений синтезируют фуранокумарины, сильно снижающие интенсивность фотосинтеза даже на значительном расстоянии от места поражения насекомым [65], что в свою очередь тормозит рост и уменьшает накопление биомассы. Вместе с тем, ингибирование роста растений в результате атаки патогенов объясняется скорее перенастройкой сигнальной системы растений, чем недостатком ресурсов из-за синтеза вторичных метаболитов [66, 67].

РЕАКЦИЯ ВТОРИЧНОГО МЕТАБОЛИЗМА РАСТЕНИЙ НА АТАКУ ВРЕДИТЕЛЕЙ

Вторичные метаболиты растений (ВМР) как посредники при их взаимодействии с насекомыми включают азотсодержащие компоненты (алкалоиды, цианогенные гликозиды), серосодержащие компоненты (глюкозинолаты), фенолы (фенольные кислоты, фенилпропаноиды, танины, флавоноиды) и терпеноиды (моно- и дитерпены, секвитерпены), индолпроизводные бензоксаиноида. Состав и содержание этих соединений, в свою очередь, могут влиять на защитные реакции растений от вредителей и привлечение опылителей. Однако наше понимание влияния изменений климата на фитохимию и взаимоотношения растений и насекомых часто осложняется как взаимодействием факторов изменения климата (повышенные температура, концентрация CO_2 , O_3 , NO_x), высокими дозами вносимых в

почву азотных удобрений, так и прямым/косвенным влиянием факторов среды на растения и насекомых. Вследствие этого весьма трудно сформулировать обобщенное заключение о влиянии факторов изменения климата на систему “растение—фитофаг” в целом или прогнозировать изменения поведенческих реакций разных видов фитофагов (насекомых) на средне- и, особенно, долгосрочную перспективу [68]. Тем не менее уже очевидно, что ВМР занимают важное место в системе защитных реакций растений от вредителей, замедляя поедание фитомассы, снижая ее усвояемость из-за токсичности и привлекая естественных врагов вредителей [69]. При изменении вторичного метаболизма, в свою очередь, происходили также изменения первичного метаболизма растений, что влияло на содержание белков, жиров и углеводов [70, 71]. Вредители потребляют первичные метаболиты растений, одновременно пытаясь избежать негативные эффекты от вторичных метаболитов путем метаболической и поведенческой адаптации [72]. Кроме того, вторичные метаболиты в растениях могут служить также в качестве регуляторов и предшественников для синтеза первичных метаболитов в организме вредителей [73]. Например, личинки западного кукурузного жука вместе с растительной тканью потребляют комплекс железа с бензоксазиномидом, который необходим им для роста, используя, таким образом, вторичный метаболит в качестве первичного [74]. Ряд других вредителей на личиночной стадии также демонстрировали ускорение роста в присутствии вторичных метаболитов [75, 76], что свидетельствует об усвоении ВМР, по меньшей мере, частично в их организмах.

Климатические параметры могут изменить состав и концентрацию вторичных метаболитов в тканях растений. Например, повышенные температуры увеличивали содержание фенолов, включая танины и флавоноиды, а также сапонины и алкалоиды в проростках белой акации [77]. Однако фитохимическая реакция зависела от вида ткани (листья или стебли), времени отбора образцов для анализа и содержания тяжелых металлов в почве. Заметим при этом, что флавоноиды представляют один из самых старых и консервативных классов вторичных метаболитов [78]. Отмечено положительное влияние повышенных температур на содержание лигнина в молочае [79], сапонинов [80] и газообразных терпенов в сосне [81], а отрицательное — на содержание танинов [77] и лигнина [82]. Подобная различающаяся реакция отдельных вторичных метаболитов объясняется взаимодействием повышения температуры с другими абиотическими и биотическими факторами, влияющими на обмен веществ в растениях [83–85]. Например, водный стресс повы-

шал содержание карденолидов и снижал содержание латекса в молочае обыкновенном [79]. При этом диапазон изменения концентрации определялся температурой воздуха. Рост гусениц данаиды монарха *Danaus plexippus* (L.) (Lepidoptera: Nymphalidae) стимулировался повышенной температурой на фоне водного стресса, благодаря прямому действию температуры при одновременном изменении состава ВМР. В другом исследовании было отмечено, что засуха повышала содержание глюкозинолатов у арабидопсиса; при этом снижалась масса гусениц капустной совки *Mamestra brassicae* (L.) (Lepidoptera: Noctuidae), тормозился рост популяции зеленой персиковой тли *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) [86]. Хотя изменение содержания глюкозинолатов в этой работе не объясняет прямо их отрицательный эффект на вредителей, по мнению авторов, индуцированные засухой изменения в содержании остальных ВМР, в том числе флавоноидов, могли определить подобный эффект. Что касается других факторов изменения климата (повышенные концентрации CO_2 и O_3), они увеличивали содержание фенольных соединений, в частности, танинов и флавоноидов. Например, повышенные концентрации CO_2 увеличили общее содержание фенолов на 19, танинов — на 22, флавоноидов — на 27% [87]. Содержание терпеноидов в растениях снижалось с повышением концентрации CO_2 и увеличивалось с повышением O_3 , причем различные группы терпеноидов показывали отличающуюся реакцию [88, 89]. Влияние повышенной концентрации CO_2 на синтез отдельных ВМР, в отличие от первичных, менее прогнозируемо за исключением фенолов. Последние синтезируются из фенилаланина в ходе реакций шикиматного метаболического пути, регулируемых активностью фенилаланин-аммоний лиазы (ФАЛ). Одни фенолы выполняют функцию защиты растений против вредителей, снижая потребление ими растительной ткани, а также рост и выживаемость вредоносных насекомых [90, 91], другие, как, например, флавоноиды с антиоксидантными функциями, напротив, стимулируют потребление пищи и рост насекомых [92, 93]. Танины часто содержатся в листьях в высокой концентрации и присоединяются со своими фенольными гидроксильными группами к растворимым белкам в кишечнике насекомых, ингибируя тем самым гидролиз белка и снижая питательную ценность растительных тканей. В то время как гидролизуемые танины содержатся, главным образом, в покрытосеменных растениях, конденсированные танины широко распространены в растительном мире.

Повышенная концентрация CO_2 увеличивала содержание флавоноидов с антиоксидантными

свойствами, в т.ч. кверцетина, кэмпферола и физетина в листьях и ризомах 2-х сортов имбиря, стимулируя тушение свободных радикалов [94]. В листьях сои в подобных условиях увеличилось соотношение содержания кверцетина и кэмпферола, но снижалась концентрация изофлавоноида генистеина [95].

В отличие от содержания фенолов, данные по содержанию терпеноидов более противоречивы. Они образуются из молекул изопрена (C_5H_8) в результате преимущественно реакций мевалонатного пути в цитозоле клетки или метилэритрол-фосфатного пути в пластидах [96]. Появляется все больше данных, согласно которым оба этих пути, ведущих к синтезу терпеноидов, активируются повышенной концентрацией CO_2 в меньшей степени, чем шикиматный путь, в реакциях которого образуются фенолы [97].

Тритерпеноид карденолид является важным стероидным токсином против насекомых фитофагов, поскольку ингибирует Na^+/K^+ -АТФазу, обеспечивающую поддержание трансмембранного потенциала в большинстве клеток вредителей. Повышенная концентрация CO_2 снижала содержание карденолидов в тканях четырех генотипов молочая [97]. Вместе с тем реакция других ВМР на данный фактор далеко не всегда однозначная: их содержание в растениях может как увеличиваться, так и снижаться [98, 99]. Например, общее содержание глюкозинолатов увеличивалось у брокколи и арабидопсиса [100, 101], а индольных глюкозинолатов, напротив, снижалось [101].

Виды растений, растущих при повышенной концентрации CO_2 , демонстрируют различную чувствительность к листогрызущим насекомым, и часть этой вариации объясняется косвенной реакцией на увеличение температуры. Если скорость роста популяции тли с увеличением концентрации CO_2 возрастает [102, 103], у листогрызущих насекомых отмечено как снижение, так и увеличение скорости поедания листьев и роста массы особей [104–106]. Тли особо чувствительны к температуре [107] и косвенный позитивный эффект повышенной концентрации CO_2 на температуру листьев может определить часть этой вариации. В этих же условиях увеличение концентрации фенольного альдегида госсипола в листьях хлопчатника оказывает сильный негативный эффект на листогрызущие насекомые и тли [108]. Однако вопреки ожиданиям, выживаемость хлопковой тли *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae) в этом случае оказалась выше. Вместе с тем питание черемуховой тли *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae) на листовых дисках пшеницы, выращенной при обычной и повышенной концентрации CO_2 , обнаружило лишь незначитель-

ный эффект последнего варианта [109], как и на тлю *Cepigilleta betulaeefoliae* Granovsky (Hemiptera: Aphididae) на березе [110]. Видимо, далеко не случайно, что на березе повышенная концентрация CO_2 не снижала, а увеличивала устьичную проводимость при повышенной концентрации CO_2 [111], что является достаточно аномальным событием. В связи с этим заслуживает внимания факт стимулирования роста популяции соевой тли на листьях сои при повышенной концентрации CO_2 , которое полностью нивелируется при выравнивании температуры листьев в контроле и опыте [112]. Хотя повышенная концентрация CO_2 изменяет целый ряд химических и структурных показателей растений, влияющих на фитофагов, а также увеличивает температуру листьев, косвенный эффект на температуру листьев еще недостаточно осознан исследователями.

Что касается агротехнических мероприятий, высокие дозы азотных удобрений часто стимулируют распространение вредителей-насекомых, снижая, в частности, содержание танинов в листьях древесных пород и практически оказывая слабое влияние на содержание других фенольных соединений. В аналогичных условиях отмечены также случаи снижения концентраций производных фенилпропаноидов с вариацией содержания отдельных групп вторичных метаболитов [113]. Заслуживает внимания перераспределение пула защитных метаболитов между надземной и подземной сферой растений на высоком агрофоне [114]. Вместе с тем эффекты высокого азотного фона на содержание вторичных метаболитов в растениях определяются спецификой органа (ткани) и взаимосвязью агрофона и других факторов окружающей среды, таких как влагообеспеченность [114] и концентрация O_3 [115, 116].

ВЫДЕЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЕЩЕСТВ РАСТЕНИЯМИ

Изменение климата влияет на индуцированное вредителями выделение газообразных соединений растениями, влияющее на защитные реакции последних. Растения могут выделять в качестве биогенных газообразных веществ (БГВ) в стрессовых условиях около 10% вновь ассимилированного углерода [117]. Эти соединения (изопрен, терпены, карбонилы, органические кислоты, серосодержащие и бензеноидные компоненты, метиловые эфиры фитогормонов) играют важную роль в качестве посредников в антагонистических и мутуалистических взаимодействиях растений и вредителей. Обнаружены мутанты кукурузы с дефектами в выделении из тканей терпенов в ответ на атаку вредителей [78]. Абиотические стрессоры, включая факторы изменения

климата, могут влиять на реакцию растений на биотические взаимодействия через выделение БГВ, модифицируя таким образом пути взаимодействия вредителя с растением-хозяином [118, 119]. В то время как влияние повышенных температур, ограниченной водообеспеченности и атмосферных загрязнителей по отдельности на эмиссию БГВ растениями не вызывает сомнений, гораздо меньше понимания эффекта одновременного действия указанного сочетания факторов. Например, если даже небольшое повышение температуры может вызвать достаточно быстрое и сильное увеличение эмиссии газов из листьев кукурузы, одновременное участие в данной системе вредителя оказывает на растения аддитивный эффект [120]. При этом эффект взаимодействия показателя количества особей на растении с температурой воздуха на выделение монотерпенов оказывается весьма значимым, хотя последнее и не сохраняется на длительный период.

Водный стресс также влияет на эмиссию газов, причем предварительное действие искомого стрессора может усилить индуцированное атакой вредителей выделение БГВ, обеспечивая таким образом большую устойчивость к ним растений [121]. Кроме того, одновременная атака вредителей на фоне действия водного стресса повышает привлекательность листьев кормовых бобов для наездника *Trissolcus basalis* Wollaston (Hymenoptera: Scelionidae) [122] или, напротив, вызывает отпугивание паразитоидов на хлопчатнике [123]. Эффект непосредственно стресса или репаративного периода на связанную с вредителями эмиссию монотерпенов может сохраниться достаточно длительный период, что показано на сосне съедобной [124]. Эмиссия БГВ чувствительна к повышению температуры, но мало данных о реакции на увеличение концентрации CO_2 [125, 126]. Согласно моделям, повышение температуры может оказать более существенное влияние на синтез БГВ, чем повышение концентрации CO_2 [127]. При обогащении CO_2 образование изопрена снижается, а других БГВ — увеличивается [128]. Повышение концентрации CO_2 снижает устьичную проводимость листьев, и это может внести определенный вклад в снижение выделения из них газообразных соединений. Повышенная концентрация CO_2 на фоне атаки вредителей ингибирует выделение изопреноидов [129, 130], в то время как эмиссия других вторичных газообразных соединений усиливается [131], повышая таким образом устойчивость растений к вредителям. Хотя повышенная концентрация CO_2 , потепление и засуха являются главными факторами изменения климата, их интерактивный эффект на систему растение–вредитель остается малоизученным.

Обогащение воздуха O_3 повышает восприимчивость растений к процессу яйцекладки насекомых-вредителей [132]. При этом женские особи в ходе этого процесса не реагировали на различия в эмиссии газов, обусловленные повреждением вредителями. В условиях повышенной концентрации O_3 привлечение гусениц капустной моли на поврежденную вредителем белокачанную капусту снизилось в результате разрушения терпеноидов, а также репеллентных свойств продуктов их окисления [133]. Интересно, что только озон (без вредителя) не индуцировал выделение вторичных БГВ растениями горчицы черной [134]. Однако поедание ее листьев капустной белянкой *Pieris brassicae* (L.) (Lepidoptera: Pieridae) сразу после экспозиции в атмосфере озона усилило эмиссию заметно сильнее, чем только поедание вредителем. Что касается паразитоидов, их также привлекали больше именно растения в варианте “озон + вредитель”.

Уровень азотного питания может оказать на выделение БГВ из листьев позитивное, негативное или нейтральное влияние [135]. При этом умеренный агрофон усиливал эмиссию монотерпена, а низкий и избыточный, напротив, снижали и, соответственно, уменьшали привлечение паразитоидов [123]. Повышенный азотный фон на фоне сильного загрязнения атмосферы озоном увеличивал выделение нескольких монотерпенов и общих секвитерпенов у сосны, причем конечный эффект определялся присутствием вредителя [81]. Вместе с тем в аналогичных условиях выделение БГВ из листьев клевера снижалось [115].

ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ “РАСТЕНИЕ–ФИТОФАГ”

Повышение концентрации CO_2 и связанное с этим увеличение содержания углеводов в листьях [2] оказывает непосредственное влияние на пищевые предпочтения вредных насекомых и соответственно динамику развития популяций в агрофитоценозах. Увеличение концентрации углеводов повышает запасы липидов, что снижает адаптивный потенциал, а белка — сокращает продолжительность жизненного цикла насекомых [136]. Кроме того, повышенное соотношение $\text{C} : \text{N}$ в листьях ведет к компенсаторному потреблению большей листовой массы некоторыми листогрызущими насекомыми [137] и увеличивает популяцию тли благодаря лучшему обеспечению бактериальных эндосимбионтов питательными веществами [138]. В этих условиях потребляется в среднем на 14% больше массы листьев C_3 растений для поддержания даже меньшей скорости роста вредителя, чем при нормальной концентрации CO_2 , что соответственно оказывает большее

повреждающее воздействие на посевы [139]. Это связано с тем, что у C_3 -растений в этих условиях синтезируется больше углеводов (на 23–50%) и меньше белка (на 10%), в результате чего соотношение $C : N$ увеличивается примерно на 19% и в несколько меньшей мере – у C_4 -видов растений [87]. Снижение содержания протеина, напротив, увеличивает эффективность его усвоения кузнечиками из видов луговых трав с C_3 -типом метаболизма углерода [140]. В результате отмечают резкий рост популяции насекомых и даже вспышку, что снижает продуктивность экосистем [141]. Однако отмеченное компенсаторное увеличение питания относится далеко не ко всем видам насекомых и растений.

Гусеницы преимущественно предпочитают больше белка в листьях относительно углеводов (в соотношении 2 : 1 или больше), в то время как тли – в соотношении 1 : 1 или даже меньше белка, чем углеводов [138]. Однако изменения пищевых предпочтений насекомых в условиях изменения климата из-за повышения концентрации CO_2 вряд ли приведут к смене вида растения-хозяина, и патогены через ряд поколений смогут адаптироваться к изменению метаболизма их постоянного растения-хозяина. Например, компенсаторное питание щавелевого листоеда *Gastroides viridula* (DeGeer) (Coleoptera: Chrysomelidae) на щавеле, растущем при повышенной концентрации CO_2 , уменьшает выживаемость и плодовитость последующих поколений, остающихся тем не менее на том же виде растений [142]. Аналогично этому, у гусениц снижается эффективность усвоения углеводов из растений, выращенных при повышенной концентрации CO_2 [143]. Вместе с тем насекомым через ряд поколений удастся легко адаптироваться к высокоуглеводной листовой массе. В этих условиях нельзя исключать также влияния продуктов вторичного метаболизма на пищевые предпочтения насекомых. Например, мутанты арабидопсиса с модифицированным крахмалом отличаются содержанием глюкозинолатов [144]. Это может подчеркивать тесную связь углеводного метаболизма растений с защитной сигнальной системой в условиях изменения климата, включающего в качестве одного из факторов также увеличение температуры воздуха. Однако центральным звеном (посредником), регулирующим взаимосвязь вредителя с растением-хозяином в меняющихся условиях среды является гормональная система, влияющая, в свою очередь, на переменную пищевую ценность растений в целом, а не только соотношение $C : N$ в листовой массе.

Повреждения листьев сои соевой совкой *Chrysodeixis includens* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae) в полевых условиях в камерах с открытым верхом

при повышенном содержании CO_2 оказались намного больше, чем при нормальной концентрации CO_2 [145, 146]. Японский жук предпочитает листья сои именно при высокой концентрации CO_2 , и эти особи живут дольше и производят больше потомства, чем на растениях, выращенных при обычной концентрации CO_2 [147]. В этих условиях тормозится синтез ингибитора фермента цистеин протеазы (CysPI) [148, 149]. Данный фермент представляет собой небольшой белок, препятствующий протеазам насекомых расщеплять белковые соединения в растительной пище с целью получения необходимых питательных веществ [150]. Другие параметры питательной ценности и привлекательности тканей – снижение оводненности, увеличение жесткости листьев, транспорт большего количества ассимилятов для синтеза фенольных компонентов также совместно участвуют в защите растений от патогенов [151]. Повышенная жесткость, коррелирующая с удельной поверхностной плотностью листьев ($г/дм^2$), естественно, может снизить поедаемость листьев из-за стачивания зубцов в ротовом аппарате листогрызущих насекомых. Одновременное повышение температуры на фоне увеличения концентрации CO_2 нивелирует увеличение содержания углеводов, однако содержание азота при этом снижается, как и $N : C$ в листьях. Поскольку повышение температуры стимулирует метаболизм насекомых в сочетании со снижением концентрации азота в листьях, одновременное повышение температуры и CO_2 в будущем может резко увеличить вредоносность насекомых. Частично это можно объяснить прямым действием температуры на метаболизм насекомого. Например, поедание листьев возрастает на 1% на каждый градус повышения температуры от 16 до 37°C [152, 153], резко снижаясь в последующем из-за увеличения смертности особей.

В некоторых случаях эффективность обработки инсектицидами в условиях повышенного содержания CO_2 в атмосфере может быть снижена. Например, обработка посевов трансгенного риса TT51 против бурой рисовой цикадки инсектицидом триазофос в условиях повышенной концентрации CO_2 была менее эффективна, чем в условиях естественного содержания CO_2 в атмосфере [154].

Изменения климата оказывают существенное влияние на взаимосвязь паразитоида с растением-хозяином и численностью листогрызущих вредителей [155, 156]. С увеличением изменчивости климата (температура + осадки) способность паразитоида контролировать размер популяции вредителя на растении-хозяине уменьшается [157] и вероятность атак увеличивается.

Различия в оптимальных температурах развития вредителя и энтомофагов могут привести к нарушению синхронизации их развития и к резкому увеличению численности вредителя на растении-хозяине [158]. Это является примером косвенного влияния изменений климата на ситуацию, как и изменения в эффективности стратегий защиты растений (химическая защита растений, биологическая защита и т.п.) [159, 160]. Аналогично этому современные агротехнические мероприятия и изменения в землепользовании зачастую оказывают на развитие патогенов гораздо большее влияние, чем непосредственное действие изменений климата [161].

При повышенной концентрации CO_2 содержание азота, а также микроэлементов — железа и цинка, в листьях C_3 растений снижается [162], что ухудшает питательную ценность для фитофагов и может поменять их пищевые предпочтения [163]. В результате листогрызущим насекомым для удовлетворения своих пищевых потребностей приходится потреблять больше растительной массы [39, 164]. Повышенная концентрация CO_2 может также увеличить повреждения сельскохозяйственных культур колюще-сосущими насекомыми, включая тлю, питающуюся преимущественно флоэмным соком и поэтому очень чувствительную к изменению химического состава растений в условиях меняющегося климата [165]. В целом обогащение атмосферы CO_2 позитивно влияет на тлю [87], вместе с тем оказывая различное влияние на число особей в популяции, их плодовитость и выживаемость у разных видов. Это может быть связано в том числе с влиянием искомого фактора на C/N метаболизм, вторичный метаболизм растений, устьичную проводимость и температуру листьев, а также их анатомо-морфологические характеристики [166, 167]. В отличие от листогрызущих вредителей, поедающих отдельные фрагменты листьев, тля, высасывая флоэмный сок, вызывает лишь точечные повреждения тканей [168]. Тля не только извлекает пищу из растения-хозяина, но и меняет свое местоположение на листьях, чтобы избежать защитной реакции растения, или выделяет во флоэму эффекторные белки для подавления искомой реакции [169]. С целью удовлетворения своих пищевых потребностей тли могут также воздействовать на физиологические процессы в растении-хозяине, например, индуцировать изменения во вторичном метаболизме или устьичной регуляции, а также подавлять защитные реакции растений [170]. После контакта с поверхностью листа тле необходимо преодолеть защитные барьеры, включая трихомы и эпикутикулярные воски, чтобы обеспечить проникновение стилета в лист растения-хозяина. Повышенная концентрация CO_2

при выращивании растений репы и клевера увеличивала плотность трихом на поверхности листа [171, 172], а у арабидопсиса и пшеницы, напротив, снижала [100, 173]. Поэтому для отбора первой пробы флоэмного сока из листьев клевера тле требуется больше времени, чем из листьев других культур.

Многие вторичные метаболиты помогают растениям противостоять атаке тли, увеличивая время, необходимое для проникновения стилета во флоэму и отбора первой порции флоэмного сока. Например, особям тли, заселяющим сорта люцерны с высоким содержанием сапонина в листьях, требуется больше времени для прохождения стилета через эпидермис и мезофилл, а также уменьшается порция всасываемого ими флоэмного сока [174]. Более того, различные фенольные соединения оказывают неодинаковое влияние на параметры их питания. Кофейная и галловые кислоты у зерновых культур, например, резко снижали время питания тлей на зерновках, а наличие катехина сокращало количество потребляемого сока. Однако, несмотря на высокое содержание танинов и фенольных соединений в листьях растения-хозяина, обыкновенная черемуховая тля *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae), напротив, хорошо развивалась при повышенной концентрации CO_2 [175]. Таким образом, стратегия выживания тли в отдельных случаях может позволить ей преодолеть некоторые механизмы, используемые растениями для защиты. Даже после достижения стилетом флоэмы растения могут предотвратить или уменьшить всасывание первой порции сока, содержащей углеводы, белки и аминокислоты, необходимые для растений [176]. С этой целью растения с помощью Ca^{2+} -сигнальной системы создают целый ряд защитных механизмов, тормозящих питание тли содержимым флоэмы [177] путем обеспечения непроницаемости ситовидных труб благодаря закупорке ситовидных пор отложениями каллозы и белковыми пробками [178]. Когда это произойдет, тли вынуждены будут секретировать во флоэму водянистую слюну, содержащую кальций-связывающие белки, которые противодействуют закупорке ситовидных элементов. Именно время, потраченное на секретирование (выделение) слюны в ситовидные элементы, и связанные с этим процессы удлиняют период отбора первой пробы. На эти процессы также оказывает влияние повышение концентрации CO_2 , увеличивающее как биосинтез каллозы, например, у арабидопсиса [179], так и концентрацию цитозольного свободного кальция, как у коммелины [180]. Это продлевает время для преодоления тлей сопротивления флоэмы. Вместе с тем соотношение $\text{N} : \text{C}$ во флоэмном соке небобовых культур составляет 0.1, а в листовых

тканях, потребляемых листогрызущими вредителями, — 0.8–1.5 [138]. Таким образом, пониженное содержание N во флоэнном соке может стать значимым ограничивающим фактором для роста и размножения вредителей с колюще-сосущим ротовым аппаратом. Ситуация еще больше осложняется при выращивании растений при повышенной концентрации CO_2 , когда в результате увеличения интенсивности фотосинтеза и, соответственно, поступления дополнительного количества сахарозы и дальнейшего разбавления флоэмного сока концентрация азотистых соединений в нем снижается еще больше. Это, в свою очередь, удлиняет предрепродуктивный период и снижает фертильность некоторых видов тли [181]. Вместе с тем хотя относительная концентрация аминокислот во флоэнном соке растений хлопчатника при повышенной концентрации CO_2 была меньше, чем при обычной, их содержание в организмах тли в первом случае было больше. Это связано с потреблением ими большего количества сока для удовлетворения пищевых потребностей [182]. Более того, при повышенной концентрации CO_2 содержание незаменимых аминокислот во флоэме, например, у листьев ячменя, увеличивается [183], особенно при дополнительной азотной подкормке растений. Что касается бобовых культур, повышение концентрации CO_2 обуславливало увеличение на 38% количества симбиотически фиксированного азота в сравнении с нормальной концентрацией CO_2 , в результате чего соотношение C/N в обоих вариантах практически не различалось [184]. При заселении люцерны гороховой тлей повышенная концентрация CO_2 значительно увеличила содержание аминокислот во флоэме листьев [185]. Например, повышенная концентрация CO_2 увеличивала содержание незаменимых аминокислот на 86% и колонизацию высокоустойчивого сорта люцерны гороховой тлей на 56% [186], а у среднеустойчивого сорта, напротив, снижала на 53 и 33% соответственно. Таким образом, в условиях изменения климата отдельные сорта могут быть более или менее устойчивы к атаке тлей [187]. Кроме того, виды тли тоже различаются по реакции на повышение концентрации CO_2 [188], что, в свою очередь, может оказать влияние как на внутри-, так и межвидовую конкуренцию насекомых. Заслуживают также внимания данные, согласно которым энтомофаги становятся более активными врагами тли при повышенной концентрации CO_2 [43, 188] и что тли становятся менее чувствительными к феромонам в этих условиях [102, 189]. Все это может усиливать негативный эффект тлей на метаболизм растения-хозяина [190].

Разные стратегии питания тлей в условиях изменяющихся факторов среды могут быть обусловлены

их одновременной адаптацией к растению и окружающей среде. Однако факторы изменения климата оказывают лишь слабое непосредственное воздействие на фитофагов, и повышенная концентрация CO_2 действует на тлю в том числе путем анатомо-морфологических и физиолого-биохимических изменений растения-хозяина [191].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что отдельные эффекты изменения климата могут быть благоприятны для аграрного сектора России (“осевение” сельского хозяйства) и некоторых регионов мира, в целом защита растений от вредных организмов в будущем может заметно осложниться. Это обусловлено интерактивным эффектом продолжающегося увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере, роста температуры и возрастанием частоты и интенсивности чрезвычайных погодных ситуаций.

Адаптация технологий защиты к потеплению климата определяется, прежде всего, устойчивостью к биотическим факторам и целому ряду меняющихся одновременно абиотических стрессоров (агрофон, влагообеспеченность, новые средства защиты растений, в т.ч. биопестициды, и т.п.). В случае успешной адаптации можно было бы ожидать снижения потерь урожая, а также эмиссии парниковых газов на единицу продукции. Этой же цели служит уход от монокультуры, повышающий популяции энтомофагов для борьбы с вредителями, а также использование мозаики сортов, устойчивых как к вредным организмам, так и к неблагоприятным условиям среды.

Вариация сроков посева, внедрение новых севооборотов, применение приемов почвозащитного земледелия (нулевая/минимальная обработка и мульчирование почв) не только увеличивают связывание органического углерода в почве и биомассе, но и повышают устойчивость посевов против патогенов. Если же адаптация технологий защиты посевов реализуется отдельно от приемов, снижающих эмиссию парниковых газов в системе интегрированной защиты растений, напротив, возникает риск увеличения искомой эмиссии.

Вместе с тем трудности в прогнозировании биологических реакций фитофагов на изменение климата, в том числе их распространения и динамики популяций, делают проблематичными разработку и использование в ближайшей перспективе общих моделей для прогнозирования локальных всплесков вредителей, индуцированных изменениями климата. Это неизбежно повышает уязвимость и риски для растениеводческой отрасли, что может усугубить негативные последствия изменений климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год / Москва: Росгидромет, 2020. 97 с.
2. Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г. Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 83–96.
3. Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г., Гусейнов К.Г., Джалилов Ф.С.-У. Реакция сорного компонента агрофитоценоза на изменение климата // *Агрохимия*. 2020. № 11. С. 83–96.
4. Игнатов А.Н., Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г., Гусейнов К.Г., Джалилов Ф.С.-У. Влияние глобальных изменений климата на фитопатогены и развитие болезней растений // *Агрохимия*. 2020. № 12 (в печати).
5. Urban M.C., Bocoli G., Hendry A.P. Improving the forecast for biodiversity under climate change // *Science*. 2016. V. 353. aad8466–1.
6. Pecl G.T., Araújo M.B., Bell J.D. Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human wellbeing // *Science*. 2017. V. 355. eaai9214.
7. Robinet C., Roques A. Direct impacts of recent climate warming on insect populations // *Integr. Zool.* 2010. V. 5. P. 132–142.
8. Logan J.A., Régnière J., Powell J.A. Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics // *Front. Ecol. Environ.* 2003. V. 1. P. 130–137.
9. DeLucia E.H., Nabity P.D., Zavala J.A. Climate change: resetting plant–insect interactions // *Plant Physiol.* 2012. V. 160. P. 1677–1685.
10. Lehmann P., Ammunet T., Barton M., Battisti A., Eigenbrode S.D., Jepsen J.U., Kalinkat G., Neuvonen S., Niemelä P., Terblanche J.S., Økland B., Björkman C. Complex responses of global insect pests to climate warming // *Front. Ecol. Environ.* 2020. V. 18(3). P. 141–150.
11. Kocmánková E., Trnka M., Eitzinger J., Formayer H., Dubrovský M., Semerádová D., Žalud Z., Juroch J., Možný M. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests in the Central European region // *Climate res.* 2010. V. 44. P. 95–105.
12. Musolin D.L. Insects in a warmer world: ecological, physiological and life-history responses of true bugs (Heteroptera) to climate change // *Global Change Biol.* 2007. V. 13. Iss. 8. P. 1565–1585.
13. Митюшев И.М., Огнев В.В., Корсунов Е.И. Южно-американская томатная моль *Tuta absoluta* Meurick — новый опасный вредитель томата в Ростовской области // *Картофель и овощи*. 2019. № 11. С. 14–17.
14. Thackeray S.J., Henrys P.A., Hemming D. Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels // *Nature*. 2016. V. 535. P. 241–245.
15. Pureswaran D.S., Roques A., Battisti A. Forest insects and climate change // *Current Forest. Report*. 2018. V. 4. P. 35–50.
16. Wan F.H., Yang N.W. Invasion and management of agricultural alien insects in China // *Annu. Rev. Entomol.* 2016. V. 61. P. 77–98.
17. Moran E.V., Alexander J.M. Evolutionary responses to global change: lessons from invasive species // *Ecol. Lett.* 2014. V. 17. P. 637–649.
18. Diamond S.E. Contemporary climate-driven range shifts: putting evolution back on the table // *Funct. Ecol.* 2018. V. 32. P. 1652–1665.
19. Thrall P.H., Oakeshott J.G., Fitt G. Evolution in agriculture: the application of evolutionary approaches to the management of biotic interactions in agro-ecosystems // *Evol. Appl.* 2010. V. 4. P. 200–215.
20. Гриценко В.В., Гусейнов К.Г., Постников А.Н., Митюшев И.М. Проблемы и достижения в защите картофеля от колорадского жука // *Картофель и овощи*. 2020. № 8. С. 27–31.
21. Zhou X., Harrington R., Woivod I.P., Perry J.N., Bale J.S., Clark S.J. Effects of temperature on aphid phenology // *Glob. Chang. Biol.* 1995. V. 1. P. 303–313.
22. Chen S., Fleischer S.J., Saunders M.C., Thomas M.B. The influence of diurnal temperature variation on degree-day accumulation and insect life history // *PLoS ONE*. 2015. V. 10. e0120772.
23. Samietz J., Stoeckli S., Hirschi M., Spirig C., Höhn H., Calanca P., Rotach M. Modelling the impact of climate change on sustainable management of the codling moth (*Cydia pomonella*) as key pest in apple // *Proc. IX IS on Modelling in Fruit Research and Orchard Management* // *Acta Hort.* 1068. ISHS 2015. P. 35–42.
24. Hatfield J.L., Boote K.J., Kimball B.A., Ziska L.H., Izaurralde R.C. Climate impacts on agriculture: implications for crop production // *Agron. J.* 2011. V. 103. Iss. 2. P. 351–370.
25. Larsen A.E., Gaines S.D., Deschênes O. Agricultural pesticide use and adverse birth outcomes in the San Joaquin Valley of California // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. P. 302.
26. Musser F., Shelton A. The influence of post-exposure temperature on the toxicity of insecticides to *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) // *Pest Manag. Sci.* 2005. V. 61(5). P. 508–510.
27. Ge L.-Q., Huang L.-J., Yang G.-Q., Song Q.-Sh., Stanley D., Gurr G.M., Wu J.-C. Molecular basis for insecticide-enhanced thermotolerance in the brown planthopper *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae) // *Mol. Ecol.* 2013. V. 22. P. 5624–5634.
28. Zalucki M.P., Shabbir A., Silva R. Estimating the economic cost of one of the world's major insect pests, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae): just how long is a piece of string? // *J. Econ. Entomol.* 2012. V. 105. P. 1115–1129.
29. Bradshaw C.J.A., Leroy B., Bellard C. Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects // *Nat. Commun.* 2016. V. 7. 12986.
30. Heimpel G.E., Yang Y., Hill J.D., Ragsdale D.W. Environmental consequences of invasive species: greenhouse gas emissions of insecticide use and the role of biological control in reducing emissions // *PLoS ONE*. 2013. V. 8(8). e72293.
31. Audsley E., Stacey K., Parsons D.J., Williams A.G. Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use. Cranfield: Cranfield University, 2009. 20 p.

32. Kern M., Noleppa S., Schwarz G. Impacts of chemical crop protection applications on related CO₂ emissions and CO₂ assimilation of crops // Pest Manag. Sci. 2012. V. 68. Iss. 11. P. 1458–1466.
33. Lindroth R.L. Impacts of elevated atmospheric CO₂ and O₃ on forests: phytochemistry, trophic interactions, and ecosystem dynamics // J. Chem. Ecol. 2010. V. 36. P. 2–21.
34. Boullis A., Francis F., Verheggen F.J. Climate change and tritrophic interactions: will modifications to greenhouse gas emissions increase the vulnerability of herbivorous insects to natural enemies? // Environ. Entomol. 2015. V. 44(2). P. 277–286.
35. Thomson L.J., Macfadyen S., Hoffmann A.A. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests // Biol. Control. 2010. V. 52. Iss. 3. P. 296–306.
36. Iltis C., Martel G., Thiéry D. When warmer means weaker: high temperatures reduce behavioral and immune defenses of the larvae of a major grapevine pest // J. Pest Sci. 2018. V. 91. P. 1315–1326.
37. Klaiber J., Najar-Rodriguez A.J., Dialer E., Dorn S. Elevated carbon dioxide impairs the performance of a specialized parasitoid of an aphid host feeding on *Brassica* plants // Biol. Control. 2013. V. 66. P. 49–55.
38. Roth S.K., Lindroth R.L. Elevated atmospheric CO₂: effects on phytochemistry, insect performance and insect-parasitoid interactions // Glob. Change Biol. 1995. V. 1. Iss. 3. P. 173–182.
39. Sun Y., Ge F. How do aphids respond to elevated CO₂? // J. Asia-Pac. Entomol. 2011. V. 14. P. 217–220.
40. Vuorinen T., Nerg A.M., Ibrahim M.A., Reddy G.V.P., Holopainen J.K. Emission of *Plutella xylostella*-induced compounds from cabbages grown at elevated CO₂ and orientation behavior of the natural enemies // Plant Physiol. 2004. V. 135. P. 1984–1992.
41. Sassi C. de, Tylanakis J.M. Climate change disproportionately increases herbivore over plant or parasitoid biomass // PLoS ONE. 2012. V. 7(7). e40557.
42. Coll M., Hughes L. Effects of elevated CO₂ on an insect omnivore: a test for nutritional effects mediated by host plants and prey // Agricult. Ecosyst. Environ. 2008. V. 123. P. 271–279.
43. Chen F.J., Ge F., Parajulee M.N. Impact of elevated CO₂ on tritrophic interaction of *Gossypium hirsutum*, *Aphis gossypii*, and *Leis axyridis* // Environ. Entomol. 2005. V. 34. P. 37–46.
44. Chen F.J., Wu G., Parajulee M.N., Ge F. Impact of elevated CO₂ on the third trophic level: A predator *Harmoina axyridis* and a parasitoid *Aphidius picipes* // Biocontrol Sci. Technol. 2007. V. 17:3. P. 313–324.
45. Grabenweger G., Hopp H., Jackel B., Balder H., Koch T., Schmolling S. Impact of poor host-parasitoid synchronisation on the parasitism of *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae) // Europ. J. Entomol. 2007. V. 104. P. 153–158.
46. Dillon M., Wang G., Huey R. Global metabolic impacts of recent climate warming // Nature. 2010. V. 467. P. 704–706.
47. Deutsch C.A., Tewksbury J.J., Tigchelaar M. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate // Science. 2018. V. 361. P. 916–919.
48. Andrew N.R., Hill S.J., Binns M. Assessing insect responses to climate change: what are we testing for? Where should we be heading? // Peer J. 2013. 1.e11.
49. Rosenzweig C., Iglesias A., Yang X.B., Epstein P.R., Chivian E. Climate change and extreme weather events – implications for food production, plant diseases, and pests // NASA Publications. 2001. № 24.
50. Cagan L., Tancik J., Hassan S. Natural parasitism of the European corn borer eggs *Ostrinia nubilalis* Hbn. (Lep., Pyraidae) by *Trichogramma* in Slovakia – need for field releases of the natural enemy // J. Appl. Entomol. 1998. V. 122. P. 315–318.
51. Pasquarella V.J., Bradley B.A., Woodcock C.E. Near-real-time monitoring of insect defoliation using Landsat time series // Forests. 2017. V. 8. P. 275.
52. Masters G., Norgrove L. Climate change and invasive alien species // CABI Work. 2010. Paper 1. P. 1–30.
53. Стамо П.Д., Коваленков В.Г., Кузнецова О.В., Тюрина Н.М., Никитенко Ю.В. Саранчовых вредителей необходимо контролировать на межрегиональном уровне // Защита и карантин раст. 2017. № 2. С. 6–10.
54. Zavala J.A., Casteel C.L., DeLucia E.H., Berenbaum M.R. Anthropogenic increase in carbon dioxide compromises plant defense against invasive insects // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105. P. 5129–5133.
55. Castro J.C., Dohleman F.G., Bernacchi C.J., Long S.P. Elevated CO₂ significantly delays reproductive development of soybean under Free Air Concentration Enrichment (FACE) // J. Exp. Bot. 2009. V. 60. P. 2945–2951.
56. Zangerl A.R., Hamilton J.G., Miller T.J., Crofts A.R., Oxborough K., Berenbaum M.R., DeLucia E.H. Impact of folivory on photosynthesis is greater than the sum of its holes // Proceed. Nat. Acad. Sci. USA. 2002. V. 99. P. 1088–1091.
57. Nabity P.D., Zavala J.A., DeLucia E.H. Indirect suppression of photosynthesis on individual leaves by arthropod herbivory // Annal. Bot. 2009. V. 103. Iss. 4. P. 655–663.
58. Peterson R.K.D., Shannon C.L., Lenssen A.W. Photosynthetic responses of legume species to leaf-mass consumption injury // Environ. Entomol. 2004. V. 33. Iss. 2. P. 450–456.
59. Delaney K.J., Higley L.G. An insect countermeasure impacts plant physiology: midrib vein cutting, defoliation and leaf photosynthesis // Plant Cell Environ. 2006. V. 29. P. 1245–1258.
60. Heng-Moss T., Macedo T., Franzen L., Baxendale F., Higley L., Sarath G. Physiological responses of resistant and susceptible buffalograsses to *Blissus Occiduus* (Hemiptera: Blissidae) feeding // J. Econom. Entomol. 2006. V. 99. Iss. 1. P. 222–228.
61. Macedo T.B., Weaver D.K., Peterson R.K.D. Photosynthesis in wheat at the grain filling stage is altered by larval wheat stem sawfly (Hymenoptera: Cephidae) injury and reduced water availability // J. Entomol. Sci. 2007. V. 42(2). P. 228–238.
62. Sack L., Holbrook N.M. Leaf hydraulics // Annual Rev. Plant Biol. 2006. V. 57:1. P. 361–381.
63. Peterson R.K.D., Higley L.G., Haile F.J., Barri-gossi J.A.F. Mexican bean beetle (Coleoptera: Coccinellidae) injury affects photosynthesis of *Glycine max* and

- Phaseolus vulgaris* // Environ. Entomol. 1998. V. 27. P. 373–381.
64. Berenbaum M.R., Zangerl A.R. Facing the future of plant-insect interaction research: le retour à la “raison d’être” // Plant Physiol. 2008. V. 146(3). P. 804–811.
 65. Gog L., DeLucia E.H., Berenbaum M.R., Zangerl A.R. Autotoxic effects of essential oils on photosynthesis in parsley, parsnip, and rough lemon // Chemoecology. 2005. V. 15. P. 115–119.
 66. Machado R.A.R., Baldwin I.T., Erb M. Herbivory-induced jasmonates constrain plant sugar accumulation and growth by antagonizing gibberellin signaling and not by promoting secondary metabolite production // New Phytol. 2017. V. 215. P. 803–812.
 67. Guo Q., Major I.T., Howe G.A. Resolution of growth-defense conflict: mechanistic insights from jasmonate signaling // Curr. Opin. Plant Biol. 2018. V. 44. P. 72–81.
 68. Jamieson M.A., Burkle L.A., Manson J.S., Runyon J.B., Trowbridge A.M., Zientek J. Global change effects on plant-insect interactions: the role of phytochemistry // Curr. Opin. Insect Sci. 2017. V. 23. P. 70–80.
 69. Trowbridge A.M. Evolutionary ecology of chemically mediated plant-insect interactions // Ecology and the Environment / Ed. Monson R. The Plant Sci. NY: Springer, 2014. V. 8.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7501-9_11
 70. Huber M., Epping J., Schulze Gronover C., Fricke J., Aziz Z., Brillatz T., Swyers M., Köllner T.G., Vogel H., Hammerbacher A., Triebwasser-Freese D., Robert C.A.M., Verhoeven K., Preite V., Gershenzon J., Erb M. A latex metabolite benefits plant fitness under root herbivore attack // PLoS Biol. 2016. V. 14: e1002332.
 71. Zhang L., Kawaguchi R., Morikawa-Ichinose T., Allahham A., Kim S.-J., Maruyama-Nakashita A. Sulfur deficiency-induced glucosinolate catabolism attributed to two β -glucosidases, BGLU28 and BGLU30, is required for plant growth maintenance under sulfur deficiency // Plant Cell Physiol. 2020. V. 61. P. 803–813.
 72. Stahl E., Hilfiker O., Reymond P. Plant-arthropod interactions: who is the winner? // Plant J. 2018. V. 93. P. 703–728.
 73. Zagrobelny M., de Castro É.C.P., Möller B.L., Bak S. Cyanogenesis in Arthropods: From chemical warfare to nuptial gifts // Insects. 2018. № 9.
 74. Hu L., Mateo P., Ye M., Zhang X., Berset J.D., Handrick V., Radisch D., Grabe V., Köllner T.G., Gershenzon J., Robert C.A.M., Erb M. Plant iron acquisition strategy exploited by an insect herbivore // Science. 2018. V. 361. P. 694–697.
 75. Veyrat N., Robert C.A.M., Turlings T.C.J., Erb M. Herbivore intoxication as a potential primary function of an inducible volatile plant signal // J. Ecol. 2016. V. 104. P. 591–1050.
 76. Wetzel W.C., Kharouba H.M., Robinson M., Holyoak M., Karban R. Variability in plant nutrients reduces insect herbivore performance // Nature. 2016. V. 539. P. 425–427.
 77. Zhao Y.H., Jia X., Wang W.K., Liu T., Huang S.P., Yang M.Y. Growth under elevated air temperature alters secondary metabolites in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings in Cd- and Pb-contaminated soils // Sci. Total. Environ. 2016. V. 565. P. 586–594.
 78. Erb M., Kliebenstein D.J. Plant secondary metabolites as defenses, regulators, and primary metabolites: the blurred functional trichotomy // Plant Physiol. 2020. 00433.2020.
 79. Couture J.J., Serbin S.P., Townsend P.A. Elevated temperature and periodic water stress alter growth and quality of common milkweed (*Asclepias syriaca*) and monarch (*Danaus plexippus*) larval performance // Arthropod-Plant Interact. 2015. V. 9. P. 149–161.
 80. Dyer L.A., Richards L.A., Short S.A., Dodson C.D. Effects of CO₂ and temperature on tritrophic interactions // PLoS ONE. 2013. V. 8(4): e62528.
 81. Kivimäenpää M., Ghimire R.P., Sutinen S. Increases in volatile organic compound emissions of Scots pine in response to elevated ozone and warming are modified by herbivory and soil nitrogen availability // Europ. J. Forest Res. 2016. V. 135. P. 343–360.
 82. Jamieson M.A., Schwartzberg E.G., Raffa K.F., Reich P.B., Lindroth R.L. Experimental climate warming alters aspen and birch phytochemistry and performance traits for an outbreak insect herbivore // Global Change Biol. 2015. V. 21. P. 2698–2710.
 83. Huttunen L., Niemelä P., Julkunen-Tiitto R. Does defoliation induce chemical and morphological defenses in the leaves of silver birch seedlings under changing climate? // Chemoecology. 2008. V. 18. P. 85–98.
 84. Lemoine N.P., Drews W.A., Burkepille D.E., Parker J.D. Increased temperature alters feeding behavior of a generalist herbivore // Oikos. 2013. V. 122. Iss. 12. P. 1669–1678.
 85. Escobar-Bravo R., Klinkhamer P.G.L., Leiss K.A. Interactive effects of UV-B light with abiotic factors on plant growth and chemistry, and their consequences for defense against arthropod herbivores // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. P. 278.
 86. Pineda A., Pangesti N., Soler R., van Dam N.M., van Loon J.J.A., Dicke M. Negative impact of drought stress on a generalist leaf chewer and a phloem feeder is associated with, but not explained by an increase in herbivore-induced indole glucosinolates // Environ. Exp. Bot. 2016. V. 123. P. 88–97.
 87. Robinson E.A., Ryan G.D., Newman J.A. A meta-analytical review of the effects of elevated CO₂ on plant-arthropod interactions highlights the importance of interacting environmental and biological variables // New Phytol. 2012. V. 194. P. 321–336.
 88. Valkama E., Koricheva J., Oksanen E. Effects of elevated O₃, alone and in combination with elevated CO₂, on tree leaf chemistry and insect herbivore performance: a meta-analysis // Global Change Biol. 2007. V. 13. Iss. 1. P. 184–201.
 89. Ode P.J., Johnson S.N., Moore B.D. Atmospheric change and induced plant secondary metabolites – are we reshaping the building blocks of multi-trophic interactions? // Current Opinion Insect. Sci. 2014. V. 5. Iss. 1. P. 57–65.
 90. Haukioja E., Ossipov V., Lempa K. Interactive effects of leaf maturation and phenolics on consumption and growth of geometrid moth // Entomol. Exp. Appl. 2002. V. 104. P. 125–136.
 91. Haviola S., Kapari L., Ossipov V., Rantala M., Ruuhola T., Haukioja E. Foliar phenolics are differently associ-

- ated with *Epirrita autumnata* growth and immunocompetence // J. Chem. Ecol. 2007. V. 33. P. 1013–1023.
92. Orr W.C., Sohal R.S. Extension of life-span by overexpression of superoxide dismutase and catalase in *Drosophila melanogaster* // Science. 1994. V. 263. P. 1128–1130.
 93. Ruuhola T., Tikkanen O.P., Tahvanainen J. Differences in host use efficiency of larvae of a generalist moth, *Operophtera brumata* on three chemical divergent *Salix* species // J. Chem. Ecol. 2001. V. 27. P. 1595–1615.
 94. Ghasemzadeh A., Jaafar H., Rahmat A. Elevated carbon dioxide increases contents of flavonoids and phenolic compounds, and antioxidant activities in Malaysian young ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) varieties // Molecules. 2010. V. 15. P. 7907–7922.
 95. O'Neill B.F., Zangerl A.R., Dermody O., Bilgin D.D., Casteel C.L. Impact of elevated levels of atmospheric CO₂ and herbivory on flavonoids of soybean (*Glycine max* Linnaeus) // J. Chem. Ecol. 2010. V. 36. P. 35–45.
 96. Walters D.R. Plant defense: warding off attack by pathogens, herbivores, and parasitic plants. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2011. 236 p.
 97. Vanette R.L., Hunter M.D. Genetic variation in the expression of defense phenotype may mediate evolutionary adaptation of *Asclepias syriaca* to elevated CO₂ // Glob. Change Biol. 2011. V. 17. P. 1277–1288.
 98. Karowe D.N., Siemens D.S., Mitchell-Olds T. Species-specific response of glucosinolate content to elevated atmospheric CO₂ // J. Chem. Ecol. 1997. V. 23. P. 2569–2582.
 99. Bidart-Bouzat M., Imeh-Nathaniel A. Global change effects on plant chemical defenses against insect herbivores // J. Integr. Plant Biol. 2008. V. 50. P. 1339–1354.
 100. Bidart-Bouzat M.G., Mithen R., Berenbaum M.R. Elevated CO₂ influences herbivory-induced defense responses of *Arabidopsis thaliana* // Oecologia. 2005. V. 145. P. 415–424.
 101. Schonhof I., Klaring H.P., Krumbein A., Schreiner M. Interaction between atmospheric CO₂ and glucosinolates in broccoli // J. Chem. Ecol. 2007. V. 33. P. 105–114.
 102. Awmack C., Harrington R., Leather S. Host plant effects on the performance of the aphid *Aulacorthum solani* (Kalt.) (Homoptera: Aphididae) at ambient and elevated CO₂ // Glob. Change Biol. 1997. V. 3. P. 545–549.
 103. Li Z., Liu T., Xiao N., Li J., Chen F. Effects of elevated CO₂ on the interspecific competition between two sympatric species of *Aphis gossypii* and *Bemisia tabaci* fed on transgenic Bt cotton // Insect Sci. 2001. V. 18. P. 426–434.
 104. Bezemer T., Knight K., Newington J., Jones T. How general are aphid responses to elevated atmospheric CO₂? // Ann. Entomol. Soc. Am. 1999. V. 92. P. 724–730.
 105. Newman J., Gibson D., Parsons A., Thornley J. How predictable are aphid population responses to elevated CO₂? // J. Anim. Ecol. 2003. V. 72. P. 556–566.
 106. Himanen S.J., Nissinen A., Dong W., Nerg A., Stewart C.N. Interactions of elevated carbon dioxide and temperature with aphid feeding on transgenic oilseed rape: Are *Bacillus thuringiensis* (Bt) plants more susceptible to nontarget herbivores in future climate? // Glob. Change Biol. 2008. V. 14. P. 1437–1454.
 107. Hulle M., Coeurd'Acier A., Bankhead-Dronnet S., Harrington R. Aphids in the face of global changes // C. R. Biol. 2010. V. 333. P. 497–503.
 108. Gao F., Zhu S., Sun Y., Du L., Parajulee M. Interactive effects of elevated CO₂ and cotton cultivar on tri-trophic interaction of *Gossypium hirsutum*, *Aphis gossypii*, and *Propylaea japonica* // Environ. Entomol. 2008. V. 37. P. 29–37.
 109. Sun Y.C., Chen F.J., Feng G. Elevated CO₂ changes interspecific competition among three species of wheat aphids: *Sitobion avenae*, *Rhopalosiphum padi*, and *Schizaphis graminum* // Environ. Entomol. 2009. V. 38. P. 26–34.
 110. Awmack C., Harrington R., Lindroth R. Aphid individual performance may not predict population responses to elevated CO₂ or O₃ // Glob. Change Biol. 2004. V. 10. P. 1414–1423.
 111. Uddling J., Teclaw R.M., Pregitzer K.S., Ellsworth D.S. Leaf and canopy conductance in aspen and aspen-birch forests under free-air enrichment of carbon dioxide and ozone // Tree Physiol. 2009. V. 29. P. 1367–1380.
 112. O'Neill B.F., Zangerl A.R., DeLucia E.H., Casteel C., Zavala J.A., Berenbaum M.R. Leaf temperature of soybean grown under elevated CO₂ increases *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae) population growth // Insect Sci. 2011. V. 18. P. 419–425.
 113. Throop H., Lerdau M. Effects of nitrogen deposition on insect herbivory: implications for community and ecosystem processes // Ecosystems. 2004. V. 7. P. 109–133.
 114. Jamieson M.A., Trowbridge A.M., Raffa K.F., Lindroth R.L. Consequences of climate warming and altered precipitation patterns for plant-insect and multitrophic interactions // Plant Physiol. 2012. V. 160(4). P. 1719–1727.
 115. Llusia J., Bermejo-Bermejo V., Calvete-Sogo H., Peñuelas J. Decreased rates of terpene emissions in *Ornithopus compressus* L. and *Trifolium striatum* L. by ozone exposure and nitrogen fertilization // Environ. Pollut. 2014. V. 194. P. 69–77.
 116. Carriero G., Brunetti C., Fares S., Hayes F., Hoshika Y., Mills G., Tattini M., Paoletti E. BVOC responses to realistic nitrogen fertilization and ozone exposure in silver birch // Environ. Pollut. 2016. V. 213. P. 988–995.
 117. Peñuelas J., Llusia J. BVOCs: plant defense against climate warming? // Trends Plant Sci. 2003. V. 8. Iss. 3. P. 105–109.
 118. Holopainen J.K., Gershenzon J. Multiple stress factors and the emission of plant VOCs // Trends Plant Sci. 2010. V. 15. Iss. 3. P. 176–184.
 119. Holopainen J.K., Nerg A.-M., Blande J.D. Multitrophic signalling in polluted atmospheres // Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. P. 285–314.
 120. Gouinguene S.P., Turlings T.C.J. The effects of abiotic factors on induced volatile emissions in corn plants // Plant Physiol. 2002. V. 129(3). P. 1296–1307.
 121. Copolovici L., Kännaste A., Remmel T., Niinemets Ü. Volatile organic compound emissions from *Alnus glutinosa*

- nosa under interacting drought and herbivory stresses // Environ. Exp. Bot. 2014. V. 100. P. 55–63.
122. Salerno G., Frati F., Marino G. Effects of water stress on emission of volatile organic compounds by *Vicia faba*, and consequences for attraction of the egg parasitoid *Trissolcus basalis* // J. Pest. Sci. 2017. V. 90. P. 635–647.
 123. Olson D.M., Lewis W.J., Cortesero F.M., Rains G.C., Potter T. Nitrogen and water affect direct and indirect plant systemic induced defense in cotton // Biol. Control. 2009. V. 49. Iss. 3. P. 239–244.
 124. Burkley L.A., Runyon J.B. The smell of environmental change: using floral scent to explain shifts in pollinator attraction // Appl. Plant Sci. 2017. V. 5. Iss. 6. 1600123.
 125. Yuan J.S., Himanen S.J., Holopainen J.K., Chen F., Steward C.N.Jr. Smelling global climate change: mitigation of function for plant volatile organic compounds // Trends Ecol. Evol. 2009. V. 24. P. 323–331.
 126. Peñuelas J., Staudt M. BVOCs and global change // Trends Plant Sci. 2010. V. 15. P. 133–144.
 127. Heald C.L., Wilkinson M.J., Monson R.K., Alo C.A., Want G.L., Guenther A. Response of isoprene emissions to ambient CO₂ changes and implications for global budgets // Glob. Change Biol. 2009. V. 15. P. 1127–1140.
 128. Loreto F., Fischbach R.J., Schnitzler J.P., Ciccioli P., Brancaleoni E. Monoterpene emission and monoterpene synthase activities in the Mediterranean evergreen oak *Quercus ilex* L. grown at elevated CO₂ concentrations // Glob. Change Biol. 2001. V. 7. P. 709–717.
 129. Trowbridge A.M., Asensio D., Eller A.S.D., Way D.A., Wilkinson M.J. Contribution of various carbon sources toward isoprene biosynthesis in poplar leaves mediated by altered atmospheric CO₂ concentrations // PLoS ONE. 2012. V. 7(2). e32387.
 130. Calfapietra C., Fares S., Manes F., Morani A., Sgrigna G., Loreto F. Role of biogenic volatile organic compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: a review // Environ. Pollut. 2013. V. 183. P. 71–80.
 131. Ballhorn D.J., Schmitt I., Fankhauser J.D., Katagiri F., Pfanz H. CO₂-mediated changes of plant traits and their effects on herbivores are determined by leaf age // Ecol. Entomol. 2011. V. 36. Iss. 1. P. 1–13.
 132. Girón-Calva P.S., Li T., Blande J.D. Plant-plant interactions affect the susceptibility of plants to oviposition by pests but are disrupted by ozone pollution // Agric. Ecosyst. Environ. 2016. V. 233. P. 352–360.
 133. Li T., Blande J., Holopainen J. Atmospheric transformation of plant volatiles disrupts host plant finding // Sci. Rep. 2016. V. 6. 33851.
 134. Khaling E., Li T., Holopainen J.K. Elevated ozone modulates herbivore-induced volatile emissions of *Brassica nigra* and alters a tritrophic interaction // J. Chem. Ecol. 2016. V. 42. P. 368–381.
 135. Chen Y., Olson D.M., Ruberson J.R. Effects of nitrogen fertilization on tritrophic interactions // Arthropod-Plant Interact. 2010. V. 4. P. 81–94.
 136. Lee K.P., Simpson S.J., Clissold F.J., Brooks R., Ballard J.W.O. Lifespan and reproduction in *Drosophila*: new insights from nutritional geometry // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105. P. 2498–2503.
 137. Johnson S.N., McNicol J.W. Elevated CO₂ and aboveground-belowground herbivory by the clover root weevil // Oecologia. 2009. V. 162. P. 209–216.
 138. Behmer S.T. Insect herbivore nutrient regulation // Annu. Rev. Entomol. 2009. V. 54. P. 165–187.
 139. Cornelissen T. Climate change and its effects on terrestrial insects and herbivory patterns // Neotrop. Entomol. 2011. V. 40. P. 155–163.
 140. Barbehenn R.V., Karowe D.N., Chen Z. Performance of a generalist grasshopper on a C₃ and a C₄ grass: compensation for the effects of elevated CO₂ on plant nutritional quality // Oecologia. 2004. V. 140. P. 96–103.
 141. Cease A.J., Elser J.J., Ford C.F., Hao S., Harrison J.F. Heavy livestock grazing promotes locust outbreaks by lowering plant nitrogen content // Science. 2012. V. 335. P. 467–469.
 142. Brooks G.L., Whittaker J.B. Responses of multiple generations of *Gastrophysa viridula*, feeding on *Rumex obtusifolius*, to elevated CO₂ // Glob. Change Biol. 1995. V. 4. P. 63–75.
 143. Barbehenn R.V., Karowe D.N., Chen Z. Effects of elevated atmospheric CO₂ on the nutritional ecology of C₃ and C₄ grass-feeding caterpillars // Oecologia. 2004. V. 140. P. 86–95.
 144. Tang J.Y. Effects of herbivory on plant and insect growth / PhD thesis. Univ. Ill., Urbana, 1999. 121 p.
 145. Hamilton J.G., Dermody O., Aldea M., Zangerl A.R., Rogers A., Berenbaum M.R. Anthropogenic changes in troposphere composition increase susceptibility of soybean to insect herbivory // Environ. Entomol. 2005. V. 34. P. 479–485.
 146. Dermody O., O'Neill B., Zangerl A., Berenbaum M., DeLucia E.H. Effects of elevated CO₂ and O₃ on leaf damage and insect abundance in a soybean agroecosystem // Arthropod Plant Interact. 2008. V. 2. P. 125–135.
 147. O'Neill B.F., Zangerl A.R., DeLucia E.H., Berenbaum M.R. Longevity and fecundity of Japanese beetle (*Popillia japonica*) on foliage grown under elevated carbon dioxide // Environ. Entomol. 2008. V. 37. P. 601–607.
 148. Casteel C.L., O'Neill B.F., Zavala J.A., Bilgin D.D., Berenbaum M.R., DeLucia E.H. Transcriptional profiling reveals elevated CO₂ and elevated O₃ alter resistance of soybean (*Glycine max*) to Japanese beetles (*Popillia japonica*) // Plant Cell Environ. 2008. V. 31. P. 419–434.
 149. Zavala J.A., Casteel C.L., Nabity P.D., Berenbaum M.R., DeLucia E.H. Role of cysteine proteinase inhibitors in preference of Japanese beetles (*Popillia japonica*) for soybean (*Glycine max*) leaves of different ages and grown under elevated CO₂ // Oecologia. 2009. V. 161. P. 35–41.
 150. Chen M.S. Inducible direct plant defenses against insect herbivores: a review // Insect. Sci. 2008. V. 15. P. 101–114.
 151. Ainsworth E.A., Davey P.P., Bernacchi C.J., Dermody O.C., Heaton E.A., Moore D.J., Morgan P.B., Naidu S.L., Yoo R.H., Zhu X., Curtis P.S., Long S.P. A metaanalysis of elevated (CO₂) effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield // Global Change Biol. 2002. V. 8. P. 695–709.

152. Clark A., Fraser K.P.P. Why does metabolism scale with temperature? // *Function. Ecol.* 2004. V. 18. P. 243–251.
153. Dingha B.N., Appel A.G., Vogt J.T. Effects of temperature on the metabolic rates of insecticide resistant and susceptible German cockroaches, *Blattella germanica* (L.) (Dictyoptera: Blattellidae) // *Midsouth Entomol.* 2009. V. 2. P. 17–27.
154. Ge L.-Q., Wua J.-C., Sun Yu-Ch., Fang Ou., Ge F. Effects of triazophos on biochemical substances of transgenic Bt rice and its nontarget pest *Nilaparvata lugens* Stål under elevated CO₂ // *Pes. Biochem. Physiol.* 2013. 107. P. 188–199.
155. Facey S.F., Ellsworth D.S., Johnson S.N., Staley J.T., Wright D.J. Upsetting the order: how climate and atmospheric change affects herbivore-enemy interactions // *Current Opinion Insect Sci.* 2014. V. 5. Issue. 1. P. 66–74.
156. Andrew N.R., Hill S.J. Effect of climate change on insect pest management // *Environmental pest management: challenges for agronomists, ecologists, economists and policymakers* / Eds. Coll M., Wajnberg E. John Wiley & Sons Ltd., 2017. P. 197–223.
157. Stireman J.O., Dyer L.A., Janzen D. Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: Implications of global warming // *Proceed. Nat. Acad. Sci.* 2005. V. 102(48). P. 17384–17387.
158. Furlong M.J., Zalucki M.P. Climate change and biological control: the consequences of increasing temperatures on host-parasitoid interactions // *Current Opinion Insect Sci.* 2017. V. 20. P. 39–44.
159. Barzman M., Bärberi P., Birch A.N.E., Boonekamp P., Dachbrodt-Saaydeh S., Graf B. Eight principles of integrated pest management // *Agron. Sustain. Dev.* 2015. V. 35(4). 17 p.
160. Lamichhane J.R., Barzman M., Booij K., Boonekamp P., Desneux D., Huber L., Kudsk P., Langrell S., Ratnadass A., Ricci P., Sarah J.-L., Messean A. Diversification of current plant protection strategies to mitigate climate change effects / 18th Inter. Plant Protect. Congr., 2015. 38 p.
161. Cock M.J.W., Biesmeijer J.C., Cannon R.J.C., Gerard P., Gillespie D., Jimenez J.J., Lavelle P.M., Raina S.K. The implications of climate change for positive contributions of invertebrates to world agriculture // *CAB Reviews.* 2013. V. 8(028). P. 1–48.
162. Bloom A.J., Burger M., Asensio J.S.R., Cousins A.B. Carbon dioxide enrichment inhibits nitrate assimilation in wheat and *Arabidopsis* // *Science.* 2010. V. 328. P. 899–903.
163. Myers S.S., Zanolatti A., Kloog I., Huybers P., Leakey A.D.B., Bloom A.J. Increasing CO₂ threatens human nutrition // *Nature.* 2014. V. 510. P. 139–143.
164. Sun Y., Guo H., Ge F. Plant-aphid interactions under elevated CO₂: some cues from aphid feeding behavior // *Front. Plant Sci.* 2016. V. 7. Art. 202. 10 p.
165. Pritchard J., Griffiths B., Hunt E.J. Can the plant-mediated impacts on aphids of elevated CO₂ and drought be predicted? // *Glob. Chang. Biol.* 2007. V. 13. P. 1616–1629.
166. Ainsworth E.A., Rogers A., Vodkin L.O., Walter A., Schurr U. The effects of elevated CO₂ concentration on soybean gene expression. An analysis of growing and mature leaves // *Plant Physiol.* 2006. V. 142. P. 135–147.
167. May P., Liao W., Wu Y., Shuai B., McCombie W.R., Zhang M.Q. The effects of carbon dioxide and temperature on microRNA expression in *Arabidopsis* development // *Nat. Commun.* 2013. 4:2145.
168. Jaouannet M., Rodriguez P.A., Thorpe P., Lenoir C.J., MacLeod R., Escudero Martinez C. Plant immunity in plant-aphid interactions // *Front. Plant Sci.* 2014. 5:663.
169. Hogenhout S.A., Bos J.I. Effector proteins that modulate plant-insect interactions // *Cur. Opin. Plant Biol.* 2011. V. 14. P. 422–428.
170. Giordanengo P., Brunissen L., Rusterucci C., Vincent C., Van Bel A., Dinant S. Compatible plant-aphid interactions: how aphids manipulate plant response // *C. R. Biol.* 2010. V. 333. P. 516–523.
171. Karowe D.N., Grubb C. Elevated CO₂ increases constitutive phenolics and trichomes, but decreases inducibility of phenolics in *Brassica rapa* (Brassicaceae) // *J. Chem. Ecol.* 2011. V. 37. P. 1332–1340.
172. Guo H., Sun Y., Li Y., Liu X., Wang P., Zhu-Salzman K. Elevated CO₂ alters the feeding behavior of the pea aphid by modifying the physical and chemical resistance of *Medicago truncatula* // *Plant Cell Environ.* 2014. V. 37. P. 2158–2168.
173. Lake J.A., Wade R.N. Plant-pathogen interactions and elevated CO₂: morphological changes in favour of pathogens // *J. Exp. Bot.* 2009. V. 60. P. 3123–3131.
174. Goławska S. Deterrence and toxicity of plant saponins for the pea aphid *Acyrtosiphon pisum* Harris // *J. Chem. Ecol.* 2007. V. 33. P. 1598–1606.
175. Zhang J., Xing G.M., Liao J.X., Hou Z.D., Wang G.X., Wang Y.F. Effects of different atmospheric CO₂ concentrations and soil moistures on the populations of bird cherry-oat aphid (*Rhopalosiphum padi*) feeding on spring wheat // *Eur. J. Entomol.* 2003. V. 100. P. 521–530.
176. Gündüz E.A., Douglas A.E. Symbiotic bacteria enable insect touse a nutritionally inadequate diet // *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2009. V. 276. P. 987–991.
177. Will T., Furch A.C., Zimmermann M.R. How phloem-feeding insects face the challenge of phloem-located defenses // *Front. Plant Sci.* 2013. 4:336.
178. Furch A.C.U., Hafke J.B., Schulz A., van Bel A.J.E. Ca²⁺ mediated remote control of reversible sieve tube occlusion in *Vicia faba* // *J. Exp. Bot.* 2007. V. 58. P. 2827–2838.
179. Li P., Ainsworth E.A., Leakey A.D., Ulanov A., Lozovaya V., Ort D.R. Arabidopsis transcript and metabolite profiles: ecotype-specific responses to open air elevated [CO₂] // *Plant Cell Environ.* 2008. V. 31. P. 1673–1687.
180. Webb A.A.R., McAinsh M.R., Mansfield T.A., Hetherington A.M. Carbon dioxide induces increases in guard cell cytosolic free calcium // *Plant J.* 1996. V. 9. P. 297–304.
181. Dáder B., Fereres A., Moreno A., Trebicki P. Elevated CO₂ impacts bell pepper growth with consequences to *Myzus persicae* life history, feeding behavior and virus transmission ability // *Sci. Rep.* 2016. 6:19120.

182. Sun Y.C., Jing B.B., Ge F. Response of amino acid changes in *Aphis gossypii* (Glover) to elevated CO₂ levels // J. Appl. Entomol. 2009. V. 133. P. 189–197.
183. Ryan G.D., Sylvester E.V.A., Shelp B.J., Newman J.A. Towards an understanding of how phloem amino acid composition shapes elevated CO₂ induced changes in aphid population dynamics // Écol. Entomol. 2015. V. 40. P. 247–257.
184. Lam S.K., Chen D., Norton R., Armstrong R. Does phosphorus stimulate the effect of elevated [CO₂] on growth and symbiotic nitrogen fixation of grain and pasture legumes? // Crop Pasture Sci. 2012. V. 63. P. 53–62.
185. Guo H., Sun Y., Li Y., Tong B., Harris M., Zhu-Salzman K. Pea aphid promotes amino acid metabolism both in *Medicago truncatula* and bacteriocytes to favor aphid population growth under elevated CO₂ // Glob. Change Biol. 2013. V. 19. P. 3210–3223.
186. Johnson S.N., Ryalls J.M.W., Karley A.J. Global climate change and crop resistance to aphids: contrasting responses of lucerne genotypes to elevated atmospheric carbon dioxide // Ann. Appl. Biol. 2014. V. 165. P. 62–72.
187. McKenzie S.W., Hentley W.T., Hails R.S., Jones T.H., Vanbergen A.J., Johnson S.N. Global climate change and above–belowground insect herbivore interactions // Front. Plant Sci. 2013. 4:412.
188. Percy K.E., Awmack C.S., Lindroth R.L., Kubiske M.E., Kopper B.J., Isebrands J.G. Altered performance of forest pests under atmospheres enriched by CO₂ and O₃ // Nature. 2002. V. 420. P. 403–407.
189. Mondor E.B., Tremblay M.N., Awmack C.S., Lindroth R.L. Altered genotypic and phenotypic frequencies of aphid populations under enriched CO₂ and O₃ atmospheres // Glob. Change Biol. 2005. V. 11. P. 1990–1996.
190. Hentley W.T., Vanbergen A.J., Hails R.S., Jones T.H., Johnson S.N. Elevated atmospheric CO₂ impairs aphid escape responses to predators and conspecific alarm signals // J. Chem. Ecol. 2014. V. 40. P. 1110–1114.
191. Yin J., Sun Y., Wu G., Ge F. Effects of elevated CO₂ associated with maize on multiple generations of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* // Entomol. Exp. Appl. 2010. V. 136. P. 12–20.

Specific Aspects of the Plant and Phytophage Interactions in Agroecosystems under Climate Change

**E. I. Koshkin^a, I. V. Andreeva^{a, #}, G. G. Guseinov^b, K. G. Guseinov^c,
F. S.-U. Dzhalilov^a, and I. M. Mityushev^a**

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

^b Group of Companies HH group, road Khyrdalan–Binagadi
34N, AZ1102 Baku, Republic of Azerbaijan

^c Institute of Crop Protection and Industrial Crops
Aziza Alieva str. 91, AZ1100 Ganja, Republic of Azerbaijan

[#] E-mail: i.andreeva@rgau-msha.ru

Effects of the global climate change factors (temperature, carbon dioxide and ozone concentrations, moisture supply) in various combinations on the modification of the relationships between plants and pests in agroecosystems. Possible climate change adaptation ways of the plant protection strategies for controlling pests are analyzed.

Key words: climate change, pests, phytophages, crop protection from pests, insecticides, secondary plant metabolites, biogenic gaseous substances.